

ВИБРОСТЕРЖНЕВЫЕ ЧАСТОТНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ТЕМПЕРАТУРЫ

В статье приведено описание разработанной конструкции вибростержневого частотного датчика температуры. Для заданных геометрических размеров преобразователя оценена чувствительность, девиация датчика. Приведены результаты макетных испытаний инерционности данного типа датчика для различных комбинаций конструктивного исполнения.

Ключевые слова: виб्रो частотный преобразователь, температура, инерция, девиация, чувствительность, погрешность.

O.Yu. OLIYNYK, Yu.K. TARANENKO

State Higher Educational Institution «Ukrainian State Chemical Technology University»

VOLTAGE FREQUENCY TEMPERATURE TRANSFORMERS

The frequency measurement method is characterized by the possibility of transmitting the measuring information over sufficiently large distances without the use of special expensive devices and communication channels, can be used for precision measurement of the parameter. The additional convenience of using the frequency measurement method is due to the presence of advanced software designed for signal processing of frequency sensors (National Instruments LabVIEW, USA).

The article describes the developed design of vibration-rod-frequency temperature sensor, the sensitive element of which is a cantilever bimetallic beam. For the given geometric dimensions of the converter, the sensitivity and deviation of the sensor are estimated. The above calculations of the sensitivity of the temperature converter show that the bimetallic rod, regardless of the stretching of the layers for given geometric dimensions, should give a deviation of about 6% with a temperature drop of 35° C.

The model tests of the temperature sensors of the designed design were performed. In laboratory conditions samples of frequency converters of temperature, made of a two-layer material with different layer resistance, were tested. During the tests, parameters such as initial frequency and quality factor were determined.

According to temperature tests, the stability of readings under steady-state conditions and the output of the transducer to the regime with an insignificant change in air temperature were estimated. There is a significant inertia of the sensors.

The results of tests of prototypes of temperature converters have shown the possibility of a rather accurate measurement provided a slow and smooth temperature change. The expected measurement error under these conditions may be less than $\pm 0,5$ °C.

Key words: vibration frequency converter, temperature, inertia, deviation, sensitivity, measurement error.

Введение

Преобразователи, основанные на частотном принципе измерения чувствительны к различным механическим величинам. Поэтому исходя из задачи измерения, в каждом конкретном случае необходимо разрабатывать конструкцию преобразователя, наиболее чувствительную к одному измеряемому параметру, менее чувствительную ко всем побочным воздействиям [1]. Так, например, для преобразователей механической силы и приводящихся к ней величин такой параметр как температура является нежелательным, дестабилизирующим фактором, вносящим погрешность в измерение.

Преимущества использования частотного метода измерения известны:

- возможность передачи измерительной информации на достаточно большие расстояния без применения специальных дорогостоящих устройств и каналов связи [2];
- возможность применения для дистанционных и бесконтактных способов контроля температуры;
- возможность использования для прецизионных измерений (погрешность 0,1-0,5% от измеряемой величины, или 0,04-0,25% от верхнего предела измерения) [2];
- наличие развитого программного обеспечения предназначенного для обработки сигналов частотных датчиков (National Instruments LabVIEW, США) [3].

В связи с этим, развитие парка частотных датчиков, за счет использования новых материалов, форм чувствительных элементов, технологий производства является очень перспективным направлением в приборостроении.

Анализ последних публикаций и постановка проблемы

В настоящее время большинство используемых конструкций частотных датчиков температуры используют колебательную систему камертонного типа. Подобная система в её простейшем виде была применена в работе [4] для измерения температуры воздуха в пределах $-50^{\circ}\text{C} \div +60^{\circ}\text{C}$. При включении такой системы возбуждения резонатор начинает колебаться как консольная балка типа камертона на собственной резонансной частоте, которая зависит от геометрической формы, сечения, размеров и материала резонатора:

$$f_0 = \frac{a^2}{2pl^2} \sqrt{\left(\frac{EI}{gF} \cdot g\right)}, \quad (1)$$

где $\alpha=1,875$, EI – изгибная жесткость резонатора, E – модуль упругости, F – площадь поперечного сечения,

γ – удельный вес материала резонатора, g – ускорение свободного падения, l – длина консоли.

Изменение температуры приводит к изменениям линейных размеров модуля упругости:

$$\frac{\partial f_0}{\partial t} = -\frac{1}{2}(b - a)f_0, \quad (2)$$

где β , α – коэффициенты модуля упругости и линейного расширения.

Известны также кварцевые термометры, которые используют высококачественные кварцевые резонаторы и основаны на колебаниях сдвига, используются колебания на основной частоте и колебания высших обертонов [5]. Хотя кварцевые резонаторы имеют высокую чувствительность до 2500 Гц на градус, однако их температурные коэффициенты частоты (ТКЧ) невелики – порядка 10^{-4} 1/°C, что при перепаде температуры на 100 °C составит относительное изменение частоты в 1%.

Изменение частоты автоколебаний резонатора при изменении температуры связано только с температурным коэффициентом β модуля упругости материала, из которого изготавливается резонатор [4]. В тоже время многослойные (в частности двухслойная) балки при изменении окружающей температуры испытывают изгиб [6], что в конструкции датчика не учитывалось. Кроме того, одной из важных задач при разработке преобразователя температуры должно быть получение большей девиации частоты [7].

Цель и задачи исследования

Цель данной работы: разработать конструкцию вибростержневого частотного датчика чувствительный элемент которого представляет собой консольную биметаллическую балку. Для достижения поставленной цели в задаче не обходимо решить следующие задачи:

разработать конструкцию вибростержневого датчика, произвести расчет преобразователя температуры с учетом геометрических размеров разработанной конструкции датчика;

оценить чувствительность и девиацию датчика;

произвести макетные испытания для определения реальных характеристик преобразователя.

Используемое оборудование и методы анализа

Разработанный измерительный преобразователь температуры содержит чувствительный к температуре консольный резонатор, размещённый в корпусе, и систему возбуждения автоколебаний.

На рис. 1а показан общий вид преобразователя температуры в разрезе, а на рис. 1б – его поперечное сечение.

Резонатор имеет вид тонкостенного биметаллического стакана 1, на диаметрально противоположных частях которого имеются продольные вырезы 2 с профилем по форме клина. Дно 3 стакана соединено ножкой 4 круглого сечения с основанием 5, выполненным в виде диска с ободком.

Система возбуждения резонатора включает приёмник 6 и возбудитель колебаний 7, представляющие поляризованные электромагниты. Они установлены с противоположных сторон верхней части стакана с зазором относительно его наружной поверхности. Основание резонатора 5 закреплено в корпусе 8, изготовлено из теплоизоляционного материала. Внутренний слой металла 10 стенки стакана имеет коэффициент линейного расширения α_1 больший, чем α_2 наружного слоя 11.

В стакане с зазором относительно внутренней поверхности расположен изготовленный из теплопроводного материала трубчатый тепловод 11, закреплённый на основании посредством пластинчатых стоек. Приёмник и возбудитель колебаний соединены соответственно со входом и выходом электрического усилителя 13.

При включении системы возбуждения резонатор начинает колебаться как консольная балка типа камертона на собственной резонансной частоте, которая, как показывает формула (1), зависит от геометрической формы сечения, размеров и материала резонатора.

При изменении температуры контактной поверхности, которая может быть поверхностью стенки трубы или сосуда, через которые протекает жидкость или газ, изменяется частота колебаний резонатора, являющаяся мерой изменения температуры. Частота колебаний измеряется или регистрируется соответствующим прибором.

Расчёт преобразователя температуры

Начальная частота резонатора, как консольного стержня постоянного прямоугольного сечения может быть рассчитана по формуле (1) или

$$f_0 = 8,65 \cdot 10^5 \frac{h}{l^2}, \quad (3)$$

где h , l – толщина и длина резонатора, размерность их – мм.

На самом деле поперечное сечение резонатора представляет собой часть кольца. Поэтому расчёт по формуле (2) даёт определённое значение частоты.

Момент инерции I будем определять по формуле [8]:

$$I = \frac{h(d-h)^3}{8} \left[a + \sin a \cos a - \frac{2 \sin^2 a}{a} \right], \quad (4)$$

где α – угол, соответствующий четверти всего поперечного сечения.

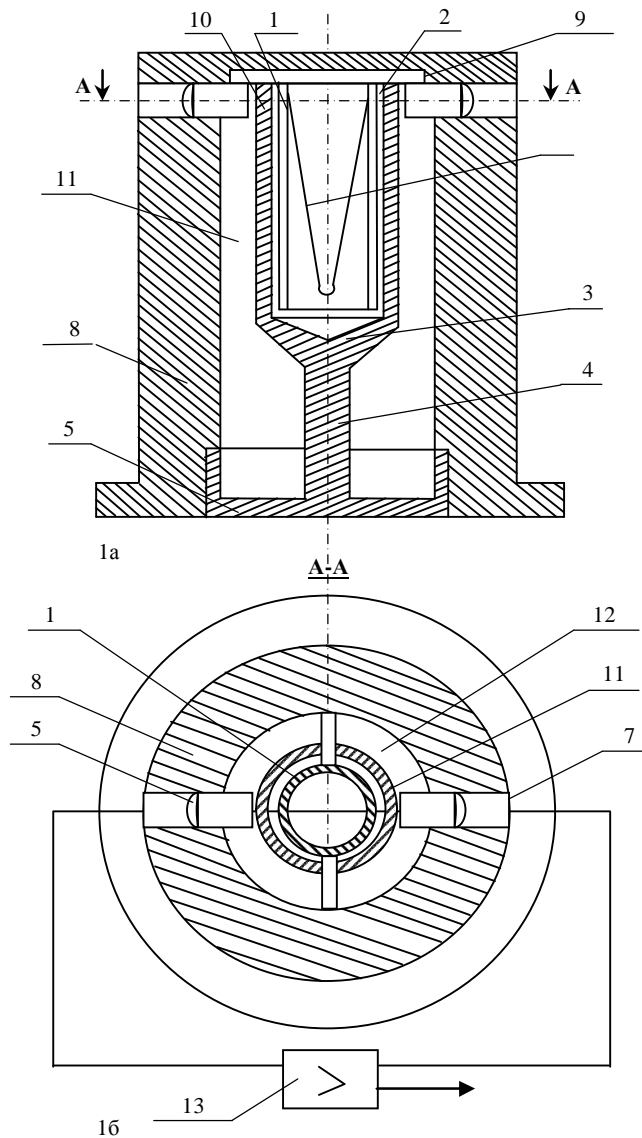


Рис.1 Конструкция вибростержневого частотного датчика температуры:

1- биметаллический стакан, 2- продольные вырезы, 3-дно стакана, 4- ножка круглого сечения, 5- основание резонатора, 6- приемник, 7- возбуждатель колебаний, 8-корпус, 9-крышка, 10-внутренний слой металла стенки с коэффициентом линейного расширения α_1 , 11- наружный слой металла стенки с коэффициентом линейного расширения α_2 , 12- трубчатый тепловод, 13-электрический усилитель.

В выполненных макетных образцах преобразователей $\alpha = 60^\circ$. При этих условиях расчётное значение начальной частоты близко к 3 кГц. Большое значение имеет расчёт чувствительности преобразователя температуры.

Рассмотрим для простоты консольную биметаллическую балку (рис. 2). Пусть для определённости материал нижнего слоя имеет температурный коэффициент линейного расширения α_2 , материал верхнего слоя – α_1 . Причём $\alpha_2 > \alpha_1$. Балка изгибается выпуклостью вниз – нижние продольные волокна удлиняются, верхние укорачиваются. В поперечном сечении нижние волокна сжимаются, верхние растягиваются.

Можно получить выражение для кривизны [8]:

$$\frac{1}{r} = \frac{3}{2} \Delta t \cdot \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{h}, \quad (5)$$

где r – радиус кривизны при изгибе биметаллической балки;
 Δt – перепад температуры;
 α_2, α_1 – коэффициенты линейного расширения нижнего и верхнего слоёв;
 h – толщина балки.

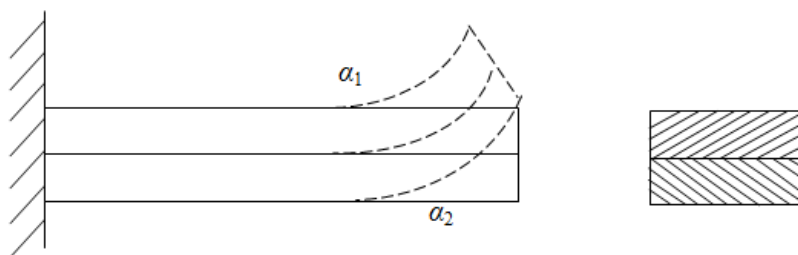


Рис. 2 Консольная биметаллическая балка

Воспользуемся уравнением поперечного изгиба балки

$$y'' = \frac{M}{E\mathfrak{Z}}, \quad (6)$$

где $y'' = \frac{1}{r}$, а выражение в правой части (4) является аналогичным $\frac{M}{E\mathfrak{Z}}$.

Проинтегрируем уравнение (6) дважды, удовлетворяя граничным условиям для консоли:

$$y'|_{x=l} = 0, \quad y|_{x=l} = 0.$$

Получим:

$$y = \frac{Ml^2}{2E\mathfrak{Z}} \cdot \left(\frac{x}{l} - 1 \right)^2.$$

Консольная балка получила продольную деформацию растяжения $\Delta l = \frac{1}{2} \int_0^l y'^2 dx$ (разность между дугой и хордой)

$$\Delta l = \frac{M^2 l^3}{6(E\mathfrak{Z})^2}; \quad \Delta l = \frac{l^3}{6} \left(\frac{2}{3} \Delta t \frac{\Delta a}{h} \right)^2 = \frac{3}{8} \cdot \frac{l^3}{h^2} \cdot \Delta t^2 \cdot \Delta a^2.$$

Примем $l = 27$ мм, $h = 0,5$ мм, $\Delta t = 35^\circ\text{C}$, $\Delta a = 10^{-5}$ 1/град.

Тогда $\Delta l = 3,6 \cdot 10^{-3}$ мм

$$D = \frac{y}{2} = \frac{0,15 \cdot l \cdot \Delta l}{h^2} = 0,056 \left(\frac{l}{h} \right)^4 \cdot (\Delta t \Delta a)^2, \quad \frac{y}{2} = 0,058.$$

Таким образом из приведённого расчёта чувствительности преобразователя температуры следует, что биметаллический стержень независимо от растяжения слоёв при заданных геометрических размерах должен давать девиацию около 6% при перепаде температуры 35°C .

Испытание макетных образцов преобразователя температуры воздуха и воды

Испытаниям подверглось несколько макетных образцов преобразователя температуры, изготовленные из двухслойного материала с различным сопротивлением слоёв. Предварительно определились такие параметры как начальная частота f_0 и добротность Q . Эти данные приведены в таблице 1.

Таблица 1.

№ Макет образца	Материал		f_0 , Гц	Q	ТКЧ	Чувствительность, Гц	Девиация, % (для $\Delta T = 35\%$)
	Внутр. слой	Наруж. слой					
0	нерж	44НХТЮ	2826	1090	-0,31	0,09	0,1
1	нерж	44НХТЮ	2696	1350	-0,2	0,06	0,07
2	35ХГСА	35ХГСА	2898	7250	-1,3	0,39	0,45
3	нерж	44НХТЮ	2261	130	3,0	0,7	1,0
4	нерж	44НХТЮ	2183	280	2,6	0,6	0,9
5	нерж	35ХГСА	2626	640	1,5	0,4	0,52
6	35ХГСА	нерж	3561	2740	-1,3	0,4	0,45

Программа и методика испытаний ставили целью определения ТКЧ, характеризующего ожидаемую девиацию преобразователя [9]. Для испытаний использовался термостат, погрешность установления температуры в его камере составляла $\pm 0,1^\circ\text{C}$. Фиксировались показания преобразователя частотомером в

режиме измерения периода с шестизначным числом знаков.

По данным температурных испытаний оценивались стабильность показаний при установившемся режиме и выход преобразователя на режим при незначительном изменении температуры воздуха.

Для оценки чувствительности показаний преобразователя рассчитывался температурный коэффициент частоты (ТКЧ) χ как показатель относительного изменения частоты на 1°C .

Макетные образцы выдерживались в термостате при крайних плюсовых температурах, составляющих примерно 27 и 50°C . Значение ТКЧ χ определялось по формуле:

$$\chi = \frac{Y_{50} - Y_{27}}{Y_{27} \cdot \Delta T} \quad (7)$$

Значение ТКЧ, определяемое при перепаде температуры в 1°C , несколько отличалось от значения полученного по выражению (7). Это можно пояснить нелинейной зависимостью ТКЧ от температуры (табл.1).

Программа и методика испытаний предусматривала оценку инерционности датчика при резком перепаде температуры. С этой целью преобразователь, находящийся в помещении лаборатории при температуре 24°C , устанавливался в термостат, находящийся в стационарном тепловом режиме, близком к 50°C . График выхода на режим макета преобразователя приведен на рис.3. Заметна значительная инерционность. Для выхода на 70% уровень требуется около 20 минут на 90% уровень – около 40 минут.

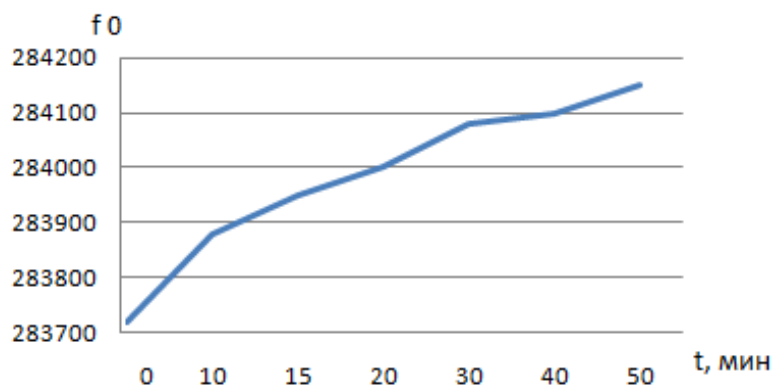


Рис.3 Выход на режим макета преобразователя за время t до резонансной частоты f_0 .

Достижение желаемой девиации частоты (до $5\div 10\%$) оказалось достаточно сложной задачей. Технология изготовления двухслойного стакана-резонатора с заданными размерами по толщине не обеспечивает идентичность характеристики преобразователя. Так например, макетные двухслойные образцы 0, 1, 2, 3 (табл. 1) имеют значения ТКЧ, различающиеся на целый порядок. Наибольшее значение ТКЧ соответствует девиации в 1%.

Выводы

Результаты испытаний макетных образцов преобразователей температуры показали возможность довольно точного измерения при условии медленного и плавного изменения температуры. Ожидаемая погрешность измерения в этих условиях может быть менее $\pm 0,5^\circ\text{C}$. Данные условия эксплуатации полностью соответствуют условиям работы датчиков в высокоинерционных энерготехнологических установках.

Литература

- Нарайкин О.С., Эткин Д.Л. Расчет рабочей характеристики, вибрационно-частотного датчика крутящего момента с оболочечным чувствительным элементом. -М.: Вестник МГТУ. Машиностроение, 1991, N4. - с. 106—114.
- Эткин Л.Г. Виброчастотные датчики. Теория и практика. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. — 408 с.
- LabVIEW: практикум по основам измерительных технологий / Батоврин В.К., Бессонов А.С., Мошкин В.В., Папуловский В.Ф. – М.: ДМК Пресс, 2005. – 208 с
- Boldarev S.T., Gusev R.B., Danilin S.I., Parshin A.Ya. Use of a quartz resonator of the tuning fork type as a thermometer in a dilution refrigerator. Instruments and Experimental Techniques. 2011. T. 54. № 5. С. 740-747.
- Jing Niea, Jia Liuc, Ning Lia, Xiaofeng Meng. Dew point measurement using dual quartz crystal resonator sensor. Sensors and Actuators B: Chemical, – 2017.– Vol. 246.– P. 792–799.
- Oliynyk O. Development of auto-oscillating system of vibration frequency sensors with mechanical resonator [Text] / O. Oliynyk, Yu. Taranenko, A. Shvachka, O. Chorna// Eastern-European journal of enterprise technologies. – 2017. – Vol.85. – P. 56-60.

11. Лопатин С.С., Пфайффер Х. Датчики предельного уровня для жидкостей. Физические принципы работы и возможности вибрационных датчиков // Технические средства автоматизации. – 2004, – № 12. – С.24-29.
12. Босаков С. В. Учет энергии сдвига и инерции вращения при колебаниях элементов конструкций [Текст] / С. В. Босаков, Н. С. Щетько // Mechanics of machines, mechanisms and materials. – 2008. – № 3. – С.63–66.
13. Олейник О.Ю. Испытания вибрационных измерительных преобразователей температуры воздуха и воды / Тараненко Ю.К., Олейник О.Ю. // Теоретичні і прикладні аспекти комп'ютерних наук та інформаційних технологій: Матеріали II міжнародної науково-практичної конференції TACSIT-2017, 12-13 травня 2017 р. / За ред. Скарги-Бандурової І.С. - Сєверодонецьк: Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля, 2017. – С.108-110.

References

1. Naraykin O.S., Etkin D.L. Raschet rabochey kharakteristiki, vibratsionno-chastotnogo .datchika krutyashchego momenta s obolocheynym chuvstvitel'nyim elementom. -M.: Vestnik MGTU. Mashinostroyeniye, 1991, N4. - s. 106-114.
2. Etkin L.G. Vibrochastotnyye datchiki. Teoriya i praktika. - M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, 2004. - 408 s
3. LabVIEW: praktikum po osnovam izmeritel'nykh tekhnologiy / Batovrin V.K., Bessonov A.S., Moshkin V.V., Papulovskiy V.F. - M.: DMK Press, 2005. - 208 s
4. Boldarev S.T., Gusev R.B., Danilin S.I., Parshin A.Ya. Use of a quartz resonator of the tuning fork type as a thermometer in a dilution refrigerator. Instruments and Experimental Techniques. 2011. T. 54. № 5. С. 740-747.
5. Jing Nie, Jia Liuc, Ning Lia, Xiaofeng Meng. Dew point measurement using dual quartz crystal resonator sensor. Sensors and Actuators B: Chemical, – 2017. – Vol. 246, – P. 792–799.
6. Oliynyk O. Development of auto-oscillating system of vibration frequency sensors with mechanical resonator. Eastern-European journal of enterprise technologies. – 2017. – Vol.85. – P. 56-60.
7. Lopatin S.C., Pfayffer KH. Datchiki predel'nogo urovnya dlya zhidkostey. Fizicheskiye printsipy raboty i vozmozhnosti vibratsionnykh datchikov // Tekhnicheskiye sredstva avtomatizatsii.- 2004, - № 12.-S.24-29.
8. Bosakov S. V. Uchet energii sdviga i inertsi vrashcheniya pri kolebaniyakh elementov konstruktora [Tekst] / S. V. Bosakov, N. S. Shchet'ko // Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov. - 2008.- № 3. - S.63-66.
9. Oleynik O.YU. Ispytaniya vibratsionnykh izmeritel'nykh preobrazovateley temperatury vozdukha i vody. Materiali II mizhnarodnoi nauko-praktichnoi konferentsii TACSIT-2017, 2017. - S.108-110.

Отримана/Received : 25.9.2017 р. Надрукована/Printed : 6.10.2017 р.
Стаття рецензована редакційною колегією