

Микрокамертонные кварцевые датчики

Валерий Симонов (Москва)

В статье рассматривается современное состояние одной из ветвей пьезорезонансных измерительных преобразователей на основе кварцевых резонаторов – микрокамертонных датчиков давления, температуры и других параметров. На примерах нескольких реализаций демонстрируются метрологические и функциональные свойства датчиков, приводятся их основные технические и потребительские характеристики – высокая точность, удобство сопряжения с цифровой техникой, универсальность и относительно низкая стоимость.

ВВЕДЕНИЕ

Пьезорезонансные датчики (ПРД) различных физических параметров известны около 50 лет [1]. Однако из-за сложной технологии изготовления до середины 80-х годов они имели высокую себестоимость и применялись для решения задач, требующих высокой точности. Бурное развитие электронных кварцевых часов привело к созданию массовой технологии кварцевых резонаторов, что послужило толчком для развития ПРД и снижения их себестоимости. Заметным шагом в развитии ПРД стал новый чувствительный элемент – микрокамертонный резонатор (МКР) [2]. Низкочастотные кварцевые резонаторы с пьезоэлементом камертонного типа, обладая миниатюрными размерами (длина 3...8 мм, ширина 0,5 мм, толщина 0,125...0,3 мм), идеально подходят для стабилизации частоты в микропроцессорной и портативной аппаратуре, средствах связи и вычислительных устрой-

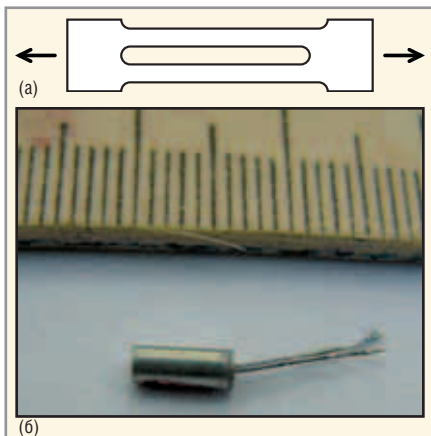


Рис. 1. Тензочувствительный сдвоенный микрокамертон (а) и термочувствительный МКР, установленный в корпус (б)

ствах. Чувствительные элементы (сенсоры) на основе МКР устанавливаются в специальный корпус (рис. 1). Они обладают большой полезной перестройкой частоты (до 10%) и высокой температурной стабильностью. Относительный температурный коэффициент частоты в диапазоне температур $-50...+100^{\circ}\text{C}$ составляет $(-32...-37) \times 10^{-9}$. Это уникальная совокупность характеристик.

Пьезоэлемент термочувствительного МКР имеет форму камертона, а тензочувствительного МКР – форму сдвоенного камертона. Ветви пьезоэлемента МКР совершают изгибные по ширине колебания. Благодаря высокой механической добротности кристаллического кварца, а также камертонообразной форме пьезоэлемента, добротность колебаний составляет от 10^4 до 10^5 . Такая добротность обеспечивает высокую кратковременную и долговременную стабильность резонансной частоты и выходного сигнала датчика. Динамический диапазон датчиков на МКР (отношение верхнего предела измеряемого параметра к порогу реагирования) составляет $10^5...10^7$.

Другое достоинство ПРД связано с высокой воспроизводимостью температурно-частотных характеристик – на уровне $10^{-7}...10^{-8}$ относительных единиц. Это позволяет компенсировать температурный дрейф в широком диапазоне рабочих температур до величины, сравнимой с основной погрешностью.

Естественный выходной сигнал ПРД – частотный. Это в значительной мере упрощает сопряжение первичного преобразователя датчика с со-

временными цифровыми устройствами приёма, сбора и обработки информации.

От кварцевых электронных часов ПРД на МКР унаследовали способность обходиться малым потреблением электрической энергии. Так, некоторые модификации датчиков потребляют ток около 20 мкА. Это позволяет создавать автономные измерительные устройства с периодичностью замены источника питания от 2 до 10 лет.

Несомненным достоинством ПРД является их универсальность. С помощью кварцевых резонаторов можно с высокой точностью измерять широкий спектр механических, тепловых, химических и других параметров.

Зарубежные микрокамертонные датчики давления и температуры, например, датчики давления фирмы Паросайентифик (США) или датчики температуры фирмы ЕТА (Швейцария), обладают уникальными техническими характеристиками: у них гистерезис и временной дрейф находится на уровне 0,01% [1]. В области отечественных ПРД техническим прорывом в середине 80-х годов стал кварцекристаллический чувствительный элемент (КЧЭ) преобразователя давления в изменение частоты резонатора. Он полностью состоит из кварцекристаллических деталей (рис. 2а) [3 – 5]. Разработка технологии пайки кварцекристаллических деталей стеклом позволила снизить гистерезис до величины $\pm(0,02 - 0,03)\%$ в интервале температур $-60...+150^{\circ}\text{C}$ и повысить рабочий диапазон давлений до 100 МПа (рис. 2б). Одновременно были разработаны микрокамертонные сенсоры усилий и температуры [7].

В основе существующих датчиков на основе МКР лежат следующие общие принципы построения:

- дифференциальная (или с одним опорным и одним чувствительным резонатором) схема включения МКР, что позволяет снизить погрешности температурного, временного, режимного дрейфов и убрать неинформативную частотную «подставку», усложняющую обработку сигнала в последующей аппаратуре;
- модульное построение узла чувствительного элемента, которое позволяет унифицировать конструк-

цию и значительно снизить её стоимость. Существует семь типоразмеров чувствительных элементов датчиков избыточного давления на различные пределы измерений с двумя типоразмерами корпусов. Чувствительных элементов датчиков температуры всего три, и три типоразмера корпусов: диаметр – 1,5; 2 и 3 мм, длина – 1,5, 6 и 8 мм соответственно. Они предназначены для работы в двух диапазонах температур: $-200...+200^{\circ}\text{C}$ и $0...+400^{\circ}\text{C}$.

Ниже приведены наиболее интересные отечественные разработки в период с 1983 г. по настоящее время.

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ОБЩЕГО ПРИМЕНЕНИЯ

1. Измерительные преобразователи абсолютного и избыточного давления с верхним пределом в диапазоне $0...100$ МПа с приведённой погрешностью $\pm(0,03...0,1)\%$, в том числе:

- датчик избыточного давления в диапазоне $0,06...60$ МПа, модель Кварц-ДИ взрывозащищённого исполнения, разработан, сертифицирован и освоен в 1993–1994 гг. предприятиями «Центрприбор» и «Инсэнс» (Москва), СКТБ ЭЛПА (г. Углич) и «Пирамида» (г. Смоленск);
- датчик избыточного и абсолютного давления, модель Кварц-2, сертифицирован и освоен предприятием «Термоавтоматика» (Москва) в 2000 г.;
- семейство датчиков избыточного и абсолютного давления с температурным каналом для внешней термокомпенсации, модели ПДТК-01, ПДТК-Р-МГ, ПДТК-Р-МС, ПДТК-Р-МН, разработаны предприятиями СКТБ ЭЛПА, «Инсэнс» и «Авангард-Элионика» (С.-Петербург) [7];
- манометр двойного применения с выходными сигналами в цифре (RS-232 или RS-485) и по частоте, модель МК-01 (рис. 3), разработан предприятиями «Инсэнс» и «Микрокамертон» (Москва) в 2005 г., освоен предприятием «Инсэнс».

2. Кварцевый частотный термометр ПТК-01 на диапазон измеряемых температур $-60...+60^{\circ}\text{C}$ с погрешностью $\pm(0,1...0,3)^{\circ}\text{C}$, разработан и серийно выпускается предприятием СКТБ ЭЛПА.

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

1. Кварцевый медицинский термометр, модель ТЭ-01. Разработан НПО «Интеграл» (г. Минск) и СКТБ ЭЛПА, серийно выпускается НПО «Интеграл».
 2. Микробарометр для баронивелирования местности, обладает погрешностью 2 см в диапазоне перепадов высот до 1000 м. Прибор разработан в МИФИ и освоен НПО «Геофизика» (Москва).
 3. Кварцевый датчик избыточного давления с оптоволоконной связью на различные диапазоны с верхним значением от 0,16 до 25,0 МПа с погрешностью 0,1%, модель Кварц-ОДИ. Благодаря оптоволоконной линии связи с приёмной аппаратурой датчик обладает высокой помехоустойчивостью, особым уровнем взрывозащищённости и грозозащиты. Сертифицирован и освоен в 1998 г. предприятиями «Инсэнс» и НПО «Газприборавтоматика» (Москва).
 4. Датчик уровня жидкости погружного типа в диапазоне глубин от нескольких метров до 10 км с погрешностью $\pm(0,05...0,1)\%$. Разработан и освоен предприятиями «Инсэнс» и СКТБ ЭЛПА.
 5. Скважинный измеритель давления и температуры с погрешностью $\pm(0,05...0,1)\%$ в диапазоне давлений до 100 МПа и температур $0...150^{\circ}\text{C}$. Освоен предприятиями «Инсэнс» и СКТБ ЭЛПА в 2003 г. (рис. 4).
 6. Датчики для систем теплового учёта, модели ТЧК-01 и ТЧК-012, сертифицированы и освоены предприятиями «Теплоконтроль» (г. Сафоново, 1995 г.), «Рэмик-2» (Москва, 1996 г.), «Термоавтоматика» и «Инсэнс» (1999 г.).
 7. Малопотребляющий датчик температуры для термокомпенсации температурных дрейфов в устройствах и системах, разработан и выпускается предприятием «Инсэнс».
 8. Датчик температуры «Метран-299» для систем поквартирного учёта тепла. Силами предприятий «Инсэнс», СКТБ ЭЛПА и «Метран» (г. Челябинск) в 2004–2005 гг. разработана техническая документация и изготовлена опытная партия.
- Описание технических характеристик вышеприведённых датчиков не является целью данного обзора. Приведём здесь лишь основные данные некоторых из этих датчиков.

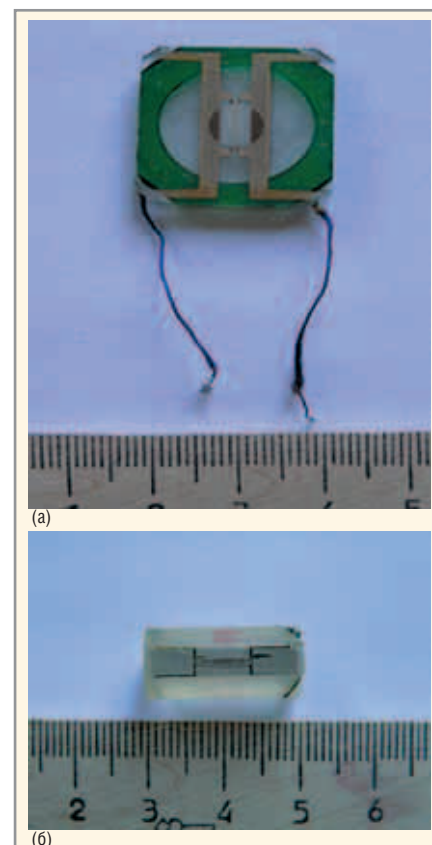


Рис. 2. Манометрический МКР давлений до 10 МПа (а) и до 100 МПа (б)



Рис. 3. Манометры кварцевые МК-01



Рис. 4. Датчики давления скважинные

КВАРЦЕВЫЕ МАНОМЕТРЫ МК-01

Кварцевые манометры показаны на рис. 3. Они представляют собой семейство измерительных преобразователей абсолютного (МК-01-А), избыточного (МК-01-И) и дифференциального (МК-01-Д) давления. Манометры предназначены для измерения давления газообразных, жидких

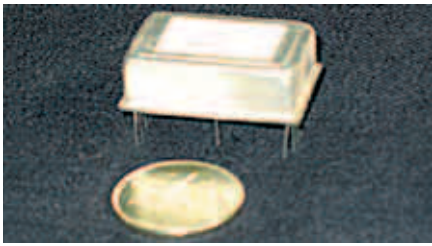


Рис. 5. Кварцевый двухчастотный генератор ГКД-01 с встроенным датчиком температуры

и сыпучих нейтральных и агрессивных сред и обеспечивают непрерывное преобразование давления этих сред в частотные и цифровые сигналы. Конструктивное исполнение манометров, предназначенных для общепромышленного и специального применения, различно.

Манометры общепромышленного применения используют для измерения абсолютного давления (модели А1, А2, А3, А4, А5), избыточного давления (модели И1, И2, И3, И4, И5) и малых перепадов давления (модель Д7). Манометры специального применения используют для измерения барометрического давления (модель А5) и атмосферного диапазона рабочих давлений. Они имеют миниатюрное исполнение и малое потребление энергии (модели А6 и И6), а также специальное исполнение для использования в скважинах (модель А8).

Манометры имеют как невзрывозащищённое исполнение, так и взрывозащищённое видом взрывозащиты «искробезопасная электрическая цепь 1ф» и уровнем взрывозащиты «особовзрывобезопасный» (О) по ГОСТ 22782.5-78).

По виду выходного сигнала манометры имеют следующие исполнения: Ч (один частотный сигнал, по давлению), 2Ч (два частотных сигнала, по давлению и температуре), Ц (один цифровой сигнал и один кодовый, по давлению) и 2Ц (два цифровых и два кодовых сигнала, по давлению и температуре). Измерительный преобразователь (ИП) манометров имеет на выходе один или два частотных сигнала: по давлению или по давлению и температуре. Манометры Ц и 2Ц состоят из ИП исполнений Ч или 2Ч, адаптера измерительного преобразователя (АИП) с дисплеем, индицирующим цифровое значение давления и температуры и передающим кодовый сигнал по интерфейсу RS-232 или RS-485, и кабеля линии связи между ИП и АИП.

Дисплей АИП содержит светодиодный индикатор, отображающий четыре десятичные цифры значения давления (температуры) и знак «-». На передней панели АИП размещены также два точечных светодиодных индикатора единиц измерения давления (например, МПа или кг/см²) и кнопка переключения единиц измерения. В разъёме кабеля связи, подключаемом к АИП, содержится микросхема ППЗУ с коэффициентами ИП. Величина измеряемых абсолютных и избыточных давлений – от 0,07 до 100 МПа, а дифференциальных давлений – от $\pm(0,4...6,0)$ кПа.

Верхний предел основной погрешности находится в диапазоне $\pm(0,1...0,5)\%$. Температурная погрешность манометров без температурной компенсации (исполнения по выходному сигналу Ч и Ц) не превышает величины основной погрешности на любые 10°C, а погрешность манометров исполнения 2Ч и 2Ц с температурной компенсацией – основной погрешности во всём диапазоне рабочих температур.

Датчик температуры «Метран-299» для системы поквартирного учёта тепла «Метран-1500А»

Датчик температуры «Метран-299» предназначен для работы в системе поквартирного учёта тепла «Метран-1500А», разработанной предприятием «Метран». В состав датчика входят патрон с чувствительным элементом и электронный блок. Электронный блок состоит из генераторной части и интерфейсного модуля. Генераторная часть и чувствительный элемент размещаются в патроне (рис. 5). В качестве чувствительного элемента используется кварцевый термочувствительный резонатор типа РКТ306. Интерфейсный модуль используется для согласования термопреобразователя с другими устройствами системы «Метран-1500А».

Диапазон измеряемых температур в системе отопления здания 30...105°C. Абсолютная основная погрешность измерения температуры не превышает $\pm 0,05^\circ\text{C}$, а повторяемость (сходимость) результатов измерения во всём диапазоне измерения не более $\pm 0,05^\circ\text{C}$. Разность показаний двух датчиков из любой неподобранной пары по модулю не превышает 0,05°C.

Питание электронного блока датчика осуществляется от внешнего источника по шине обмена напряжением 3,3...4,0 В. Средняя наработка датчика температуры до отказа – не менее 50 000 ч, средний срок службы – не менее 5 лет.

Двухчастотные кварцевые генераторы ГКД-01 со встроенным кварцевым датчиком температуры

Двухчастотные кварцевые генераторы ГКД-01 (рис. 5) предназначены для формирования высокостабильного стандарта времени в автономных информационно-измерительных системах с ограниченным потреблением электрической мощности [8].

В металлический корпус генератора заключены термостабильный кварцевый генератор (ТСКГ) и датчик температуры – термочувствительный кварцевый генератор (ТЧКГ) с микрокамертонным сенсором. Габариты ГКД-01 не более 25 × 15 × 10 мм.

Ниже приведены основные параметры генератора:

- номинальное значение частоты выходного сигнала ТСКГ 5...10 МГц,
- частота выходного сигнала ТЧКГ 32,6...32,8 кГц,
- температурный коэффициент частоты ТЧКГ $-(1,8...2,2)$ Гц/°C,
- диапазон рабочих температур $-50...+120^\circ\text{C}$,
- температурная зависимость частоты ТСКГ от частоты ТЧКГ записывается в паспорте кварцевого генератора в виде таблицы (с точностью до 3×10^{-8}),
- долговременная нестабильность частоты ТСКГ составляет не более 10^{-9} при 0°C и не более 5×10^{-9} при 50°C после 30 дней непрерывной работы,
- напряжение питания $5 \pm 0,05$ В,
- ток потребления не более 10 мА (в среднем 6 мА).

Использование градуировочной зависимости частоты ТСКГ от частоты ТЧКГ и выходного сигнала ТЧКГ даёт возможность пользователю в своей аппаратуре осуществлять цифровую температурную компенсацию дрейфа частоты ТСКГ. Преимуществом генераторов ГКД-01 по сравнению с аналогами, например, термостатированными генераторами, является малое потребление электрической

кой мощности наряду с высокой стабильностью задаваемых временных интервалов.

МИКРОКАМЕРТОННЫЕ МИКРОВЕСЫ

Микрокамертонные резонаторы могут с успехом применяться для точного измерения сыпучей порошкообразной массы в диапазоне десятков микрограммов без ограничения формы, размера, механических или адгезионных свойств микрочастиц взвешиваемого вещества и их положения на поверхности датчика. Представим экспериментальные результаты по взвешиванию микрообъёмов, в частности, изучение гигроскопических свойств фармацевтических материалов [9].

Множество химических компаний в настоящее время управляют программами исследования, нацеленными на открытие новых материалов и составов. При этом поток анализируемых составов чрезвычайно велик, а сами материалы дороги и доступны анализу в чрезвычайно малых количествах. Кроме того, как правило, технология анализа характеристик трудоёмка и невозможна без автоматизации.

Применение кварцевого камертонного резонатора является привлекательной альтернативой традиционным методам измерения. Микрокамертонные резонаторы имеют малые габариты, могут быть установлены на автоматизированной руке робота и обладают высокой добротностью в воздухе (10 000...15 000). Такие свойства позволяют отследить резонансные изменения частоты с большой точностью.

Типичная операция измерения влажности кристаллических порошков выполняется следующим образом. Тонкий слой адгезионного покрытия наносится на торцы ветвей камертонного резонатора. Покрытые адгезионным материалом ветви камертонного резонатора погружают-

ся в слой порошка так, чтобы покрытие захватило некоторое количество порошкового образца. Лишний порошок и частицы, которые присоединены свободно, самопроизвольно удаляются. После этого микрокамертон с порошковым образцом переносится в камеру влажности – гигростат. Изменение частоты записывается на каждом этапе процесса. Для вычисления относительного изменения массы $\Delta m/m$ по измеренному значению частоты микрокамертона используется следующая формула: $\Delta m/m = (f_2 - f_3)/(f_1 - f_2)$, где f_1 – начальная резонансная частота после нагружения резонатора адгезионным материалом, но без анализируемого порошкового образца и влаги, f_2 – частота резонатора с адгезионным материалом и порошковым образцом, f_3 – частота резонатора, подвергнутого воздействию влаги.

Переходной процесс при измерении влажности отнимает в обычных измерениях влажности много времени. Однако, благодаря малым размерам измеряемого материала, микрокамертон уравнивается намного быстрее (~1 мин). При изменении массы материала от 0 до 7 мкг частота микрокамертона изменялась в пределах 32 780...32 580 Гц. При этом зависимость частоты от массы – линейная.

В работе [10] приводится метод измерения параметров жидкостей с использованием микрокамертонных микровесов. Небольшие размеры микрокамертона по сравнению с длиной компрессионных волн в жидкости позволяют получить высокочувствительный механизм для одновременного измерения трёх параметров жидкости: произведения плотности на вязкость, диэлектрической проницаемости и электрической проводимости. Приводятся подробные результаты исследования свойств полимерных растворов с помощью микрокамертонных резонаторов.

Авторы работы [11] разработали тактильный (осязательный) датчик, способный ощущать качество бумаги. Кончик вилки колеблющегося микрокамертона приводится в контакт с анализируемой бумагой. В зависимости от количества целлюлозы в бумаге импеданс резонатора изменяется, что и позволяет судить о качестве бумаги. При этом толщина листа бумаги практически не влияет на оценку её качества.

ЛИТЕРАТУРА

1. Малов В.В. Пьезорезонансные датчики. Москва: Энергоатомиздат, 1989.
2. Симонов В.Н. Микрокамертонные датчики давления и температуры. Тр. Межд. научно-технической конф. «Датчик-90». Гурзуф, 1990.
3. Paros T.M. Precision digital pressure transducer. ISA AC. 1972. P. 72–602.
4. Кварцевые температурные сенсоры TS-156, TS-261, TC-137, GT-3500. Рекламный проспект компании ETA SA (Швейцария).
5. Виноградов М.А., Малов В.В., Симонов В.Н. Устройство для измерения давления. АС СССР № 1402043. 1988.
6. Малов В.В., Козловский В.Д., Макаров В.М. Частотный датчик атмосферного давления на основе кварцевых пьезорезонаторов. Робототехника и автоматизация производственных процессов. 1983. Ч. 3. С. 78–79.
7. www.sktbelpa.ru.
8. Симонов В.Н. Пьезокристаллический генератор. Патент РФ на изобретение № 2277292.
9. Matsiev L.F. Tuning Fork QCM. Application to Powder and Gel Technology. 2002 IEEE Ultrasonic Symp. P. 468–471.
10. Matsiev L.F., Bennett J.W., McFarland E.W. Application of Low Frequency Mechanical Resonators to Liquid Property Measurements. 1998 IEEE Ultrasonic Symp. P. 308–311.
11. Hideaki I., Masataka N. and Naoya K. A Paper-Quality Monitor Using a Quartz-Crystal Tuning-Fork Tactil Sensor. 1998 IEEE Ultrasonic Symp. P. 312–316. ©

Новости мира News of the World Новости мира

Трёхосевой датчик усилий с ICP-усилителем

Фирма Synotech предлагает трёхкомпонентные датчики усилий со встроенным усилителем в герметичном корпусе из высококачественной стали производителя PCB Piezotronics. Эти датчики измеряют как динамические, так и ква-

зистатические силы по трём ортогональным осям. Каждый элемент, воспринимающий усилие, содержит 3 кварцевых элемента. Диапазон измерений по оси Z составляет в зависимости от модели 4,5 или 45 кН и по осям X и Y – 2,2 или 18 кН.

www.synotech.de

