

Кварцевые преобразователи температуры в системах учета тепла

Александр ПОЛЯКОВ
Михаил ОДИНЦОВ

В настоящее время в системах учета тепла в качестве первичного преобразователя температуры в большинстве используются медные и платиновые термопреобразователи сопротивления (ТС). Но для измерения разности и абсолютного значения температуры в ограниченном диапазоне температур до 120 и до 180 °С применяются и частотные преобразователи, в том числе и кварцевые, у которых по сравнению с ТС отсутствует ряд погрешностей, связанных с передачей и оцифровыванием сигнала. Кроме того, кварцевые частотные преобразователи и весь измерительный канал могут составить конкуренцию по цене аналогам с ТС.

В статье рассмотрены конструкции и погрешности всего измерительного канала, который включает в себя первичный преобразователь температуры — кварцевый термочувствительный резонатор и вторичный преобразователь — микроконтроллерный вычислитель.

Кварцевые пьезоэлектрические резонаторы на протяжении многих лет использования в электронной технике зарекомендовали себя как надежная и недорогая конструкция.

На данный момент низкочастотные (от 30 до 64 кГц) термочувствительные резонаторы выпускают две фирмы — Seiko Epson (Япония) и СКТБ ЭлПА (Россия).

Отечественные низкочастотные термочувствительные резонаторы в корпусах Ø2×6 и Ø3×8 мм производятся по массовой технологии изготовления опорных кварцевых резонаторов камертонного типа и имеют относительную чувствительность порядка 60 ppm/°С, что в два раза больше чувствительности японских аналогов. На данный момент объем выпуска отечественных кварцевых низкочастотных термочувствительных резонаторов РКТВ206 и высокотемпературных модификаций РКТВ206 составляет порядка 40 000 шт. в год, при этом производственные мощности позволяют выпускать порядка 100 000 шт. в месяц.

Термочувствительные резонаторы выпускаются на различные диапазоны рабочих температур:

- РКТВ206 — от –55 до +100 °С;
- РКТВ206А — от –55 до +180 °С;
- РКТВ206Б — от –55 до +260 °С.

Эти резонаторы как чувствительные элементы (ЧЭ) применяются в преобразователях температуры в частоту и в кварцевых преобразователях давления для компенсации дополнительной температурной погрешности.

Разрешающая способность, погрешность, стабильность

У термочувствительного резонатора зависимость изменения частоты от температуры есть параболическая неразрывная функция, обычно аппроксимированная полиномом 2-й или 3-й степени:

$$F = F_0 + A_1(T - T_0) + A_2(T - T_0)^2, \quad (1)$$

$$F = F_0 + A_1(T - T_0) + A_2(T - T_0)^2 + A_3(T - T_0)^3, \quad (2)$$

где F — частота, которую для низкочастотных резонаторов рекомендуется измерять через период(ы); F_0 — частота при температуре, равной T_0 ; T — температура, °С.

Поэтому разрешающая способность ограничена только кратковременной нестабильностью (флуктуацией) автогенератора и используемого для измерения частоты частотомера. По экспериментальным данным достижимая разрешающая способность может быть порядка 0,0005...0,0003 °С.

Основная погрешность, без учета долговременной стабильности, может составлять несколько сотых долей °С и определяется диапазоном рабочих температур и образцовыми приборами, которые используются при калибровке.

Дополнительные погрешности

Преимущество частотных датчиков (и кварцевых в том числе) — отсутствие дополнительной погрешности при передаче ча-

стотного сигнала на большие расстояния без применения специализированных и дорогих проводов и кабелей и малая погрешность вторичного преобразователя (микропроцессорного частотомера).

Долговременная стабильность кварцевых термочувствительных резонаторов — не более 3 ppm за 1-й год и не более 15 ppm за последующие 10 лет. На практике стабильность преобразователей температуры на основе кварцевых резонаторов варьируется от ±0,06 Гц (±0,03 °С) до ±0,2 Гц (±0,1 °С), в зависимости от диапазона действующих температур, а именно от времени работы при температуре, равной или близкой к верхнему пределу.

Конструкции преобразователей на основе кварцевых термочувствительных резонаторов

Применяются две конструкции кварцевых преобразователей температуры (ПТК), которые отличаются автогенераторами и, соответственно, количеством установленных в них резонаторов.

На рис. 1а представлена функциональная схема ПТК1 с одним термочувствительным резонатором — РКТВ206 или РКТВ206 (1), автогенератором (2) с услителем (3), на выходе которого — частотный сигнал. При этом на измерительный вход частотомера поступает частота, близкая к частоте последовательного резонанса термочувствительного резонатора, она может иметь значения

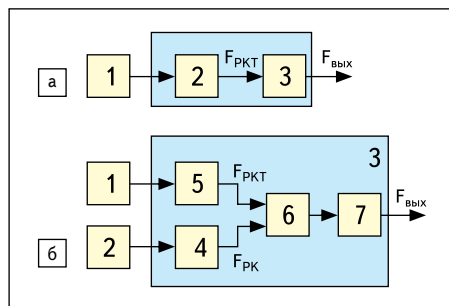


Рис. 1. Функциональная схема кварцевого преобразователя температуры:
а) ПТК1 с одним резонатором, РКТ206 или РКТВ206;
б) ПТК2 с подобранной парой резонаторов: РКТ206 и РК206 или РКТВ206 и РКОВ206

от 32 до 64 кГц, в зависимости от модели резонатора и его настройки.

На рис. 1б представлена функциональная схема ПТК2 с подобранной парой резонаторов — РКТ206 и РК206 или РКТВ206 и РКОВ206 (1, 2), автогенератор биения частот (3), который состоит из двух автогенераторов на собственную частоту (4, 5) и смесителя (6). На выходе усилителя (7) генератора — разностный частотный сигнал. При этом на измерительный вход частотомера поступает частота, равная разнице частот последовательного резонанса термочувствительного резонатора и опорного, она может иметь значения от 0,3 до 3,5 кГц, в зависимости от частот подобранных в пару резонаторов. На рис. 2 представлены типовые термочувствительные характеристики (ТЧХ) опорного и термочувствительного резонатора.

ПТК2 с подобранной парой резонаторов

Пары термочувствительного и опорного резонаторов подбираются обычно при комнатной температуре, таким образом, чтобы частота опорного резонатора была выше частоты термочувствительного резонатора на 300–500 Гц. При этом если предполагается работа преобразователя в области низких температур, то разность частот опорного и термочувствительного резонаторов при комнатной температуре должна быть близкой к 500 Гц.

Оба резонатора (термочувствительный и опорный) располагаются как можно ближе друг к другу, соответственно, при калибровке и последующей эксплуатации преобразователя фиксируется разность их частот. В случае возникновения температурного градиента между резонаторами может иметь место дополнительная погрешность.

Преимущества и недостатки

Основным преимуществом ПТК2 (с подобранной парой резонаторов) в сравнении с ПТК1 является низкая выходная частота, которая на порядок ниже собственной частоты резонаторов. Это позволяет упростить схему частотомера, а именно применить в качестве частотомера опорный высокочастотный (ВЧ) резонатор АТ-среза со стандартной ТЧХ.

Пример. При измерении выходного сигнала ПТК2, равного 1 кГц, частотомером с ВЧ-резонатором, ТЧХ которого в диапазоне температур $-40...+60$ °C равна ± 30 ppm, погреш-

ность составит $\pm 0,03$ Гц (то есть $\pm 0,015$ °C при чувствительности 2 Гц/°C).

Недостатки ПТК2 в сравнении с ПТК1 (с одним резонатором):

- Увеличенная кратковременная нестабильность (флуктуация).
- Меньшая надежность, так как применяется 2 резонатора, и более сложная схема автогенератора биения частот.
- Увеличенные габаритные размеры щупа и корпуса под автогенератор.
- Нормирование характеристики по большому количеству точек (от четырех и более).
- Более высокая стоимость.

ПТК2 с подобранной парой резонаторов применяется для измерения абсолютного значения температур, при работе схемы частотомера в широком диапазоне температур без возможности ввода температурной поправки (компенсации ТЧХ) для ВЧ опорного резонатора.

ПТК1 с одним резонатором

Преимуществом ПТК1 в сравнении с ПТК2 является простота конструкции и надежность. Использование одного термочувствительного резонатора (РКТ206 или РКОВ206 в корпусе 2×6 мм) позволяет уменьшить размеры измерительного щупа. Это позволяет с высокой точностью измерять температуру в трубах малого диаметра, что является определяющим параметром для домовых и поквартирных систем учета тепла. Благодаря простой и малогабаритной схеме, автогенератор можно расположить непосредственно в измеритель-

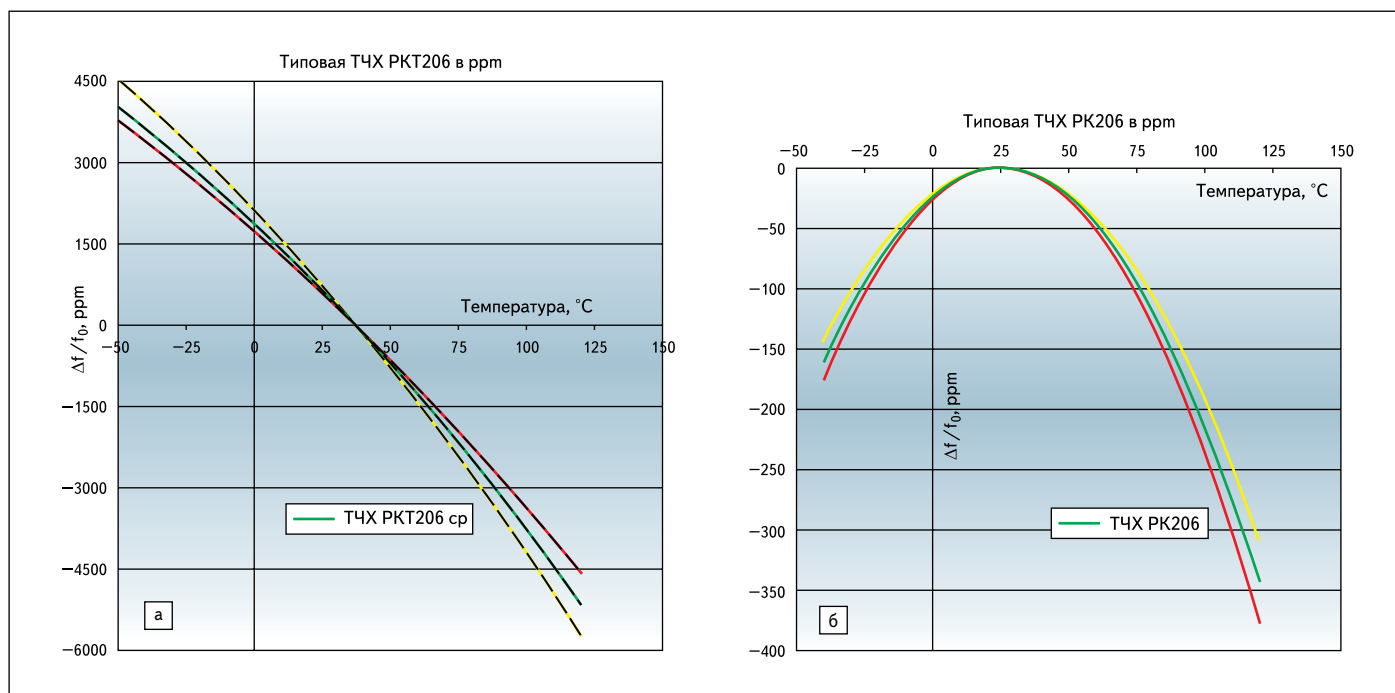


Рис. 2. ТЧХ опорного и термочувствительного резонаторов, производимых СКТБ ЭлПА:
а) ТЧХ термочувствительного резонатора (экстремум на температуре около $T = -280$ °C); б) ТЧХ опорного резонатора (экстремум на температуре около $T = 25$ °C)

ном щупе или головке малого размера. Наименьшая кратковременная нестабильность (флуктуация) автогенератора позволяет получить лучшую разрешающую способность по сравнению с ПТК2. Есть возможность нормирования характеристики по трем или двум точкам. Все это обеспечивает более низкую стоимость преобразователя и всего измерительного канала.

Недостаток — высокие требования по стабильности опорной частоты измерительного частотомера.

Пример. При измерении выходного сигнала ПТК1, равного 32 кГц, частотомером с ВЧ-резонатором, ТЧХ которого в диапазоне температур $-40...+60$ °С равна ± 30 ppm, погрешность составит $\pm 0,96$ Гц (то есть $\pm 0,48$ °С при чувствительности 2 Гц/°С). Соответственно, для получения погрешности измерения частоты с ПТК1 не более 0,09 Гц (что составит $\pm 0,04$ °С при чувствительности 2 Гц/°С) требуется стабильность частоты ВЧ-резонатора во всем диапазоне рабочих температур не более ± 3 ppm.

ПТК1 с одним резонатором может применяться для измерения абсолютной температуры, при работе схемы частотомера в узком диапазоне температур или при наличии возможности ввода температурной поправки (компенсации ТЧХ) для опорного ВЧ-резонатора. ПТК1 целесообразно применять для измерения абсолютной температуры при условии мультиплексирования, то есть измерения одним частотомером частоты с ПТК1 в количестве более 3–5 шт.

Пример. При измерении частотного выходного сигнала с пяти ПТК1 одним частотомером, в котором для задания частоты установлен генератор с термокомпенсацией (ГТК), стоимость ГТК¹ делится на количество опрашиваемых ПТК1.

Пара ПТК1 (или большее их количество) может успешно применяться для измерения разности температур с высокой точностью и разрешающей способностью частотомером с ВЧ-резонатором, со стандартной ТЧХ². Но при этом погрешность измерения абсолютной температуры (имеется в виду канал измерения без учета метрологических характеристик самого ПТК) может достигать, в зависимости от температуры среды, в которой работает частотомер и ТЧХ ВЧ-резонатора, от $\pm 0,1$ до $\pm 0,5$ °С.

Измерение разности и абсолютного значения температур преобразователем ПТК1 и частотомером с ВЧ-резонатором (с типовой ТЧХ), без температурной компенсации частоты

Для систем учета тепла наиболее остро стоит задача измерения с высокой точностью и разрешающей способностью разности температур ($T_{\text{входа}} - T_{\text{выхода}}$). На основе тер-

мочувствительных резонаторов в 2006 году ООО «СКТБ ЭлПА» и ЗАО ПГ «Метран» были разработаны преобразователи температуры для труб малого диаметра, и ЗАО ПГ «Метран» была разработана система поквартного учета тепла.

Далее приведен расчет погрешности всего измерительного канала, то есть учитываются погрешности самого ПТК (средства измерения) и погрешности измерительного канала (частотомера).

Погрешность измерения разности температур α_{Δ} двумя ПТК с автогенераторами собственной частоты, при условии, что схема измерения частоты одна и преобразователи калибровались в одном цикле, определяются:

- α_{TP} — градиентом температуры в термостате при калибровке ($\pm 0,01...0,02$ °С);
 - α_M — погрешностью метода измерения частоты не более $\pm MЗР = (\pm 0,000025\%$ измеряемой частоты) = ($\pm 0,0082$ Гц, при частоте 32700 Гц) = ($\pm 0,0041$ °С);
 - α_{H1} — кратковременной нестабильностью автогенератора ПТК, усредненной в интервале измерения частоты не менее 0,5 с, не более $\pm 0,5$ ppm = ($\pm 0,015$ Гц) = ($\pm 0,007$ °С);
 - α_{H2} — кратковременной нестабильностью автогенератора ВЧ-резонатора МК, усредненной в интервале измерения частоты не менее 0,5 с, не более ± 1 ppm = ($\pm 0,03$ Гц) = ($\pm 0,015$ °С).
- Итого не более:

$$\alpha_{1\Delta} = \sqrt{\alpha_{TP}^2 + \alpha_M^2 + 2 \times \alpha_{H1}^2 + \alpha_{H2}^2} = \sqrt{0,02^2 + 0,0041^2 + 2 \times 0,007^2 + 0,015^2} = \pm 0,0272 \text{ °С}, \quad (3)$$

- $\alpha_{ДН1}$ — долговременной нестабильностью³ резонатора РКТ206 (РКТВ206) не более ± 3 ppm = ($\pm 0,1$ Гц) = ($\pm 0,05$) °С за год.

Итого погрешность измерения разности температур с учетом старения резонаторов РКТ206 (долговременная нестабильность) α_{Δ} не более:

$$\alpha_{\Delta} = \alpha_{1\Delta} + \sqrt{2 \times \alpha_{ДН1}^2} = 0,0272 + \sqrt{2 \times 0,05^2} = \pm 0,098 \text{ °С за 1 год},$$

$$\alpha_{\Delta} = 0,098 + \sqrt{2 \times 0,05^2} = \pm 0,168 \text{ °С за 2 года}. \quad (4)$$

Погрешность измерения абсолютной температуры определяется:

- α_K — погрешностью калибровки (при использовании эталонного термометра ППС

2-го класса в жидкостном термостате типа ТВП-6) $\pm 0,03$ °С; α_M ; α_{H1} ; α_{H2} ;

- α_T — погрешностью, обусловленной изменением частоты опорного ВЧ-резонатора в рабочем диапазоне температур схемы частотомера⁴ (при измерении частоты 32,7 кГц) $\pm 0,5$ Гц = ($\pm 0,25$ °С).

Итого не более:

$$\alpha_1 = \pm \sqrt{\alpha_{TP}^2 + \alpha_M^2 + \alpha_{H1}^2 + \alpha_{H2}^2 + \alpha_K^2 + \alpha_T} = \pm \sqrt{0,02^2 + 0,0041^2 + 0,007^2 + 0,03^2 + 0,25} = \pm 0,287 \text{ °С} \approx 0,3 \text{ °С}. \quad (5)$$

Погрешность измерения абсолютной температуры с учетом долговременной нестабильности:

- $\alpha_{ДН1}$ и $\alpha_{ДН2}$ — долговременной нестабильностью ВЧ-резонатора в схеме частотомера для тактирования МК не более ± 3 ppm = ($\pm 0,1$ Гц при измерении частоты 32,7 кГц) = ($\pm 0,05$) °С за 1 год.

Итого погрешность измерения абсолютного значения температур с учетом старения (нестабильности) резонаторов РКТ206 и ВЧ-резонатора (стабильности) α , не более:

$$\alpha = \pm (\alpha_1 + \sqrt{\alpha_{ДН1}^2 + \alpha_{ДН2}^2}) = \pm (0,3 + \sqrt{0,05^2 + 0,05^2}) = \pm 0,37 \text{ °С за 1 год},$$

$$\alpha = \pm (0,37 + \sqrt{0,05^2 + 0,05^2}) = \pm 0,44 \text{ °С за 2 года}. \quad (6)$$

При этом разрешающая способность остается на уровне $\pm 0,003...0,005$ °С, при применении компенсации ТЧХ ВЧ-резонатора (с точностью ± 2 ppm), достижимая погрешность измерения абсолютной температуры не более:

- $\alpha = \pm 0,14$ °С за 1 год;
- $\alpha = \pm 0,2$ °С за 2 года.

Кварцевые термочувствительные резонаторы и преобразователи температуры на их основе по метрологическим характеристикам приближаются к платиновым ТС по разрешающей способности и даже могут превосходить их. Стоимость резонаторов находится на уровне стоимости полупроводниковых датчиков температуры. Частотный выход преобразователей температуры и возможность подключения термочувствительного резонатора непосредственно к внутреннему генератору микроконтроллера существенно упрощает работу с ними. Все это делает привлекательным их использование как первичного преобразователя, но в ограниченном диапазоне температур — до 120 °С и до 180 °С. ■

¹ Стоимость ГТК — от 900 до 2000 руб.

² Стоимость ВЧ-резонатора на частоты 4–10 МГц; с ТЧХ ± 0 ppm в диапазоне температур от -40 до $+60$ °С около 30 руб./шт.; с ТЧХ ± 15 ppm в диапазоне температур от -30 до $+60$ °С — около 50 руб./шт.

³ Дополнительная погрешность, вызванная долговременной нестабильностью (старением), присутствует с не меньшим значением в конструкции ПТК2 (с подобранной парой термочувствительного и опорного резонаторов).

⁴ Отклонение номинальной частоты опорного ВЧ-резонатора, применяемого для тактирования МК, при предварительной сортировке может составлять в диапазоне от -40 до $+60(85)$ °С не более ± 15 ppm.