

В. Е. Шикина

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКОГО ПЕРВИЧНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ МАССОВОГО РАСХОДОМЕРА ЖИДКОСТЕЙ

Аннотация.

Актуальность и цели. В настоящее время измерение расхода (массового и объемного) занимает второе место после температуры и составляет 15 % от всех измерений в промышленности. Массовые расходомеры являются более точными по сравнению с объемными и становятся необходимыми в ряде отраслей. Измерительные преобразователи для массовых расходомеров, как правило, выполняются из нержавеющей стали, титана или сплавов на основе никеля. В рамках данной работы интерес представляет использование в качестве материала измерительной трубки пьезокерамики цирконата-титаната свинца типа ЦТС-19 и определение массового расхода, исходя из свойств пьезоэлектриков на основе обратного пьезоэффекта. Целью является определение возможности изготовления подобного преобразователя с заданными характеристиками на производстве.

Результаты. Рассмотрены изгибные колебания полой цилиндрической пьезокерамической трубки, которая является первичным преобразователем массового расходомера. Определена схема подключения преобразователя и направление поляризации трубки для получения требуемых колебаний. Представлена технология изготовления преобразователей на производстве, состоящая из пяти основных этапов, начиная от создания материала пьезокерамики и заканчивая нанесением выходных электродов на внешнюю поверхность трубки для регистрации ее колебаний. Описан состав проливной установки для проведения первичных экспериментов.

Выводы. Разработанные и изготовленные опытные образцы подтверждают возможность использования пьезоэлектрического материала в качестве основы для первичного преобразователя массового расходомера. Технология их изготовления может быть улучшена и уменьшена по времени при условии проведения полной поляризации образца в едином цикле (при наличии данной возможности на производстве). Следует отметить, что подобная работа проводилась в производстве впервые.

Ключевые слова: изгибные колебания, пьезокерамический первичный преобразователь, пьезоэлектрический трансформатор, поляризация, электроды.

V. E. Shikina

PRODUCTION OF CYLINDRICAL PIEZOCERAMIC PRIMARY CONVERTER FOR MASS FLOWMETER FOR LIQUIDS

Abstract.

Background. At the present time flow measurement (mass and volume) takes the second place after the temperature and totals 15 % of all measurements in the industry. Mass flowmeters are more accurate than volumetric ones and are required in a number of industries. Measuring converters for mass flowmeters, as a rule, are made

of stainless steel, titanium or alloys based on nickel. As to this research, the author is interested in application of piezoelectric ceramics of lead zirconate titanate-19 as a material of the measuring tube, and in definition of massflow rate in terms of the properties of piezoelectric materials based on the inverse piezoelectric effect. The aim is to determine the possibility of manufacturing a transducer with predetermined characteristics at production.

Results. The author considered flexural vibrations of a hollow cylindrical piezoelectric tube, which is the primary converter of a mass flowmeter, and defined a connection diagram of the converter and the polarization direction of the tube to obtain the required oscillation. The article presents the converter manufacturing technology at production consisting of five main stages, starting from a piezoelectric material and ending with application of output electrodes on the outer surface of the tube for reception of its oscillations. The work describes a setup structure for initial experiments.

Conclusions. The designed and manufactured prototypes confirm the possibility of using a piezoelectric material as the basis for production of the mass flowmeter converter. The manufacturing technology can be improved and reduced in time by using full polarization of the sample in a single cycle (subject to availability at production). It should be noted that such work was carried out in production for the first time.

Key words: flexural vibrations, piezoceramic primary converter, piezoelectric transformer, polarization, electrodes.

Введение

Измерения, выполняемые в научных исследованиях, промышленности, энергетике, сельском хозяйстве, при добыче и транспортировке природных энергоносителей, часто связаны с измерениями расхода, количества, давления и уровня веществ. Для контроля расходов используются различные типы расходомеров, основанные на различных принципах действия и имеющие различные конструкции. Кроме расходомеров, измеряющих объем жидкости, выпускаются расходомеры, определяющие массу расходуемой жидкости. Подобные приборы используются в химической, нефтехимической, пищевой, целлюлозно-бумажной, фармацевтической, косметической и других отраслях. Наиболее распространены массовые расходомеры жидкостей, основанные на эффекте Кориолиса, которые измеряют расход напрямую и нечувствительны к изменению условий процесса измерения и состава протекающей среды. Они также могут использоваться в системах очистки воды, поскольку не имеют в потоке подвижных частей, которые изнашиваются и выходят из строя, и исключают риск загрязнения системы очистки.

Как известно, при протекании жидкости трубопровод совершает изгибные колебания [1]. Данные колебания воспринимаются первичными преобразователями массовых расходомеров, усиливаются и регистрируются. Параметры колебаний связаны с измеряемой величиной – массой протекающей жидкости. Конструкции расходомеров достаточно разнообразны, однако все они, как правило, имеют металлическую измерительную трубку, внешний виброгенератор и приемники колебаний.

Целью работы являлось исследование возможности использования в качестве первичного измерительного преобразователя массового расходомера цилиндрической трубки, выполненной из кристаллического или поликристаллического пьезоэлектрика. Нанесенные на внешнюю поверхность такого цилиндра электроды обеспечивают возбуждение и съем колебаний. Та-

ким образом, упрощается конструкция первичного преобразователя и уменьшаются его массо-габаритные характеристики.

Среди материалов для изготовления первичного измерительного преобразователя были рассмотрены пьезоэлектрические монокристаллы (кварц, дигидрофосфаты калия и аммония, сегнетова соль, ниобат лития, силикоселенит и германоселенит), пьезоэлектрическая керамика и полимерные материалы в виде пленок, текстурированные путем вытяжки и поляризованные в постоянном электрическом поле. Анализ свойств данных материалов показал, что с учетом необходимости контакта чувствительного элемента с измеряемой средой наиболее предпочтительно использовать пьезокерамику из цирконат-титаната свинца $Pb(Ti, Zr)O_3$ ЦТС-19 [2], которая относится к сегнетомягким материалам. Жесткость материала определяет возможность и качество его поляризации, следовательно, выбранную пьезокерамику поляризовать с получением хорошего результата проще.

1. Изгибные колебания цилиндрической трубки

Для возбуждения в цилиндрическом пьезоэлементе низкочастотных колебаний изгиба необходимы две системы электродов [3]. В этом случае пьезоэлемент представляет собой пьезоэлектрический трансформатор. Часть его, подключенная к источнику электрического сигнала, считается возбудителем, часть, подключенная к нагрузке, – генератором [4].

По способу преобразования энергии в возбудителе и генераторе пьезотрансформаторы подразделяют на: продольно-продольные, поперечно-поперечные, продольно-поперечные и поперечно-продольные. Поскольку цилиндр является частью трубопровода, располагать электроды на его торцевых поверхностях невозможно. Следовательно, для подобного пьезоэлемента рассматривать продольно-поперечную и поперечно-поперечную поляризацию нельзя. Возможна только продольно-продольная поляризация (рис. 1).

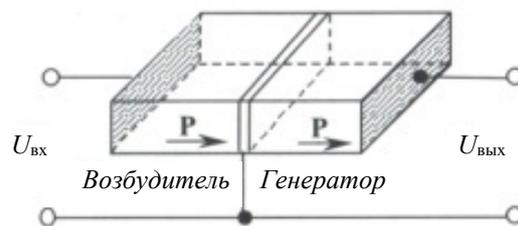


Рис. 1. Пьезотрансформатор с продольно-продольной поляризацией

Направление поляризации для возбуждения в цилиндрическом пьезоэлементе изгибных колебаний показано на рис. 2.

Электроды, расположенные на краях цилиндра, первоначально необходимы для осуществления процесса поляризации, а затем выполняют роль входных рабочих электродов, обеспечивая изгибные колебания цилиндра.

Для проверки работоспособности в ОАО «НИИ «Элпа» (г. Зеленоград) были созданы экспериментальные образцы первичного измерительного преобразователя массового расходомера в виде цилиндрической трубки.

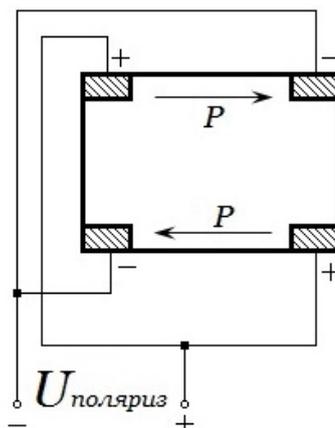


Рис. 2. Схема поляризации цилиндрического пьезоэлемента

2. Технология изготовления цилиндрических первичных преобразователей для расходомера

Процесс изготовления опытных образцов состоял из нескольких этапов.

1. Создание материала пьезокерамики путем смешивания в требуемых пропорциях всех компонентов и их измельчение. Необходимая пьезокерамика – ЦТС-19. Определение характеристик полученного материала до и после проведения первичного процесса поляризации с целью установления его качества. Согласно [5] необходимо измерить следующие характеристики до поляризации: емкость C_0 , $\text{tg } \delta$. Условия первичной поляризации: температура $+140^\circ\text{C}$; напряжение поляризации 2 кВ; продолжительность поляризации 30 мин (15 мин необходимо, чтобы выйти на заданную температуру, 15 мин пьезокерамика находится под поляризующим полем). После проведения первичной поляризации через 1 ч измеряются следующие характеристики: емкость C_0 , $\text{tg } \delta$, частоты резонанса и антирезонанса f_r^t , f_a^t , относительный резонансный промежуток δf^t . По результатам измерений делается вывод, что данная пьезокерамика является керамикой ЦТС-19 и поляризуется нормально.

2. Изготовление опытных образцов требуемой формы.

Способ формования заготовок – прессование порошка [6]. Необходимая форма – цилиндр $\phi 11 \times 9 \times 10$ мм. Размеры выбраны, исходя из возможности поляризации образцов. Чем длиннее будет цилиндр, тем сложнее его поляризовать, однако на практике более важным является соотношение длины и диаметра цилиндра, т.е. при увеличении длины следует увеличивать и диаметр. На рис. 3 показан эскиз цилиндрического преобразователя с входными электродами.

Материалы на основе цирконата-титаната свинца спекаются при температуре $1200\text{--}1300^\circ\text{C}$. Для получения изделий с хорошей микроструктурой требуется относительно короткое время выдержки. Поры в заготовке закрываются под действием температуры при спекании. Пористость материала составляет $\approx 5\%$, поры закрытые, жидкости не впитываются. Прочность на растяжение данной керамики около 200 кг/см^2 .

На данном этапе были получены несколько идентичных пьезокерамических цилиндров.

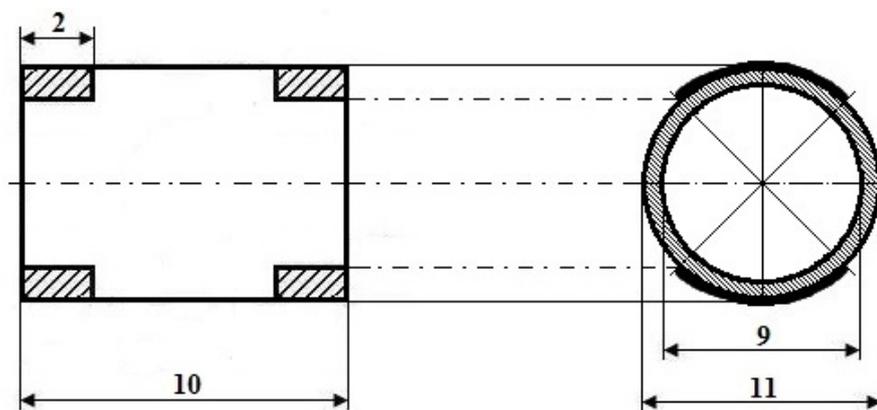


Рис. 3. Геометрические размеры первичного преобразователя

3. Нанесение входных электродов. Электроды представляют собой слой металлического серебра, наносимый в виде пасты, подвергаемой последующему вжиганию, в результате чего образуется непрерывный проводящий слой, непосредственно сцепленный с поверхностью керамики. Электроды (4 шт.) наносятся согласно эскизу по трафарету на внешнюю поверхность с захватом торцов, чтобы удобнее было проводить поляризацию. При необходимости с торцов электроды после поляризации можно полностью удалить. В данном случае электроды для поляризации будут являться в дальнейшем рабочими входными электродами первичного преобразователя. На рис. 4 показаны образцы первичного измерительного преобразователя расходомера в виде цилиндрической трубки из пьезокерамики с нанесенными электродами.



Рис. 4. Экспериментальные образцы

Электроды наносятся тонкой кисточкой, затем вжигаются при температуре $+800\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 2 ч. Непосредственно внутри печи образцы находятся около 30 мин. На рис. 5 показан процесс вжигания электродов.

После вжигания электродов (через 24 ч) проверяется качество нанесенных электродов и измеряются характеристики образца: емкость C_0 , $\text{tg } \delta$.

4. Процесс поляризации образцов для получения в них изгибных колебаний. Поляризация осуществляется приложением сильного постоянного электрического поля к металлизированным керамическим образцам. Из-за низкой диэлектрической проницаемости воздуха используются ванны с маслом. Процесс проходит в два цикла: сначала поляризуется одна пара электродов (по длине цилиндра), затем следующая пара электродов – в обратном направлении.

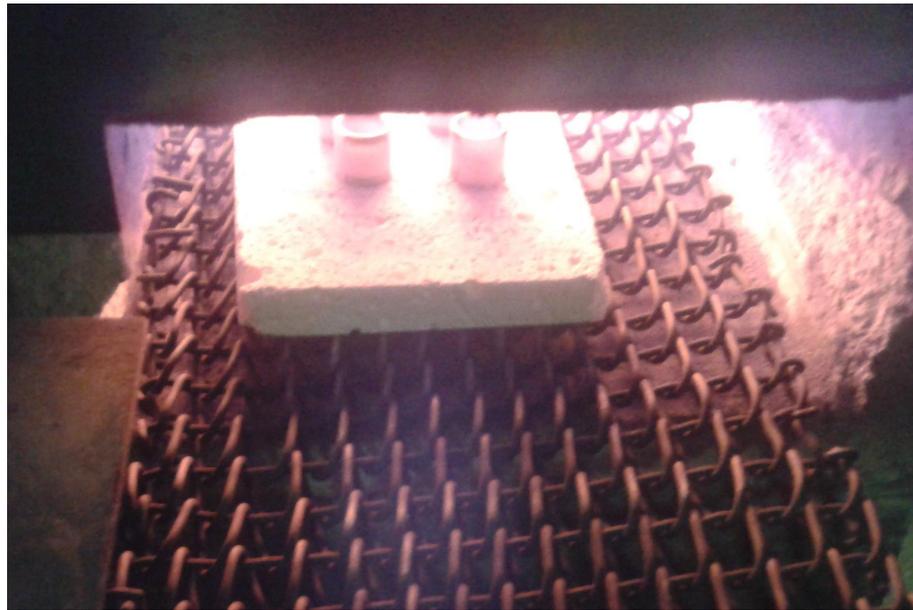


Рис. 5. Процесс вжигания электродов

Условия поляризации: температура $+160\text{ }^{\circ}\text{C}$; напряжение 10 kV ; длительность поляризации 45 мин (15 мин необходимо, чтобы выйти на заданную температуру, 30 мин образцы находятся под воздействием поля). Поляризация проходит в полиэтилсилаксановой жидкости (ПЭС-5). После проведения первого цикла поляризации измеряются характеристики, описанные в п. 1, а также пьезомодуль d_{33} с положительной и отрицательной сторон. Ввиду старения керамики существует правило выдерживать временной интервал между процессом поляризации и измерением для оценки свойств. После поляризации емкость образцов должна увеличиться примерно на 30% , $\text{tg } \delta$, как правило, уменьшается. На рис. 6 и 7 показаны процессы измерения емкости, $\text{tg } \delta$ и пьезомодуля соответственно.

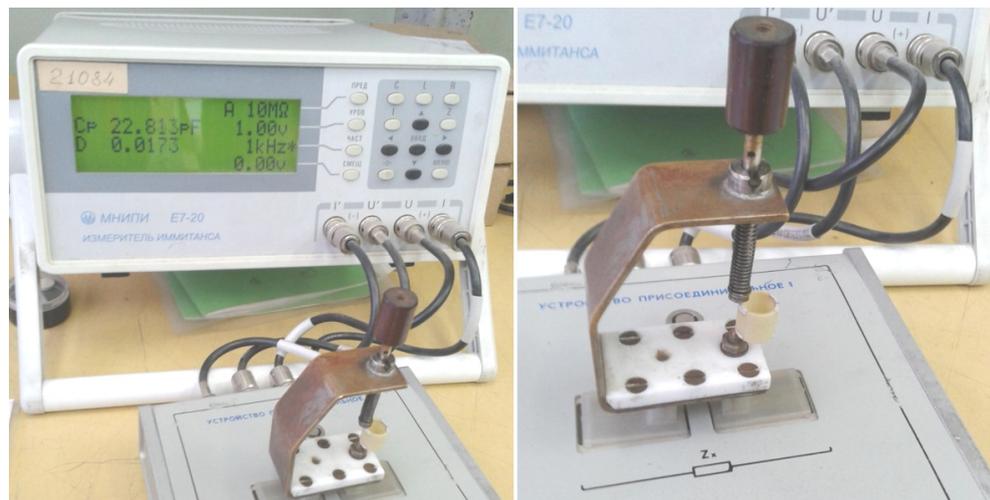


Рис. 6. Измерение емкости и $\text{tg } \delta$



Рис. 7. Измерение пьезомодуля

В среднем по образцам пьезомодуль равен 400. Со стороны, не подвергшейся поляризации, пьезомодуль должен быть равен 0, однако при измерении получены значения пьезомодуля около 200. Это означает, что вторая половина также слабо поляризовалась.

Далее проводится второй цикл поляризации с другой стороны с теми же условиями. После второй поляризации еще раз измеряются все перечисленные характеристики.

Эксперименты показали, что поляризация пьезомодулей практически выравнивается с обеих сторон и пьезомодуль имеет значения порядка 360. Это означает, во-первых, что поля пересеклись и в центре цилиндра при наличии выходных электродов можно регистрировать выходной сигнал, и, во-вторых, полученные образцы обладают сильными пьезоэлектрическими свойствами, что немаловажно при использовании их в качестве первичных преобразователей для расходомера жидкостей.

5. Нанесение выходных электродов. Центральные (выходные) электроды наносятся после проведения поляризации, поскольку в противном случае образец при поляризации может разорвать внутренним напряжением (пробой). Возможно несколько способов нанесения: тонкой кисточкой серебросодержащим контактолом, предварительно удалив слой поляризационного масла и жира с помощью наждачной бумаги или прокипятив образец в бензине; приклеивание электродной площадки клеем через контактол для увеличения чувствительности. В данном случае был использован второй метод нанесения выходных электродов.

Следует отметить, что наиболее сложным среди перечисленных этапов является поляризация, поскольку элемент имеет цилиндрическую форму, а также в связи с тем, что электроды не покрывают поверхность целиком и их площадь незначительна. Кроме того, для получения изгибных колебаний поляризация осуществляется за два цикла с разных сторон цилиндра, что не является обычным. Специалистами ОАО «Элпа» подобная работа производилась впервые.

Таким образом, после выполнения всех этапов были получены опытные образцы и разработана установка для проведения экспериментов по проливу различных жидкостей. Данная установка состоит из следующих элементов:

- емкость, в которой находится измеряемая жидкость (объем 20 л);
- отводной гибкий шланг с краном для изменения подачи жидкости и, следовательно, скорости ее течения;
- исследуемый первичный преобразователь массового расхода, входные электроды которого подключены к генератору, настроенному на собственную частоту, а выходные – к цифровому частотомеру и осциллографу для визуализации сигнала и фиксации значения выходной частоты; датчик жестко соединен с обеих сторон с пластиковой трубкой, которая, в свою очередь, соединена с гибким отводным шлангом;
- емкость для слива жидкости;
- счетчик жидкости, установленный горизонтально и используемый в качестве образцового средства измерения для контроля расхода.

На рис. 8 представлены фрагменты описанной установки.



Рис. 8. Фрагменты экспериментальной установки для исследования датчика расхода

На описанной установке были проведены исследования по проливу воды, молока, пива и тосола-40. Частично их результаты приведены в [7].

По результатам проведенных работ можно сделать вывод, что возможно изготовление чувствительного элемента (измерительной трубки) массового расходомера в виде цилиндра, выполненного из пьезокерамического материала. Чувствительный элемент разработанной конструкции обладает физическими свойствами, позволяющими использовать его для измерения массового расхода жидкости, протекающей через него. Для защиты от возможного негативного воздействия протекающей среды внутреннюю поверхность цилиндрического чувствительного элемента необходимо покрыть органическим лаком или эмалью.

Список литературы

1. Прямое измерение массового расхода расходомером «MASSFLO» Danfoss // Приборы и системы управления. – 1995. – № 5. – С. 35–36.
2. **Шикина, В. Е.** Использование пьезоэлектрического материала для изготовления датчика массового расходомера жидкости / В. Е. Шикина // Вестник Ульянов-

- ского государственного технического университета (Вестник УлГТУ). – 2013. – № 3. – С. 72–74.
3. Малов, В. В. Пьезорезонансные датчики / В. В. Малов. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 272 с.
 4. Шарапов, В. М. Пьезоэлектрические датчики / В. М. Шарапов, М. П. Мусиенко, Е. В. Шарапова. – М. : Техносфера, 2006. – 632 с.
 5. ОСТ 11 0444-87. Материалы пьезокерамические. Технические условия. – М., 1987.
 6. Яффе, Б. Пьезоэлектрическая керамика / Б. Яффе, У. Кук, Г. Яффе. – М. : Мир, 1974. – 288 с.
 7. Шикина, В. Е. Расчет частоты колебаний пьезокерамического первичного преобразователя для массового расходомера жидкостей / В. Е. Шикина // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2014. – № 1 (29). – С. 54–63.

References

1. *Pribory i sistemy upravleniya* [Control devices and systems]. 1995, no. 5, pp. 35–36.
2. Shikina V. E. *Vestnik Ulyanovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (Vestnik UIGTU)* [Bulletin of Ulyanovsk State Technical University]. 2013, no. 3, pp. 72–74.
3. Malov V. V. *P'ezorezonansnye datchiki* [Piezoelectric resonators]. Moscow: Energoatomizdat, 1989, 272 p.
4. Sharapov V. M., Musienko M. P., Sharapova E. V. *P'ezoelektricheskie datchiki* [Piezoelectric sensors]. Moscow: Tekhnosfera, 2006, 632 p.
5. *OST 11 0444-87. Materialy p'ezokeramicheskie. Tekhnicheskie usloviya* [Piezoceramic materials. Engineering specifications]. Moscow, 1987.
6. Yaffe B., Kuk U., Yaffe G. *P'ezoelektricheskaya keramika* [Piezoelectric ceramics]. Moscow: Mir, 1974, 288 p.
7. Shikina V. E. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskije nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2014, no. 1 (29), pp. 54–63.

Шикина Виктория Евгеньевна
старший преподаватель, кафедра
измерительно-вычислительных
комплексов, Ульяновский
государственный технический
университет (Россия, г. Ульяновск,
ул. Северный Венец, 32)

E-mail: shik7789@gmail.com

Shikina Viktoriya Evgen'evna
Senior lecturer, sub-department
of measuring-computing complexes,
Ulyanovsk State Technical University
(32 Severny Venets street, Ulyanovsk,
Russia)

УДК 681.586

Шикина, В. Е.

Изготовление цилиндрического пьезокерамического первичного преобразователя для массового расходомера жидкостей / В. Е. Шикина // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2014. – № 4 (32). – С. 93–101.