

Кротевиц В.А., Опанасенко В.В., Вирченко П.Т.

Отдельное структурное подразделение Межотраслевой центр внедрения и трансфера технологий "Эридан" Государственной научно-производственной корпорации "Киевский институт автоматики".
Украина, г. Киев

ВЫСОКОТОЧНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ДАВЛЕНИЯ. ПРОБЛЕМЫ РАЗРАБОТКИ И ПРОИЗВОДСТВА. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОПЫТНОГО ОБРАЗЦА

Анотація

У статті розглядаються основні проблеми розробки і виробництва високоточних вимірвальних перетворювачів тиску газоподібних і рідких середовищ (ВВПТ). Визначені основні джерела похибки ВВПТ. Запропоновані технічні рішення з мінімізації похибки ВВПТ. Наведені результати експериментального дослідження дослідного зразка ВВПТ на основі запропонованих технічних рішень.

Abstract

The basic problems of development and productions of high-fidelity measurings sensors of gaseous and liquid environments are consider in the article (HMS). The basic sources of error of HMS are certain. Technical solutions are offered on minimization of error of HMS. The results of experimental research of pre-production model of HMS are resulted on the basis of the offered technical solutions

Высокоточные измерительные преобразователи давления (ВИПД) находят применение в составе измерительных систем и комплексов для коммерческого учета газообразных и жидких продуктов для высокоточного контроля и регулирования технологических процессов в разных отраслях, в том числе: в газовой, нефтедобывающей, нефтехимической промышленности, на промышленных объектах коммунального хозяйства.

Для коммерческого учета газа в Украине в основном применяются преобразователи давления производства зарубежных фирм EMERSON, HONEYWEL (США), YOKOGAWA (Япония) и др., которые обеспечивают необходимую точность, но имеют высокую стоимость, в связи с чем, недоступны для широкого применения [1].

В настоящее время ситуация, сложившаяся на газовом рынке Украины, требует повышения точности коммерческого учета газа. Это достигается применением в составе измерительных комплексов для коммерческого учета газа сравнительно недорогих высокоточных измерительных преоб-

разователей давления (ВИПД), с основной приведенной погрешностью измерения давления не более $\gamma_{\text{осн}} \leq 0,1\%$ и дополнительной температурной погрешностью не более $\gamma_{\text{доп}} \leq 0,1\%$ во всем рабочем диапазоне температур.

ВИПД должны эксплуатироваться в рабочем диапазоне температур от -40°C до $+60^{\circ}\text{C}$, иметь минимальные габариты и вес, низкую стоимость.

Проблемы разработки и производства ВИПД

Разработка ВИПД с основной приведенной погрешностью измерения давления $\gamma_{\text{осн}} \leq 0,1\%$ и выше, прежде всего, связана с разработкой и изготовлением первичного преобразователя давления (сенсора давления). От стабильности и точности сенсора давления (СД) зависят все остальные характеристики ВИПД. Конструктивно СД состоит из чувствительного элемента давления (ЧЭ) и системы защиты ЧЭ от влияния измеряемой среды, в том числе и агрессивной (кислоты, щелочи, бензины и т.д.).

Среди всех известных физических принципов преобразования давления наиболее перспективными для построения ВИПД являются интегральные тензометрические преобразователи давления в электрический выходной сигнал. Известны различные типы тензометрических преобразователей давления, каждый из которых имеет свои недостатки и преимущества. По сумме показателей, наибольший интерес представляют тонкопленочные и диффузионные тензопреобразователи на основе монокристаллического кремния.

Как правило, все ведущие зарубежные фирмы в своих разработках и производстве применяют именно такие тензометрические преобразователи давления, отличие между которыми состоит в типе ЧЭ, технологии посадки ЧЭ на основание, способах защиты ЧЭ от влияния измеряемой среды. Следует отметить, что технологический процесс изготовления тензопреобразователей на основе монокристаллического кремния достаточно сложный, требующий специального оборудования и соответствующих условий производства.



Однако, такие затраты окупаются тем, что изготовление ЧЭ производится методом групповой технологии, в результате которой за один технологический цикл можно получить несколько десятков сформированных тензопреобразователей.

В настоящее время в Украине предприятием НПО «Полюс» (г. Винница) разработан технологический процесс изготовления интегральных тонкопленочных и диффузионных тензометрических преобразователей давления на основе монокристаллического кремния. Изготовлены опытные образцы тензопреобразователей давления чувствительным элементом давления, в которых является интегральная композитная тонкопленочная структура на основе поликремниевых пленок с необходимыми пьезорезистивными свойствами. Конструктивно пленки размещены на монокристаллической кремниевой основе, которая одновременно является упругим элементом воспринимающим давление измеряемой среды [2]. В настоящей работе рассматривается возможность применения, тензопреобразователей, описанных в работе [2], для использования их в составе ВИПД.

Второй, не менее серьезной проблемой при разработке ВИПД, является защита интегрального ЧЭ от влияния внешней измеряемой среды, в том числе, и агрессивной (кислоты, щелочи, спирты, бензины и т.д.).

Традиционно, эта проблема решается путем применения в составе конструкции сенсора давления (СД) разделительной мембраны, изготовленной из специальных металлических сплавов или таких металлов, как Тантал, Монель и других.

Такие разделительные мембраны присущи всем без исключения производителям ВИПД, таким как EMERSON, HONEYWEL (США), YOKOGAWA (Япония).

В конструкциях сенсоров давления с применением РМ давление среды передается РМ через инертную силиконовую жидкость на ЧЭ. Это позволяет измерить давление агрессивных сред (жидкостей и газов) при этом исключается влияние измеряемой среды на ЧЭ.

РМ и жидкость, заполняющая внутренний объем сенсора давления, вносят дополнительную погрешность в общую погрешность преобразователя ВИПД [3]. Это обусловлено изменением свойств заполняющей жидкости в рабочем диапазоне температур ВИПД и жесткостью самой РМ.

В работе [3] проведен анализ погрешности, вносимой РМ и заполняющей жидкости с учетом влияния деформации тензометрического ЧЭ.

Произведена численная оценка погрешности, вносимой РМ и заполняющей жидкости. Как следует из [3], РМ является источником основной и дополнительной температурной погрешностей преобразователя давления, при этом основная

погрешность пропорциональна отношению жесткостей РМ и диафрагмы тензометрического ЧЭ. Эта погрешность может быть учтена в процессе калибровки ВИПД [3].

Температурная погрешность преобразователя с РМ обусловлена объемным температурным расширением заполняющей жидкости, что приводит к появлению дополнительной погрешности преобразователя давления. Эта погрешность имеет нелинейный и несистематический характер, в связи с чем, её трудно учесть в процессе калибровки ВИПД, потому ее, как правило, нормируют производители ВИПД на узком интервале температур. Например, для фирмы EMERSON (США) этот интервал составляет $\Delta T = 28^\circ\text{C}$.

Авторами предложен нетрадиционный подход к защите ЧЭ от влияния измеряемой среды, который исключает появление дополнительной погрешности, вносимой РМ и заполняющей жидкости в погрешность преобразователя давления. Суть этого подхода заключается в замене металлической разделительной мембраны полимерной пленкой, с соответствующими механическими, физическими и химическими свойствами. Такие полимерные пленки (в отличие от металлических РМ) не имеют жесткости, что исключает появление погрешности обусловленной этим фактором. В конструкции сенсора давления полимерная пленка закреплена нежестко (плавающая), что приводит к минимизации погрешности при температурном расширении заполняющей жидкости. Дополнительным преимуществом такого способа защиты ЧЭ является то, что размеры полимерного разделителя могут не превышать размеров самого кремниевого ЧЭ, что объясняется эластичностью полимерной пленки. Диаметр таких разделительных элементов не превышает $\varnothing 10$ мм. В результате, основные технические характеристики такого сенсорного элемента, определяются только техническими характеристиками интегрального кремниевого ЧЭ, что практически невозможно при использовании металлических РМ.

Авторами разработана конструкция сенсорного элемента давления с полимерным разделителем. В качестве ЧЭ давления в конструкции использован интегральный тонкопленочный тензопреобразователь на основе монокристаллического кремния, описанный в работе [2]. На базе этого сенсорного элемента разработан и изготовлен высокоточный измерительный преобразователь абсолютного давления с верхним пределом измеряемого давления $P_{\text{max}} = 400$ кПа с выходным унифицированным токовым 4...20 мА и цифровым выходным сигналами, с функцией и цифровой связью по HART протоколу. Проведены экспериментальные исследования опытного образца ВИПД. Определены основные метрологические характеристики ВИПД.

Результаты экспериментального исследования опытного образца ВИПД

Разработанный ВИПД откалиброван в температурном диапазоне от -40°C до $+60^{\circ}\text{C}$ в температурных точках: -40°C ; -30°C ; -20°C ; -10°C ; $+3^{\circ}\text{C}$; $+20^{\circ}\text{C}$; $+60^{\circ}\text{C}$. Результаты поверки ВИПД по току

и цифре в температурных точках калибровки приведены в табл. 1–6.

Результаты расчета максимальной основной приведенной и дополнительной температурной погрешности приведены в табл. 7.

Результаты поверки ВИПД по току и цифре при температуре $T_{oc} = +60^{\circ}\text{C}$.

Таблица 1

$P_{обр}$, кПа	99,69	149,11	199,33	249,49	299,65	349,78	399,90	γ_{pmax} %	γ_{Imax} %
$P_{изм}$, кПа	99,62	149,02	199,23	249,37	299,48	349,58	399,69		
Δ_p , кПа	- 0,07	- 0,09	- 0,1	- 0,12	- 0,17	- 0,2	- 0,21	- 0,05	
$I_{обр}$, мА	7,988	9,964	11,973	13,980	15,986	17,991	19,996		
$I_{изм}$, мА	7,983	9,956	11,963	13,968	15,974	17,979	19,998		
Δ_I , мА	- 0,05	- 0,008	- 0,010	- 0,012	- 0,012	- 0,012	- 0,08		- 0,075

Результаты поверки ВИПД по току и цифре при температуре $T_{oc} = +40^{\circ}\text{C}$

Таблица 2

$P_{обр}$, кПа	99,66	149,10	199,30	249,48	299,64	349,76	399,98	γ_{pmax} %	γ_{Imax} %
$P_{изм}$, кПа	99,70	149,15	199,34	249,53	299,69	349,82	399,92		
Δ_p , кПа	+ 0,04	+ 0,05	+ 0,04	+ 0,05	+ 0,05	+ 0,06	+ 0,04	+0,015	
$I_{обр}$, мА	7,986	9,964	11,972	13,979	15,986	17,990	19,995		
$I_{изм}$, мА	7,986	9,962	11,968	13,975	15,983	17,990	19,999		
Δ_I , мА	0,0	- 0,002	- 0,004	- 0,004	- 0,003	0,0	0,004		- 0,025

Результаты поверки ВИПД по току и цифре при температуре $T_{oc} = +20^{\circ}\text{C}$

Таблица 3

$P_{обр}$, кПа	99,71	149,25	199,46	249,62	299,78	349,89	400,02	γ_{pmax} %	γ_{Imax} %
$P_{изм}$, кПа	99,78	149,31	199,52	249,70	299,84	349,97	400,08		
Δ_p , кПа	+ 0,07	+ 0,06	+ 0,06	+ 0,08	+ 0,06	+ 0,08	+ 0,06	0,02	
$I_{обр}$, мА	7,988	9,970	11,978	13,985	15,991	17,996	20,001		
$I_{изм}$, мА	7,987	11,968	11,975	13,982	15,990	17,995	20,000		
Δ_I , мА	- 0,01	- 0,002	- 0,03	- 0,003	- 0,001	- 0,001	- 0,001		0,02

Результаты поверки ВИПД по току и цифре при температуре $T_{oc} = +3^{\circ}\text{C}$



Таблица 4

$P_{обр}, \text{кПа}$	98,17	147,72	197,92	248,08	298,21	348,32	399,43	$\gamma_{pmax} \%$	$\gamma_{I_{max}} \%$
$P_{изм}, \text{кПа}$	98,15	147,66	197,89	248,07	298,24	348,36	398,48		
$\Delta p, \text{кПа}$	-0,02	-0,06	-0,03	-0,01	+0,03	+0,04	+0,05	0,015	
$I_{обр}, \text{мА}$	7,927	9,909	11,917	13,923	15,928	17,933	19,937		
$I_{изм}, \text{мА}$	7,924	9,902	11,912	13,919	15,926	17,934	19,940		
$\Delta I, \text{мА}$	-0,003	-0,007	-0,005	-0,004	-0,002	0,001	-0,003		0,04

Результаты поверки ВИПД по току и цифре при температуре $T_{oc} = -20^\circ\text{C}$

Таблица 5

$P_{обр}, \text{кПа}$	98,12	147,73	197,93	248,06	298,19	348,27	398,37	$\gamma_{pmax} \%$	$\gamma_{I_{max}} \%$
$P_{изм}, \text{кПа}$	97,98	147,53	197,74	247,94	298,07	348,18	398,28		
$\Delta p, \text{кПа}$	-0,14	-0,2	-0,19	-0,12	-0,12	-0,09	-0,09	-0,05	
$I_{обр}, \text{мА}$	7,925	9,909	11,917	13,922	15,928	17,931	19,935		
$I_{изм}, \text{мА}$	7,917	9,899	11,907	13,914	15,921	17,927	19,935		
$\Delta I, \text{мА}$	-0,002	-0,010	-0,010	-0,008	-0,007	-0,004	0,0		-0,06

Результаты поверки ВИПД по току и цифре при температуре $T_{oc} = -40^\circ\text{C}$

Таблица 6

$P_{обр}, \text{кПа}$	98,21	147,79	197,98	248,11	298,25	348,30	398,30	$\gamma_{pmax} \%$	$\gamma_{I_{max}} \%$
$P_{изм}, \text{кПа}$	98,01	147,59	198,78	247,95	298,10	348,16	398,16		
$\Delta p, \text{кПа}$	-0,2	-0,2	-0,19	-0,16	-0,15	-0,14	-0,14	-0,048	
$I_{обр}, \text{мА}$	7,928	9,912	11,919	13,926	15,930	17,932	19,938		
$I_{изм}, \text{мА}$	7,916	9,902	11,909	13,918	15,922	17,926	19,932		
$\Delta I, \text{мА}$	-0,012	-0,01	-0,01	-0,008	-0,008	-0,006	-0,006		-0,075

- $P_{обр}, \text{кПа}$ – давление задаваемое образцовым задатчиком давления
 $P_{изм}, \text{кПа}$ – фактическое значение давления измеренное ВИПД
 $\Delta p, \text{кПа}$ – абсолютная погрешность измерения давления по цифре
 $\Delta I, \text{мА}$ – абсолютная погрешность измерения давления по току
 $\gamma_{pmax}, \%$ – максимальная приведенная погрешность измерения давления по цифре
 $\gamma_{I_{max}}, \%$ – максимальная приведенная погрешность измерения давления по току

Результаты расчета максимальной приведенной погрешности γ_{max} преобразователя ВИПД по цифре и току в температурных точках калиб-

ровки в температурном диапазоне от -40°C до $+60^\circ\text{C}$ приведены в табл. 7.

Таблица 7

Температура T_{oc} , °C											
+60°C		+40°C		+20°C		+3°C		-20°C		-40°C	
γ_{pmax} %	γ_{Imax} %	γ_{pmax} %	γ_{Imax} %	γ_{pmax} %	γ_{Imax} %	γ_{pmax} %	γ_{Imax} %	γ_{pmax} %	γ_{Imax} %	γ_{pmax} %	γ_{Imax} %
0,05	0,075	0,015	0,025	0,02	0,02	0,015	0,04	0,05	0,06	0,048	0,075

Основная приведенная погрешность измерения давления соответствует температуре $T_{oc} = +20 \pm 2^\circ\text{C}$.

Выводы

Разработанный высокоточный интеллектуальный измерительный преобразователь давления (ВИПД) отвечает по точности самым высоким требованиям, предъявляемым к современным приборам.

Основная приведенная погрешность измерения давления по току и цифре не превышает значения $\gamma_{осн} = 0,02\%$, что практически пятикратно превышает заявленную точность ВИПД равную $\gamma_{осн} = \pm 0,1\%$. Дополнительная температурная погрешность измерения давления в рабочем диапазоне температур $T_{oc} = -40^\circ\text{C}$ до $+60^\circ\text{C}$ не превышает значения $\gamma_{доп} = 0,075\%$, что также превышает заявленную погрешность $\gamma_{доп} = \pm 0,1\%$. ВИПД обеспечивает работу, как в токовом, так и в цифровом режимах.

ВИПД обеспечивает возможность калибровки в различных температурных точках в широком диапазоне рабочих температур -40°C до $+60^\circ\text{C}$.

ВИПД имеет минимальные габариты и вес и может быть классифицирован как алогабаритный:

- габаритные и присоединительные размеры не более 150x130x80 мм;

- масса не более 0,6 кг.

Разработанный интеллектуальный ВИПД на базе сенсора украинского производителя может быть рекомендован при организации серийного производства недорогих и точных приборов.

ВИПД может найти широкое применение в различных отраслях промышленности.

Литература

1. *Каталог EMERSON*. Датчики давления. Выпуск 7/2008. Шарин М. М., Коваленко К. Л. та інш.: Інтегральна композитна тонко плівкова структура як чутливий елемент тензоперетворювача / Матеріали X Міжнародної конференції / 16–21 травня 2005, м. Івано-Франківськ.
2. *Бабичев Г.Г., Зипченко Э.А., Козловский С.И., Романов В.А., Шаран Н.Н.* Минимизация погрешности интегрального преобразователя давления с разделительной мембраной // ТКЭА. —2006. — № 2. — С. 36–38.