



УКРАЇНА

(19) UA (11) 59936 (13) A

(51) 7 G01L9/08, G01L9/12

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІОПИС
ДО ДЕКЛАРАЦІЙНОГО ПАТЕНТУ
НА ВІНАХІДвидається під
відповідальність
власника
патенту

(54) ДАТЧИК ТИСКУ

1

2

(21) 2002129829

(22) 09 12 2002

(24) 15 09 2003

(46) 15 09 2003, Бюл. № 9, 2003 р.

(72) Колпаков Федір Федорович, Акуліничев Артем
Аркадійович, Підченко Сергій Константинович,
Таранчук Алла Анатолійовна

(73) ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ПОДІЛЛЯ

(57) 1 Датчик тиску, який містить основу, кришку зі
штуцером з різьбою і плоский круглий п'єзоеле-
мент АТ-зрізу з електродом на його поверхні, обе-
рненої до основи, зашпелений між кришкою і ос-
новою, який відрізняється тим, що в нього додат-

кова введені обойма, яка містить співвісні внутрі-
шню проточку і наскрізний отвір, поперечні бокові
вибірки, що утворюють дві пари діаметрально про-
тилежних опорних виступів, причому кожен виступ
пари зміщений відносно іншого на 60°, кришка, яка
містить циліндричний виступ зі сторони, оберненої
до п'єзоелемента, а згадані обойма, кришка і ос-
нова з'єднані між собою легкопресовою посадкою.

2 Датчик тиску по п. 1, який відрізняється тим, що
в нього додатково введена гайка налагодження,
яка має різьбове з'єднання зі штуцерною частиною
кришки, а основа штуцерної частини містить кіль-
цеву проточку

Запропонований винахід відноситься до кон-
тролю-вимірювальної техніки, зокрема до п'єзо-
резонансних датчиків тиску з частотним виходом, і
може бути використаний в медицині для вимірю-
вання тиску пульсової хвилі (динамічного тиску)
під час проведення сфінгографічних досліджень
серцево-судинної системи людини.

Відомий п'єзореzonансний датчик тиску, який
містить корпус з металевою мембраною та диско-
вий кварцовий п'єзоелемент АТ-зрізу, що встанов-
лений паралельно мембрані з утворенням зазору і
доповнений електродом на поверхні, яка проти-
лежна мембрані [1].

Недоліком цього пристрою є низька точність,
яка обумовлена гістерезисом датчику із-за недос-
коналості кріплення металевої мембрани до кор-
пусу, а також високою похибкою встановлення
початкового зазору між мембраною і кварцовим
п'єзоелементом.

Відомий датчик тиску, що містить корпус, пло-
ску чи гофровану мембрану з жорстким центром з
електропровідного матеріалу і дисковий плоско
випуклий кварцовий п'єзоелемент АТ-зрізу, який
звернений плоскою поверхнею до плоскості мем-
брани і доповнений електродом на випуклій пове-
рхні [2].

Основним недоліком цього пристрою також є
невелика точність, що зумовлена похибкою за-
вдання початкового зазору і складністю встанов-
лення плосковипуклого кварцового п'єзоелемента
паралельно мембрані. Окрім цього, при викорис-
танні даного п'єзоелементу, суттєво зменшується

розрізнявальна здатність датчика за рахунок того,
що ємнісне відношення m плоско випуклого п'єзо-
елемента на першій механічній гармоніці в 2,3-3,2
рази менше, чим у плоского, причому це зниження
тим більше, чим більше кривизна сфери лінзи.

В якості пристрою - прототипу вибраний дат-
чик повітряного тиску [3, Crystal pressure cup for
differential air loading / E. A. Roberts, P. Goldsmith -
Опубл. в Electronical Engineering V70, 1951, pp 776],
який містить кришку зі штуцером для подачі пові-
тряного тиску, основу і зашпелений між кришкою та
основою дисковий плоский кварцовий п'єзоеле-
мент АТ-зрізу з електродами на обох поверхнях.

Недоліком пристрою - прототипу є недостатня
розрізнявальна здатність при вимірюванні динамі-
чного (пульсового) тиску, яка обумовлена малою
перестройкою частоти в діапазоні вимірюваних
тисків, що являється наслідком малої тензочутли-
вості п'єзоелемента [4, Малов В. В. Пьезорезонанс-
ные датчики. М., 1989, с. 73]. Окрім цього, різниця
температурних коефіцієнтів лінійного розширення
п'єзоелемента, кришки та основи призводить до
збільшення температурної похибки за рахунок
термомеханічних напружень та проявлення неінфор-
мативного ефекту тензочутливості кварцової ре-
зонуєючої мембрани, що призводить до додаткової
перестройки частоти, причому при малих вимірю-
ваних тисках величини інформаційної та неінфор-
маційної перестройок частот становляться зрівня-
льними.

Низька розрізнявальна здатність пристрою -
прототипу пояснюється наступним чином:

(13) A
(11) 59936
(19) UA

Прикладений до пристрою - прототипу надлишковий повтряний тиск викликає малий прогин (на порядок менше його товщини) плоского дискового п'єзоелемента АТ-зрізу, а в його площині виникають механічні напруги розтягу - стиску, які призводять до зміни власної резонансної частоти п'єзоелемента. Величина цієї зміни визначається коефіцієнтом інтегральної тензочутливості п'єзоелемента, значення якої у відповідності до [4] визначається виразом

$$K^J = \frac{\partial f}{f_0 \cdot \partial P} = \frac{N}{2} \int_0^\pi K_f(\psi) d\psi, \quad (1)$$

де N - частотна постійна (для п'єзоелемента

АТ- зрізу $N = 1670 \frac{\text{кГц}}{\text{мм}}$ [4],

K_f - коефіцієнт Ратайського,

ψ - азимут навантаження,

f_0 - власна резонансна частота п'єзоелемента ($f_0 = 10 \text{ МГц}$),

P - тиск стиснення

Для даного виду навантаження п'єзоелементу, у відповідності з [4, стр 74], одержимо

$$K^J = 2,8 \cdot 10^{-11} \frac{\text{м}^2}{\text{н}}$$

Формулу (1) можна представити у вигляді

$$K^J = \frac{\partial f}{f_0 \cdot \partial P} = \frac{S}{f_0},$$

де $S = \frac{\partial f}{\partial P}$ - крутизна характеристики перетворення

Із (2) знаходимо значення S для п'єзоелемента з інтегральним механічним навантаженням

$$S = K^J \cdot f_0 = 2,8 \cdot 10^{-4} \frac{\text{м}^2 \cdot \text{Гц}}{\text{н}} = 0,0372 \frac{\text{Гц}}{\text{мм рт ст}}$$

Розрізнявальна здатність кварцового датчика тиску з частотним виходом визначається відношенням

$$r = \frac{\Delta f}{S},$$

де Δf - абсолютна нестабільність частоти генерації, яка викликана неінформаційними факторами (варіація температури, напруги живлення та т.)

Приймаючи величину відносної нестабільності частоти генерації, рівній $5 \cdot 10^{-8} \text{ Гц}$, величина Δf , при частоті генерації 10 МГц , складе $0,5 \text{ Гц}$. У відповідності з (3) розрахуємо значення розрізнявальної здатності тензочутливого кварцового датчика тиску з інтегральним механічним навантаженням - $r = 13,44 \text{ мм рт ст}$

Виконаний розрахунок підтверджується приведеною в [3, с 778, fig 5] градувальною характеристикою пристрою - прототипу, по якій визначається величина розрізнявальної здатності. В діапазоні прикладених тисків $P \in [0, 300] \text{ мм рт ст}$ розрізнявальна здатність пристрою - прототипу змінюється від 112 мм рт ст на початку характеристики до $1,5 \text{ мм рт ст}$ при максимальному навантаженні п'єзоелемента

Таким чином, пристрій - прототип має недостатню для вимірювання динамічного (пульсового)

тиску розрізнявальну здатність. Пропонуємоїм пристрій не має цього недоліку, що підтверджується як теоретичним аналізом, так і експериментальним макетуванням

В основу винаходу поставлена задача підвищення точності вимірювань

Поставлена задача підвищення точності вирішується тим, що у запропонованому пристрої додатково введені, обойма, що містить співвісні внутрішню проточку та наскрізний отвір, поперечні бокові вибірки, що утворюють дві пари діаметрально протилежних опорних виступів, кожен з яких зміщений відносно іншого на 60° , кришка, яка містить циліндричний виступ зі сторони, оберненої до п'єзоелемента, і кільцеву проточку у основі штуцера з другого боку, гайка настроювання, яка має нарізне з'єднання зі штуцером кришки, дозволяють отримати позитивний ефект без суттєвого ускладнення конструкції датчика та надають суттєві відмінності пристрою, який заявляється, так як дані признаки відсутні в відомих технічних рішеннях

Це пояснюється наступним чином

1 Введення в конструкцію датчика обойми та кришки дозволяє отримати високу крутизну перетворення датчика та зниження температурної похибки

Поверхні кришки та основи, які обернені в сторону п'єзоелемента, мають високу площинність та чистоту обробки, що забезпечено шліфівкою, притиркою або доводкою. Це, в процесі зборки датчика, дозволяє забезпечити жорстке заземлення п'єзоелемента між кришкою та основою з великою силою притискання. Оскільки ця сила рівномірно розподіляється по опорним поверхням п'єзоелемента, кришки та основи, то забезпечується відсутність концентраторів механічної напруги у п'єзоелементі і усування небезпеки його руйнування. При такому заземленні п'єзоелемента, останній виконує роль резонуючої мембрани, п'єтерезис якої, враховуючи високі пружні характеристики кварцу, практично дорівнює нулю

У відомому пристрої, взятому за прототип, відмінність температурних коефіцієнтів лінійного розширення п'єзоелемента та металічних елементів його заземлення призводить до збільшення температурних похибок за рахунок термомеханічних напруг та проявлення ефекту тензочутливості резонуючої мембрани

В пропонуємому пристрої температурна похибка суттєво зменшена завдяки двом особливостям конструкції датчика тиску. По-перше, поверхні п'єзоелемента і металічні поверхні, які його заземляють, мають малі шорсткості, тому сили тертя, які виникають із-за відмінності температурних коефіцієнтів, малі. Отже, додаткова термомеханічна похибка датчика суттєво знижена

По-друге, головні термомеханічні напруги системами "обойма-кришка-п'єзоелемент-основа" зорієнтовані так, що діють в азимутах п'єзоелемента, для яких коефіцієнт Ратайського дорівнює нулю. Це означає, що в ідеальному випадку ця складова температурної похибки дорівнює нулю, а практично - дуже мала

В зібраній конструкції передбачується герметизація камери тиску шляхом заповнення бокових вибірок у обоймі силіконовим герметиком. Це до-

зволяє зберегти герметичність камери тиску, яка утворена обоймою, кришкою та п'єзоелементом, при відсутності відчутного механічного тиску на вільну від прямого механічного контакту з обоймою поверхню п'єзоелемента за зміни температури зовнішньої середовища.

2 Введення в конструкцію датчика гайки налагодження дозволяє здійснити механічну підстройку датчика.

Співвісні внутрішня проточка і наскрізний отвір, що містяться в обоймі, утворюють опорний виступ, за допомогою якого в процесі зборки відбувається фіксація кришки, яка має на своїй зовнішній поверхні зустрічну вибірку. Кільцева проточка в основі штуцерної частини кришки утворює кільцевий пружний шарнір, який допускає пружне переміщення циліндричного виступу кришки, обертеного в сторону п'єзоелемента, відносно гайки налаштування, встановлюючи тим самим необхідний початковий зазор між поверхнею п'єзоелемента та корпусним електродом. Це призводить до підстройки резонансної частоти датчика в межах заданого допуску.

Таким чином, можливість механічної підстройки датчика дозволяє суттєво звузити область розсіювання індивідуальних градувальних характеристик від зразка до зразка, що підвищує точність характеристики серійних зразків.

Суть винаходу пояснюється кресленнями, на яких приведені конструкція датчика (фіг 1) та основного елементу його конструкції - обойми (фіг 2).

Пропонуємий датчик тиску містить защемлений між встановленими у обоймі 4 кришкою 1 і основою 7 п'єзоелемент 5, причому останні з'єднані з обоймою 4 легкопресовою посадкою.

Обойма 4 виконана із м'якого металу, наприклад латуні, містить внутрішню вибірку і наскрізний отвір, що утворюють опорний виступ 13. Наявність внутрішньої вибірки забезпечує легкопресову посадку в ній кришки 1 і основи 7. Обойма 4 також містить поперечні бокові вибірки, що утворюють дві пари діаметрально протилежних опорних виступів 15, причому кожен виступ пари зміщений відносно другого на 60° . По бісектрисі кута 60° на боковій поверхні обойми 4 виконана проточка 14, що являється "ключем" для точної орієнтації п'єзоелемента 5 відносно опорних виступів 15 по його кристалграфічній вісі Z'.

Кришка 1 і основа 7 виконані із сплаву 36НХТЮ, при цьому поверхні останніх, стикненні з п'єзоелементом 5, мають високу площинність та чистоту механічної обробки. Кришка 1 зі сторони, оберненої до п'єзоелемента 5, містить циліндричний виступ 6, який виконує функцію нерухомого електрода 3 протилежного п'єзоелементу 5. Сторони кришки містять зустрічну опорному виступу 13 обойми 4 вибірку 12 і штуцерну частину для подачі повтряного тиску у камеру тиску датчика, обмежену п'єзоелементом 5 та внутрішньою поверхнею кришки 1. Штуцерна частина має різьбу для з'єднання з гайкою налагодження 2, а в її основі виконана кільцева проточка 3, що утворює кільцевий пружний шарнір. В донній частині основи 7 виконані два отвори.

Один з цих отворів, через який виведений потенціальний вивід 9, розташований на поверхні

п'єзоелемента 5 рухомого електрода 10, заповнено ущільнювачем 8. Другий отвір забезпечує зв'язок внутрішнього об'єму датчика з зовнішньою середовищем. Після зборки датчика, бокові вибірки, які виконані у обоймі 4, заповнюються герметиком 11, завдяки чому досягається герметизація камери тиску.

Датчик повтряного тиску, який заявляється, працює наступним чином. При відсутності надлишкового по відношенню до атмосферного тиску повтря у камері тиску, обмеженою п'єзоелементом 5 і внутрішньою поверхнею кришки 1, деформацій п'єзоелемента 5, яка виконує роль резонуючої мембрани, не відбувається, так як внутрішній об'єм основи 7 не герметизований і тиск на п'єзоелемент 5 з обох сторін однаковий. Кварцовий резонатор, утворений п'єзоелементом 5 і циліндричним виступом 6, оберненим до п'єзоелемента 5, та ввімкнений в схему автогенератора первинного вимірювального перетворювача потенціальним виводом 9 і корпусним загальним виводом датчика (на фіг 1 не показаний) збуджується на частоті, яка відповідає нульовому надлишковому тиску. З виходу автогенератора знімається інформаційний сигнал, частота якого f_0 відповідає початку градувальної характеристики датчика. За тиску у камері тиску, який перевищує повтряний, відбувається малий прогин п'єзоелемента 5, зацмленого між кришкою 1 та основою 7, в результаті чого величина зазору між вільною поверхнею п'єзоелемента і поверхнею циліндричного виступу 6 збільшується, що призводить до збільшення частоти $f(P)$. Величина прогину п'єзоелемента 5 визначається у відповідності до [5] наступним чином:

$$w(x, y) = w_0 \left(1 - \frac{x^2 + y^2}{r^2} \right)^2, \quad (4)$$

$$w_0(p) = P \cdot \left(4 \cdot h^3 \cdot \left[\frac{C_{11}}{r^4} + \frac{C_{11} + 2 \cdot C_{44}}{3 \cdot r^4} \right] \right)^{-1}, \quad (5)$$

де g - радіус поверхні мембрани, вільної від защемлення,

h - товщина мембрани,

C_{11}, C_{12}, C_{44} - модулі пружності кварцу,

x, y - координати точок мембрани.

Крім того, наслідком прогину п'єзоелемента 5 є виникнення в останньому механічних напруг розтягу - стиску, що також призводить до зміни частоти $f(P)$ у зв'язку з проявленням механізму тензочутливості п'єзоелемента 5.

В результаті, мають місце два механізми керування частотою кварцового резонатора: ємнісне керування, за рахунок зміни величини зазору між вільною поверхнею п'єзоелемента та поверхнею циліндричного виступу 6, і керування на основі ефекту тензочутливості. Вкладом в керування частотою за рахунок останнього по зрівнянню з першим можна зневажити. Тому форма градувальної характеристики датчика визначається механізмом ємнісного керування у відповідності до формули

$$f(w) = f_0 \sqrt{1 + \frac{m}{1 + \frac{h_{ne}}{\varepsilon_{ne} w}}} \approx f_0 \left[1 + \frac{0,5m}{1 + \frac{h_{ne}}{\varepsilon_{ne} w}} \right], \quad (6)$$

f_0 - номінальна частота коливальної системи при $w=0$,

h_{ne} - частотний визначний розмір п'єзоелемента (товщина),

m - ємнісне відношення

Цей вираз може бути з великою степенем точності апроксимований дрібно - лінійною функцією першого порядку

$$f(p) = \frac{a_0 + a_1 \cdot P}{1 + a_2 \cdot P}, \quad (7)$$

де a_0, a_1, a_2 - коефіцієнти апроксимації,

P - прикладений тиск

Макетний зразок запропонованого датчика тиску містить защемлений між встановленими в обоймі кришкою і основою дисковий плоский п'єзоелемент АТ-зрізу діаметром 18мм та товщиною $h_{ne}=169\text{мкм}$, що відповідає частоті $f_0=10\text{МГц}$. Поверхня п'єзоелемента, яка обернена в сторону основи, містить електрод виду "замочная скважина" з діаметром 8мм

В ході експерименту до макетного зразка прикладався тиск від 0 до 300мм рт ст

У відповідності до (4) була визначена максимальна величина прогину п'єзоелемента, яка склала 16,23мкм, що на порядок менше його товщини

По експериментально отриманій градувальній характеристиці макетного зразка запропонованого датчика тиску визначені

- величина розрізняльної здатності в діапазоні прикладених тисків $p \in [0, 300]\text{мм рт ст}$ змінюється від 0,008мм рт ст на початку характеристики до 0,024мм рт ст при максимальному прикладеному тиску,

- повна перестройка частоти складає 9,5кГц, що перевищує величину перестройки частоти пристрою - прототипу більш ніж в 150 разів,

величина гістерезису після максимального навантаження не перевищує 2Гц,

- коефіцієнти апроксимації, які визначаються у відповідності до (7), складають

$$a_0 = 1938,87\text{Гц}, a_1 = 63,95\text{Гц} / \text{ммрт ст}, a_2 = 0,002308 / \text{ммрт ст}$$

Практично повна відсутність гістерезису, термомеханічної похибки, стабільність характеристики перетворення і можливість оптимального вибору початкового зазору забезпечують значне підвищення точності і розрізняльної здатності пропонуємого датчика в порівнянні з відомим Це, в свою чергу, дозволяє суттєво підвищити достовірність сфигмометричних досліджень стану серцево-судинної системи людини за допомогою комп'ютерних методів

Література

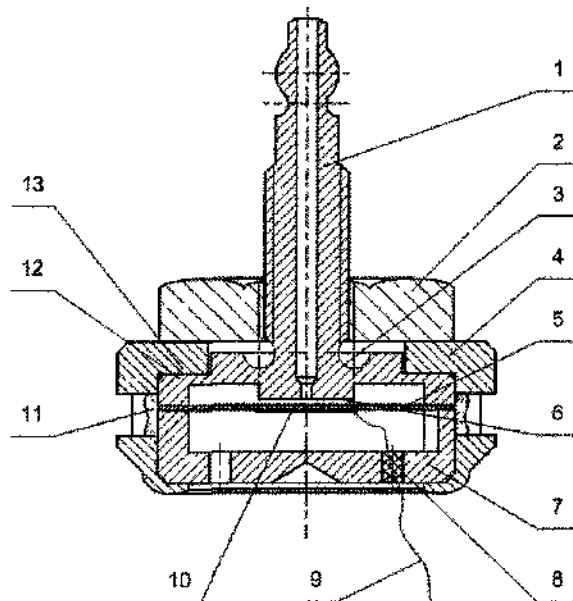
1 Вильшук В А, Фроловский С И Пьезорезонансные датчики с переменным зазором // Пьезо и акустоэлектронные устройства - Омск ОМПИ, 1981, С 102-105

2 А с СССР №1326921 G01L11/00, 9/8 Пьезорезонансный датчик давления / Ю С Шмалый и др - Опубл в Б И №28, 1987

3 E A Roberts, P Goldsmith Crystal pressure cup for differential air loading / Electrical Engineering V70, 1951, pp 776-780

4 Малов В В Пьезорезонансные датчики М Энергоатомиздат, 1989 - 272с

5 Мюллер В Экспресс-информация Сер Контрольно-измерит техника Интегральные измерительные преобразователи давлений с полупроводниковыми мембранами и тензорезисторами - 1984 №19, стр 9-17



Фиг. 1

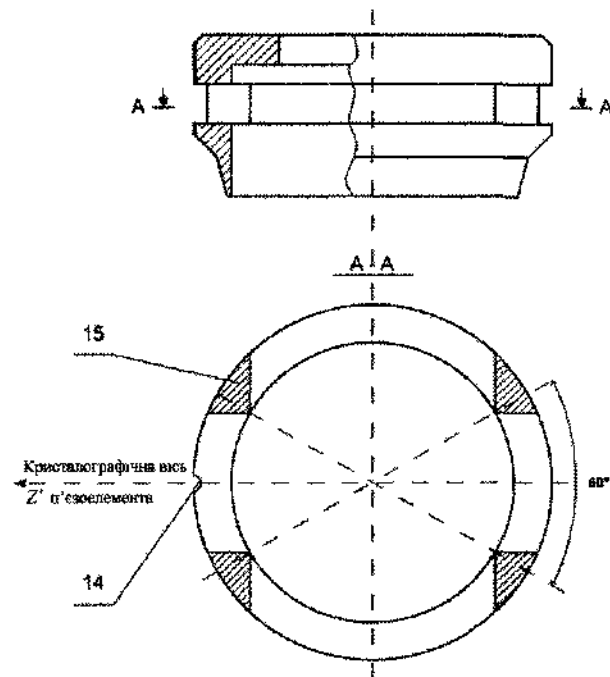


Fig. 2