

## Прецизионный термометр для промышленного применения на основе термочувствительных кварцевых резонаторов

Дмитрий ТУМАЙКИН  
Михаил ТУМАЙКИН  
info@sktbelpa.ru

В статье описывается прецизионный термометр для промышленного применения, выполненный на основе термочувствительных кварцевых резонаторов.

В промышленности и научных исследованиях часто требуется вести контроль температуры производственной зоны, технологической среды и другие аналогичные температурные измерения. В настоящее время для этого используют всевозможные преобразователи и датчики температуры. В целях автоматизации процесса в устройствах измерения температуры совместно с датчиками применяются контроллеры. Контроллерные устройства включают в себя схемы считывания состояния датчика или преобразователя и аналого-цифрового преобразования сигнала. Преобразованный сигнал поступает в процессорную систему для автоматического учета температуры среды и обработки полученных данных.

Преимущество использования термочувствительных кварцевых резонаторов, прежде всего, заключается в их высокой чувствительности, высокой стабильности и простоте использования. Сигнал от резонаторов можно сразу обрабатывать в цифровой форме, что удешевляет процесс контроля температуры.

Измерение температуры с помощью термочувствительных кварцевых резонаторов основано на использовании анизотропии кристалла кварца. Выбирая соответствующую ориентацию среза пьезоэлемента относительно кристаллографических осей, можно изменить его термочастотную характеристику (ТЧХ), которая в общем случае является нелинейной функцией температуры и описывается рядом следующего вида:

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \sum_{n=1}^m \delta_f^n (T - T_0)^n,$$

где  $\delta_f^n = 1/(nf_0)[\partial^n f/\partial T^n]_{T=T_0}$  — температурный коэффициент частоты (ТКЧ),  $T$  и  $T_0$  — калибровочное и опорное значения температуры;  $f_0$  — резонансная частота при температуре  $T_0$ .

В широком диапазоне температур ТЧХ кварцевого резонатора с достаточной точно-

стью аппроксимируется полиномом третьей степени ( $m = 3$ ).

Для измерения температуры нужны кварцевые резонаторы с максимальным ТКЧ и монотонным изменением ТЧХ на рабочем участке. В кварцевых датчиках температуры используются кварцевые термочувствительные резонаторы (РКТ206 или РКТ310 производства ООО «СКТБ ЭлПА») с типовой чувствительностью 60 ppm/°C, что составляет 2 Гц/°C и 4 Гц/°C для резонаторов с  $f_0$ , равной 32 и 64 кГц соответственно.

Кварцевые преобразователи температуры являются автогенераторными с частотным выходом и строятся на основе пьезорезона-

Таблица. Метрологические характеристики информационно-измерительной системы

Диапазон измерения температуры, °C	от -30 до +100 (расширенный диапазон от -60 до +260)
Максимальное время измерения одного канала, с	3
Разрешающая способность измерения частоты, Гц	0,004
Разрешающая способность индикатора (автономный режим), °C	0,1
Точность измерения температуры с помощью ПК, °C (с датчиком ПТК-01) не более, °C	0,03 (0,06)

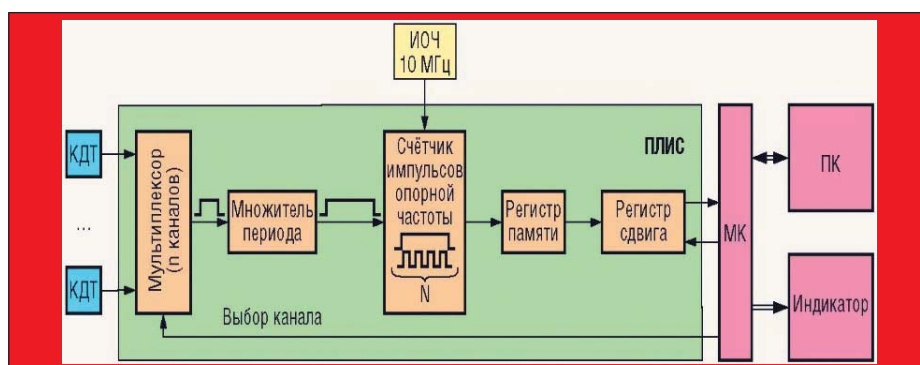


Рис. 1. Структурная схема измерительной системы: КДТ — кварцевый датчик температуры; ИОЧ — эталонный источник опорной частоты 10 МГц; ПЛИС — программируемая логическая интегральная схема; МК — микроконтроллер; ПК — IBM-совместимый персональный компьютер

торов. Измерение температуры с малой погрешностью может быть выполнено, если градуировочная характеристика преобразователя определена с высокой точностью. Микропроцессор пересчитывает значение частоты, поступающее с кварцевого преобразователя, в значение температуры по индивидуальной градуировочной характеристике.

В качестве датчика температуры можно применить различные кварцевые преобразователи температуры (например, ПТК-01), обеспечивающие прецизионное измерение температуры. Вышеуказанный датчик позволяет измерять температуру в диапазоне -30...+100 °C с точностью 0,05 °C.

Пьезокварцевый термометр состоит из трех основных узлов: чувствительного элемента (кварцевый преобразователь температуры с частотным выходом производства ООО «СКТБ ЭлПА»), частотного преобразователя (сформирован на ПЛИС MAX7000S фирмы Altera) и специального вычислителя (микроконтроллер ATmega8515 фирмы Atmel). Структурная схема измерительного устройства представлена на рис. 1.

Подсчет частоты, поступающей с кварцевых преобразователей, производится с помо-

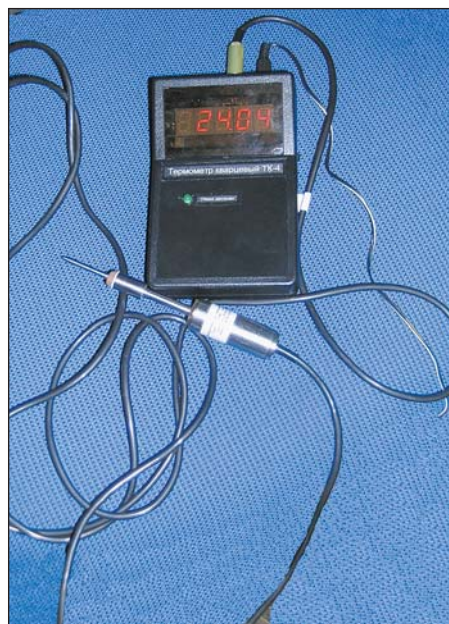


Рис. 2. Внешний вид термометра с кварцевым датчиком температуры

щью 27-разрядного счетчика, реализованного в ПЛИС. Там же размещены мультиплексоры и сдвиговый регистр. Микроконтроллер управляет процессом измерения, осуществляет связь с ПК, производит математические вычисления и управляет индикацией. ПК с помощью специального интерфейса осуществляет сбор, накопление и статистическую обработку результатов измерения. Счетчики считают импульсы опорной и измеряемой частоты для получения требуемого интервала измерения. Мультиплексор используется для выбора входного канала. Измерение частоты производится с разрешающей способностью  $\pm 1$  младший значащий бит (0,004 Гц). Далее по индивидуальной градуировочной характеристике производится пересчет значения частоты, поступающего с кварцевого преобразователя, в значение температуры. В качестве аппроксимирующей кривой использован полином третьей степени. Коэффициенты полинома для пересчета хранятся в энергонезависимой памяти и могут быть перепрограммированы через интерфейс пользователя.

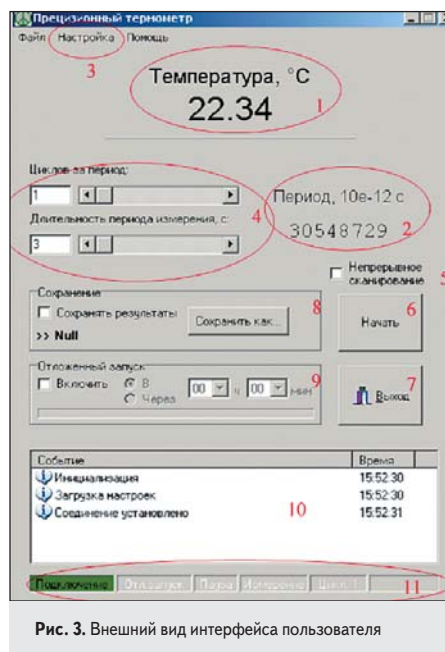


Рис. 3. Внешний вид интерфейса пользователя

Вычисленное значение температуры выводится на пятизначный цифровой 7-сегментный индикатор с дискретностью 0,1 °C (рис. 2). Показанный термометр измеряет температуру в пределах от -30 до +100 °C, но этот диапазон может быть легко расширен применением кварцевого преобразователя с более широким температурным диапазоном (кварцевые резонаторы имеют верхний и нижний пределы рабочей температуры соответственно +260 и -60 °C). Прецизионный цифровой термометр работает как в автономном режиме, так и под управлением ПК. Структура цифрового термометра позволяет обеспечить последовательную обработку нескольких каналов. Можно осуществить передачу частоты с преобразователей температуры на расстоянии до нескольких сотен метров и использовать цифровой термометр как многоканальную систему контроля температуры.

Программная оболочка осуществляет управление сбором данных, вычислением значения температуры и визуализацией. Погрешность измерения температуры с помощью ПК определяется примененным преобразователем температуры (порядка 0,06 °C). Внешний

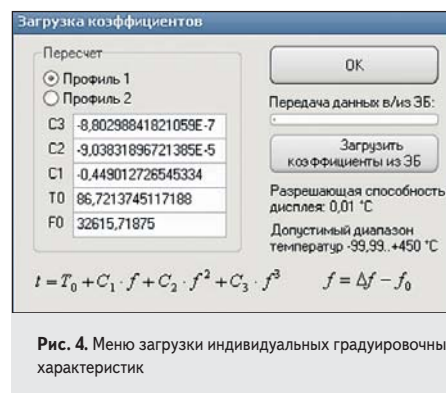


Рис. 4. Меню загрузки индивидуальных градуировочных характеристик

вид интерфейса пользователя представлен на рис. 3.

В интерфейсе учтены особенности использования данного цифрового термометра в качестве элемента измерительной системы. Так, в нем реализована возможность однократного измерения выбранных каналов, непрерывное сканирование, сканирование каналов заданное число раз, опрос каналов через заданный интервал времени, а также возможность отложенного запуска измерения. Все данные возможности востребованы при контроле температуры в различных технологических процессах. Результаты измерений сохраняются в ПК, и можно произвести их статистическую обработку в любое время.

Через интерфейс пользователя производится вычисление и загрузка индивидуальных градуировочных характеристик кварцевого датчика температуры (рис. 4).

Точность измерения во многом определяется точностью кварцевого преобразователя температуры (вносит наибольшую погрешность), источника опорной частоты и дискретностью отсчета. В качестве источника опорной частоты используется высокостабильный термокомпенсированный генератор на 10 МГц.

Следует отметить, что данный прибор может быть использован также и для точного измерения давления (избыточного и абсолютного от 1 до 600 атм), веса (усилия), влажности (в зависимости от физической величины, на которую реагирует кварцевый резонатор-сенсор).