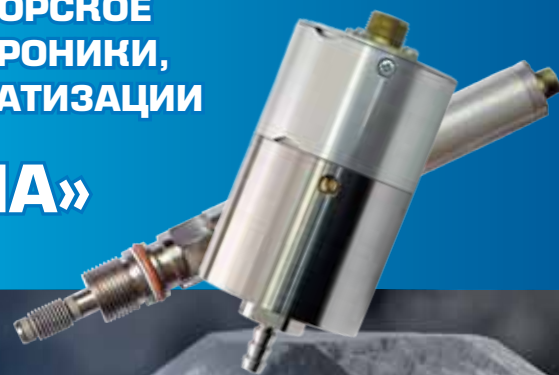




СПЕЦИАЛЬНОЕ КОНСТРУКТОРСКОЕ  
ТЕХНИЧЕСКОЕ БЮРО ЭЛЕКТРОНИКИ,  
ПРИБОРОСТРОЕНИЯ И АВТОМАТИЗАЦИИ

ООО «СКТБ ЭлПА»



# ДАТЧИКИ ДЛЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

## ДАВЛЕНИЕ

Разрешающая способность – 0,0005% ВПИ

Погрешность – 0,025% ВПИ

Диапазон давлений от 0 до 120 МПа

Диапазон рабочих температур от -60 до +250 °C

## ТЕМПЕРАТУРА

Разрешающая способность – 0,003 °C

Погрешность – 0,05 °C

Диапазон измеряемых температур от -196 до +320 °C

- Высокая долговременная стабильность
- Частотный или цифровой выходной сигнал
- Низкое энергопотребление
- Низкая стоимость по сравнению с зарубежными аналогами
- Радиационная стойкость



ООО «СКТБ ЭлПА»

152613, Ярославская обл., г. Углич, Рыбинское шоссе, 20-Б

тел./факс: (48532) 5-46-74, 5-33-53

e-mail: info@sktbelpa.ru

http://sktbelpa.ru

# Высокостабильные прецизионные кварцевые первичные преобразователи температуры



В статье описано устройство первичных преобразователей температуры ППТК-01 с пьезорезонансными кварцевыми чувствительными элементами, приведены их точностные характеристики. Показано, что кварцевые чувствительные элементы обладают высокой долговременной стабильностью, высокой разрешающей способностью и малыми габаритными размерами, что позволяет использовать их для самого широкого круга задач.

ООО «СКТБ ЭлПА», г. Углич

## Описание решения

В 2012 году ООО «СКТБ ЭлПА» (г. Углич) совместно с холдингом «Теплоком» (г. Санкт-Петербург) разработали кварцевые первичные преобразователи температуры ППТК-01 для измерения температуры теплоносителя с высокой разрешающей способностью и точностью для системы поквартирного учета тепла.

В качестве чувствительного элемента (ЧЭ) был выбран кварцевый пьезоэлектрический термочувствительный резонатор РКТ206, использование которого позволило реализовать многоканальное высокоточное измерение частоты по беспроводной связи. В цилиндрическом корпусе резонатора РКТ206 Ø 2 × 6 мм установлен низкочастотный пьезоэлемент изгибных колебаний камертонного типа (рис. 1) с чувствительностью к изменению температуры 59 ppm/°C. На ветки пьезоэлемента методом терморезистивного вакуумного напыления нанесена электродная система,

которая используется как для возбуждения механических резонансных колебаний веток камертона, так и для съема знакопеременного частотного электрического сигнала.

Кварцевый пьезоэлектрический термочувствительный резонатор обладает высокой разрешающей способностью на уровне 0,0005 °C, которая ограничивается шумами схемы автогенератора и разрешающей способностью частотомера, высокой долговременной стабильностью кварца и низким энергопотреблением (единицы мкА), что является определяющим для системы коммерческого учета.

Преобразователь ППТК-01, представленный на рис. 2, состоит из прочного латунного корпуса, внутри которого размещены РКТ206 и электронная плата автогенератора (рис. 3). Коэффициенты функции преобразования хранятся в энергонезависимой памяти самого преобразователя.

Для определения долговременной стабильности преобразователя

ППТК-01 были проведены многодневные испытания, цель которых состояла в оценке изменения точностных характеристик преобразователя, находящегося при температуре, близкой к верхней границе диапазона измерения (около плюс 85 °C), без подключения к источнику питания.

Для проведения испытаний использовано следующее оборудование: термостат жидкостный ТВП-6 (теплоноситель — вода), платиновый термометр ПТСВ-4-2 с эталонным первичным прецизионным измерителем температуры МИТ8.03, сушильный шкаф с установленной температурой плюс 85 °C, система градуировки и калибровки преобразователей ППТК-01, разработанная холдингом «Теплоком».

На первом этапе испытаний была проведена градуировка преобразователей ППТК-01 по четырем температурным точкам. Значения показаний эталонного платинового термометра ПТСВ-4-2: +22,421 °C; +45,283 °C;



Рис. 1. Пьезоэлемент камертонного типа



Рис. 2. Преобразователь ППТК-01

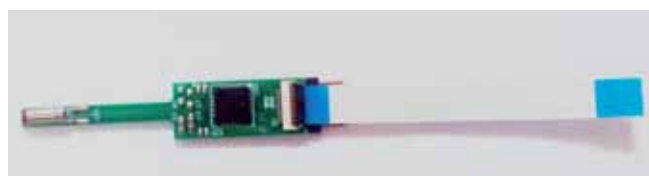


Рис. 3. Резонатор РКТ206 с электронной платой автогенератора

Таблица 1. Результаты первичной калибровки преобразователей

Эталон T, °C	№ 0	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6
54,922	54,924	54,957	54,924	54,926	54,934	54,93	54,937
	0,002	0,035	0,002	0,004	0,012	0,008	0,015
Эталон T, °C	№ 7	№ 8	№ 9	№ 10	№ 12	№ 13	№ 14
54,922	54,936	54,927	54,933	54,932	54,931	54,93	54,921
	0,014	0,005	0,011	0,01	0,009	0,008	-0,001
Эталон T, °C	№ 15	№ 16	№ 17	№ 18	№ 19	№ 20	№ 21
54,922	54,926	54,924	54,928	54,926	54,928	54,925	54,928
	0,004	0,002	0,006	0,004	0,006	0,003	0,006
Эталон T, °C	№ 22	№ 23	№ 24	№ 25	№ 26	№ 27	№ 28
54,922	54,936	54,922	54,929	54,93	54,939	54,933	54,927
	0,014	0	0,007	0,008	0,017	0,011	0,005

Таблица 2. Результат калибровки после 38 800 часов (в °C)

Эталон T, °C	Преобразователи по номерам					
	№ 2	№ 3	№ 6	№ 7	№ 10	№ 15
20,54	20,528	20,584	20,48	20,398	20,437	20,553
40,48	40,45	40,512	40,421	40,315	40,365	40,472
70,30	70,26	70,315	70,25	70,116	70,185	70,255
86,86	86,8	86,852	86,808	86,666	86,732	86,748
Эталон T, °C	Преобразователи по номерам					
	№ 20	№ 22	№ 24	№ 25	№ 27	№ 28
20,54	20,452	20,514	20,555	20,5	20,502	20,506
40,478	40,377	40,427	40,497	40,409	40,421	40,421
70,30	70,201	70,241	70,274	70,198	70,221	70,236
86,86	86,754	86,741	86,837	86,755	86,760	86,766

+70,287 °C; +90,244 °C. Полученные по результатам градуировки значения коэффициентов функции преобразования были записаны в энергонезависимую память преобразователей. Результаты последующей первичной калибровки преобразователей на температуре +54,922 °C (здесь и в дальнейшем по показаниям

эталонного платинового термометра ПТСПВ-4-2) приведены в табл. 1. Как видно из результатов, для всех преобразователей погрешность не превышает  $\pm 0,05$  °C.

На следующем этапе испытаний отградуированные преобразователи помещались в сушильный шкаф с установленной температурой

плюс 85 °C и периодически извлекались для проведения калибровки в четырех-пяти температурных точках. Всего было проведено 6 калибровок с выдержкой в сушильном шкафу в течение 2300, 4000, 7000, 10000, 19000 и 38800 часов.

В целях сокращения объема статьи в табл. 2 приводятся результаты последней калибровки первичных преобразователей температуры кварцевых ППТК-01, после 38800 часов пребывания при температуре плюс 85 °C (дата: 26.12.2018).

Результаты калибровок в виде оценок абсолютной погрешности измерения отражены в табл. 3.

Приведенные в этой таблице гистограммы позволяют судить о характере изменения погрешности на каждой из температурных точек, выбранных для калибровки, с течением времени пребывания каждого из преобразователей под воздействием температуры плюс 85 °C.

Для отдельно взятого преобразователя, например № 20, характер изменения погрешности для каждой из точек калибровки иллюстрируют графики на рис. 4.

#### Выводы

Выдержка кварцевых преобразователей температуры ППТК-01 при повышенной температуре плюс 85 °C в течение 38800 часов (53 месяца), при средней продолжительности отопительного сезона 7,5 месяцев позволила смоделировать работу преобразователей в течение 7 лет при максимальной температуре теплоносителя отопительной системы. При этом из выборки N = 12 шт. максимальная погрешность измерения температуры составила 0,196 °C, среднее

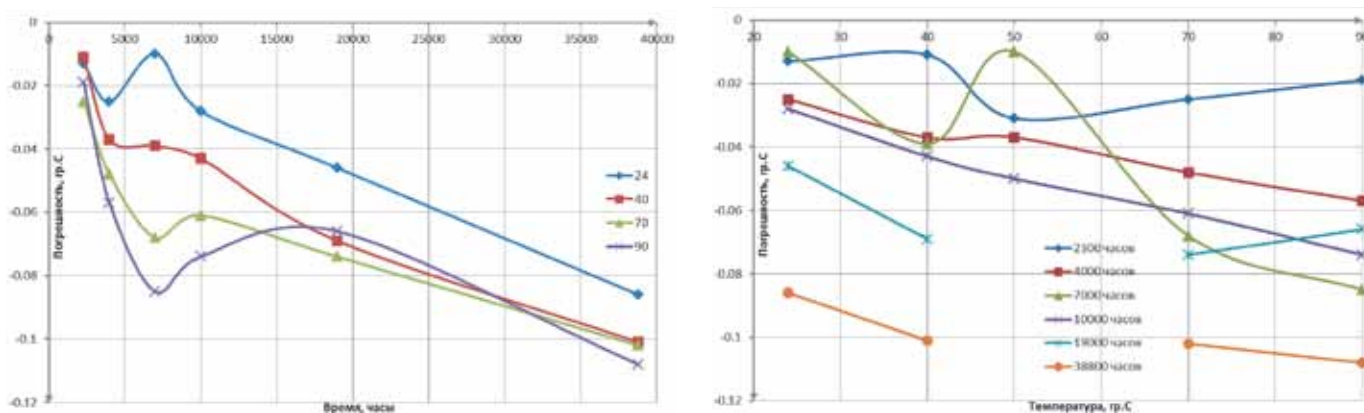


Рис. 4. Иллюстрация характера изменения погрешности преобразователя ППТК-01 № 20

Таблица 3. Результаты калибровок преобразователей ППТК-01

Установка, °С	Отклонение температуры от эталона, °С												Примечание
	№2	№3	№6	№7	№10	№15	№20	№22	№24	№25	№27	№28	
24	0.010	-0.016	0.003	0.002	-0.004	0.002	-0.013	-0.013	0.005	0.016	-0.001	-0.014	2300 часов
	0.007	-0.019	0.000	-0.002	-0.007	-0.001	-0.025	-0.025	0.006	0.008	-0.013	-0.036	4000 часов
	0.027	-0.018	0.005	-0.009	0.003	0.018	-0.010	-0.019	0.026	0.019	-0.007	-0.034	7000 часов
	0.018	0.005	0.001	-0.031	0.016	0.022	-0.028	-0.019	0.026	0.005	-0.007	-0.043	10000 часов
	0.023	0.037	-0.011	-0.011	-0.024	0.016	-0.046	-0.017	0.025	-0.004	-0.042	-0.022	19000 часов (при T = 20 °С)
	-0.010	0.046	-0.058	-0.140	-0.101	0.015	-0.086	-0.024	0.017	-0.038	-0.036	-0.032	38800 часов (при T = 20 °С)
40	0.002	-0.013	0.007	0.004	-0.001	0.003	-0.011	-0.012	0.004	0.013	-0.001	-0.023	2300 часов
	-0.006	-0.030	-0.015	-0.015	-0.019	-0.012	-0.037	-0.041	0.000	-0.008	-0.027	-0.048	4000 часов
	0.005	-0.015	0.069	-0.030	-0.012	-0.005	-0.039	-0.034	0.011	-0.010	-0.029	-0.050	7000 часов
	0.005	-0.011	-0.009	-0.048	-0.021	0.003	-0.043	-0.035	0.015	-0.014	-0.042	-0.038	10000 часов
	-0.006	0.020	-0.023	-0.023	-0.042	-0.001	-0.069	-0.039	0.013	-0.033	-0.062	-0.045	19000 часов
	-0.028	0.034	-0.057	-0.163	-0.113	-0.006	-0.101	-0.051	0.019	-0.069	-0.057	-0.057	38800 часов
50	0.002	-0.015	0.008	-0.002	-0.009	-0.002	-0.031	-0.015	0.003	0.001	-0.005	-0.022	2300 часов
	-0.006	-0.028	-0.006	-0.022	-0.018	-0.013	-0.037	-0.040	0.002	-0.011	-0.026	-0.043	4000 часов
	0.027	-0.018	0.005	-0.009	0.003	0.018	-0.010	-0.019	0.026	0.019	-0.007	-0.034	7000 часов
	0.005	-0.008	-0.007	-0.052	-0.019	0.003	-0.050	-0.033	0.013	-0.021	-0.040	-0.053	10000 часов
													19000 часов (точка пропущена)
													38800 часов (точка пропущена)
70	-0.009	-0.031	-0.002	-0.016	-0.025	-0.020	-0.025	-0.036	-0.009	-0.012	-0.016	-0.028	2300 часов
	-0.015	-0.042	-0.018	-0.042	-0.036	-0.034	-0.048	-0.055	-0.015	-0.031	-0.043	-0.051	4000 часов
	-0.016	-0.035	0.048	-0.066	-0.037	-0.027	-0.068	-0.055	-0.036	-0.043	-0.055	-0.063	7000 часов
	-0.009	-0.024	-0.019	-0.074	-0.037	-0.019	-0.061	-0.060	-0.005	-0.044	-0.056	-0.064	10000 часов
	-0.009	0.011	-0.021	-0.021	-0.047	-0.023	-0.074	-0.051	-0.017	-0.051	-0.063	-0.048	19000 часов
	-0.043	0.012	-0.053	-0.187	-0.118	-0.048	-0.102	-0.062	-0.029	-0.105	-0.082	-0.067	38800 часов
90	-0.011	-0.031	0.004	-0.026	-0.016	-0.023	-0.019	-0.024	-0.001	0.001	-0.035	-0.035	2300 часов
	-0.030	-0.072	-0.034	-0.040	-0.035	-0.047	-0.057	-0.054	-0.046	0.004	-0.069	-0.064	4000 часов
	-0.091	-0.114	-0.113	-0.137	-0.070	-0.123	-0.085	-0.104	-0.092	-0.115	-0.104	-0.121	7000 часов
	-0.039	-0.051	-0.039	-0.086	-0.059	-0.034	-0.074	-0.067	-0.037	-0.056	-0.089	-0.088	10000 часов
	-0.030	0.012	0.008	-0.142	-0.040	-0.059	-0.066	-0.087	0.001	-0.069	-0.079	-0.052	19000 часов
	-0.062	-0.010	-0.054	-0.196	-0.130	-0.114	-0.108	-0.121	-0.025	-0.107	-0.102	-0.096	38800 часов

значение  $-0,031$  °С, СКО =  $0,0385$  °С, уход ноля резонаторов происходит в одну сторону, соответственно разность показаний между соседними преобразователями в среднем не превышает  $\pm 0,042$  °С, что подтверждает долговременную стабильность кварцевых пьезоэлектрических термочув-

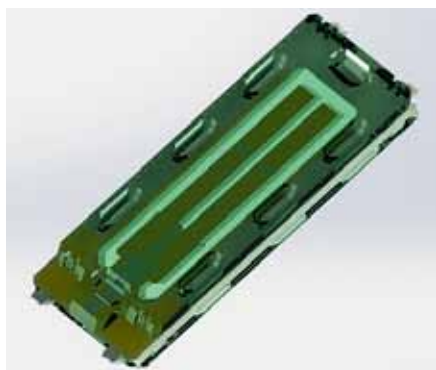


Рис. 5. Внешний вид рамочного термочувствительного резонатора РКТР

ствительных резонаторов РКТ206 на уровне пленочных платиновых терморезисторов и более высокую разрешающую способность.

В 2019 году ООО «СКТБ ЭлПА» освоено выпуск нового высокотемпературного рамочного термочувствительного резонатора в корпусе размером  $2,5 \times 6,2 \times 0,6$  мм, для SMD-монтажа, внешний вид которого представлен на рис. 5.

Корпус этого термочувствительного резонатора выполнен из монокристаллического кварца того же среза, что и сам камертонный пьезоэлемент. Детали корпуса и пьезоэлемент соединены между собой легкоплавким стеклом, которое обеспечивает вакуумплотное соединение в широком диапазоне температур: от криогенных до  $+300$  °С.

Кварцевые чувствительные элементы обладают высокой радиаци-

онной стойкостью, долговременной стабильностью, за счет частоторезонансной системы возбуждения – высокой разрешающей способностью. Кроме того, тенденция к уменьшению размеров кварцевых резонаторов, производство их групповыми методами по технологии МЭМС делают кварцевые чувствительные элементы и микроэлектронные приборы на их основе перспективными для более широкого применения не только в научно-технологических целях, но и в общепромышленной сфере.

В.Б. Поляков, главный конструктор,  
 А.В. Поляков, директор,  
 Ю.В. Галактионов, к. т. н.,  
 зам. директора по науке,  
 ООО «СКТБ ЭлПА», г. Углич,  
 тел.: +7 (48532) 546-74,  
 e-mail: info@sktbelpa.ru,  
 сайт: www.sktbelpa.ru