

## ДЕГРАДАЦІЯ, МЕТРОЛОГІЯ І СЕРТИФІКАЦІЯ СЕНСОРІВ

## SENSOR'S DEGRADATION, METROLOGY AND CERTIFICATION

---

---

УДК 531.768

### ВИПРОБУВАННЯ МАКЕТУ ДАТЧИКА ТИСКУ З ПНЕВМОМЕХАНІЧНИМ РЕЗОНАТОРОМ

*М. Г. Черняк, О. М. Бондаренко, Г. О. Скрипковський, В. К. Лопушенко*

Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут”,  
м.Київ, пр.Перемоги, 37, т 380(044)4549667, факс 380(044)2417622,  
E-mail: sashbond@ukr.net

#### Анотація

#### ВИПРОБУВАННЯ МАКЕТУ ДАТЧИКА ТИСКУ З ПНЕВМОМЕХАНІЧНИМ РЕЗОНАТОРОМ

*М. Г. Черняк, О. М. Бондаренко, Г. О. Скрипковський, В. К. Лопушенко*

Розглянуто конструкцію, принципи побудови і результати випробувань макету датчика тиску з пневмомеханічним резонатором. Результати показали можливості вимірювання макетом тиску з використанням демпфірування і пружності газу, основна приведена похибка яких не перевищуватиме 0,1%. Розбіжність отриманих експериментально та аналітично коефіцієнтів і характеристик складала менше 20%, що підтверджує розроблену авторами теорію побудови датчиків тиску з пневмомеханічним резонатором.

**Ключові слова:** датчик тиску, пневмомеханічний резонатор, результати випробувань макету.

#### Summary

#### THE BREADBOARD TESTS OF PRESSURE SENSOR WITH A PNEUMOMECHANICAL RESONATOR

*M. G. Chernyak, O. M. Bondarenko, G. O. Skripkovsky, V. K. Lopushenko*

The design, building principles and trial results of the breadboarding for pressure sensor with a pneumomechanical resonator are described. The results are showed possibility to pressure measuring by a gas damping and stiffness with 0,1% errors. Experimental constants and performance are differed from analytical less than 20%. This is confirm theory of the pneumomechanical pressure sensor building.

**Keywords:** pressure sensor, pneumomechanical resonator, the results of breadboard tests.

## Аннотация

## ИСПЫТАНИЯ ДАТЧИКА ДАВЛЕНИЯ С ПНЕВМОМЕХАНИЧЕСКИМ РЕЗОНАТОРОМ

*Н. Г. Черняк, А. Н. Бондаренко, Г. А. Скриповский, В. К. Лопушенко*

Рассмотрена конструкция, принципы построения и результаты испытаний макета датчика давления с пневмомеханическим резонатором. Результаты показали возможности измерения давления с использованием демпфирования и упругости газа с основной приведенной погрешностью меньше 0,1%. Отклонение полученных экспериментально коэффициентов и характеристик от аналитических составило менее 20%, что подтверждает разработанную авторами теорию построения датчиков давления с пневмомеханическим резонатором.

**Ключевые слова:** датчик давления, пневмомеханический резонатор, результаты испытаний макета.

Датчики тиску (ДТ) з пневмомеханічним резонатором (ПМР) володіють високими стабільністю метрологічних характеристик, чутливістю до вимірюваної величини, технологічністю виготовлення. Вони розробляються низкою закордонних фірм: “NASA-Ames” (США) [1, 2], МПКБ “Восход” (Росія) [3-5], “Solartron” (Великобританія) [6], “Fuji Elec. J.” (Японія) [7], і використовуються в аерометричних бортових системах управління і навігації для вимірювання барометричної висоти та повітряної швидкості літальних апаратів, наземній контрольно-перевірочній апаратурі, аеродинамічних трубах, а також в лабораторних дослідженнях для вимірювання інших фізичних параметрів газу.

Авторами статті було розроблено методи розрахунку ДТ з ПМР [8]. Одержані нові теоретичні результати цілком підтверджуються результатами закордонних експериментальних досліджень. Проте для одного з варіантів побудови таких ДТ — з нелінійним опором газообміну між пневмокамерами ДТ і контрольним середовищем [1, 2] — обмаль існуючих експериментальних даних для підтвердження прийнятності для них розроблених методів розрахунку. Крім того, попереднє моделювання показало, що такий варіант побудови ВПТ з ПМР має вищу верхню межу вимірювання і простішу конструкцію у порівнянні з іншими варіантами. Все це спонукало до виготовлення і дослідження на базі Київського політехнічного інституту конструктивно нового макету пневмомеханічного ДТ з нелінійним пневмоопором. Прототипом макету є прилад розробки “NASA-Ames” (США) для аеродинамічних труб [1].

ПМР макету (рис.1) складається із резонуючого елемента (РЕ) 1 і пневмокамери 2 між газонепроникним екраном 3 і РЕ 1. Пневмокамеру відокремлено від зовнішнього середовища нелінійним опором у вигляді вузьких щілин 4 типу отвору в стінці, якими є два паралельні прямі прорізи шириною  $\Delta$  в РЕ. Реалізація в одній деталі прямих прорізів шириною в десятки мікрон набагато технологічніша, ніж реалізація такого ж розміру зазору між двома різними деталями (газонепроникними екранами), використана в прототипі [1].

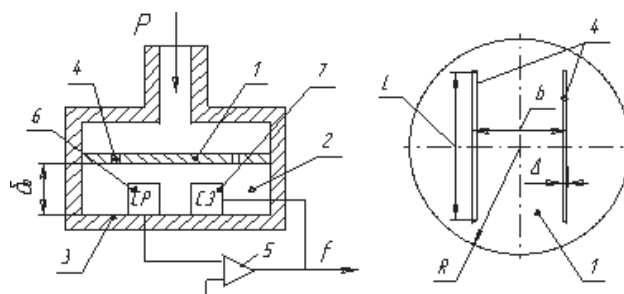


Рис. 1. Функціональна схема датчика тиску

Під час коливань РЕ газ у пневмокамері розширюється чи стискується, намагаючись при цьому відповідно натекти в неї чи витекти. ПМР макету вкладається в контур додатного зв'язку до ширококутового підсилювача 5 за допомогою ємнісної системи реєстрації (СР) 6 та електромагнітної системи збурення (СЗ) 7 коливань РЕ задля утворення автоколивальної системи.

Ширококутовий підсилювач в макеті ДТ реалізовано так. Електрод С1 (рис.2) системи реєстрації живиться генератором, що складається з компаратора на операційному підсилювачі (ОП) DA1 та інтегратора на ОП DA3.

Ємність  $C1$  залежить від прогину резонуючого елемента і визначає коефіцієнт перетворення підсилювача на ОП  $DA2$ . Змінна, з частотою коливаний мембрани, складова напруги на виході підсилювача відокремлюється амплітудним детектором, що складається з діода  $VD1$ ,

опорів  $R5$ ,  $R7$  та конденсатора  $C2$ . Ця змінна складова підсилюється у двокаскадному підсилювачі на ОП  $DA4$ ,  $DA5$ . Обидва каскади побудовані за однаковою схемою фільтра, який має максимальний коефіцієнт підсилення на власній частоті коливаний мембрани.

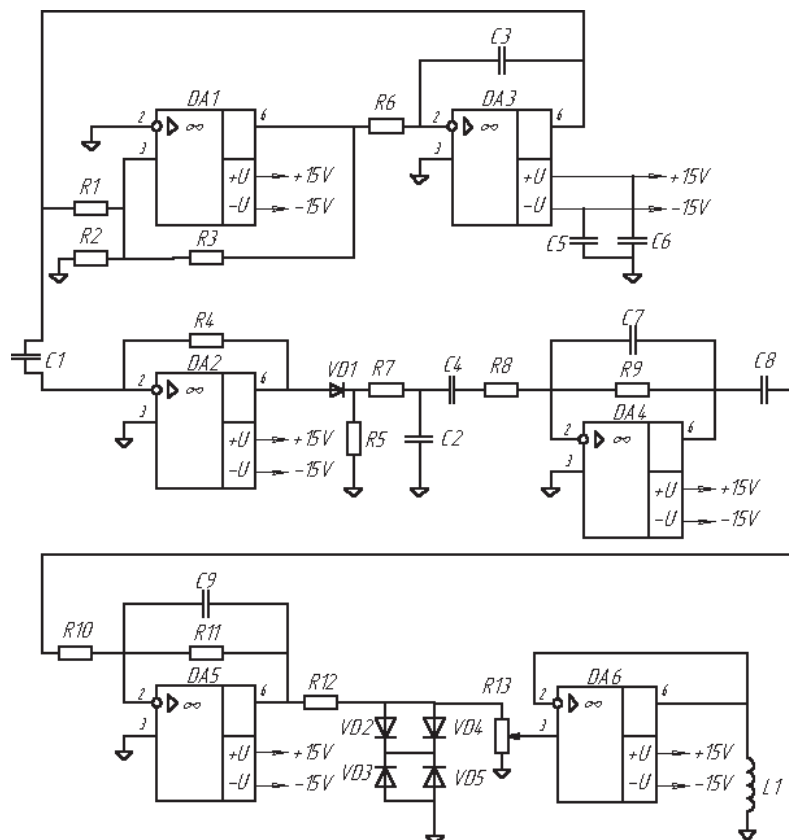


Рис. 2. Принципова електрична схема;  $L1$  — котушка індуктивності;  $C1...9$  — конденсатори;  $R1...13$  — активні опори;  $DA1...6$  — операційні підсилювачі;  $VD1...VD5$  — діоди;  $U$  — напруга живлення

Сигнал з виходу підсилювача потрапляє на вхід нелінійного елемента на опорі  $R12$  на зустрічно-паралельно ввімкнених діодах  $VD2...VD5$ . Такий елемент має коефіцієнт передачі близький до одиниці для малих сигналів, що сприяє виникненню сталих коливаний після ввімкнення живлення ДТ. При збільшенні амплітуди коливаний його коефіцієнт передачі зменшується, що призводить до стабілізації амплітуди коливаний мембрани. Величина амплітуди коливаний мембрани регулюється за допомогою потенціометра  $R13$ , з виходу якого напруга йде до підсилювача потужності на ОП  $DA6$ . Навантаженням ОП  $DA6$  є котушка  $L1$  електромагнітної системи збурення коливаний резонуючого елемента.

Макет (рис.3) функціонував як в режимі демпфування коливаний, так і в режимі приєднаної

жорсткості  $PE$ . В режимі демпфування [1] зміна власної частоти  $f$  ПМР як коливальної ланки в першому наближенні пропорційна коефіцієнту відносного демпфування  $\xi$  (при малих його значеннях, коли  $\xi \ll 1$ ). Завдяки значній величині пневмоопору зазору 4 (рис.1) величина відносного демпфування  $\xi$ , а значить, і зміни частоти ПМР, стають відчутними. Оскільки коефіцієнт  $\xi$  залежить від тиску  $P$ , то і власна частота  $f$  ПМР залежить від тиску  $P$ . В режимі приєднаної жорсткості пневмоопори виконувались настільки великими, щоб газ не встигав натікати в пневмокамеру (чи витікати із неї) за півперіод коливаний  $PE$ . Тоді газ в пневмокамері лише розширюється (чи стискується), збільшуючи загальну жорсткість і власну частоту  $f$  коливаний ПМР. Приєднана жорсткість і частота коливаний ПМР  $f$  залежать від вимірюваного тиску  $P$ .

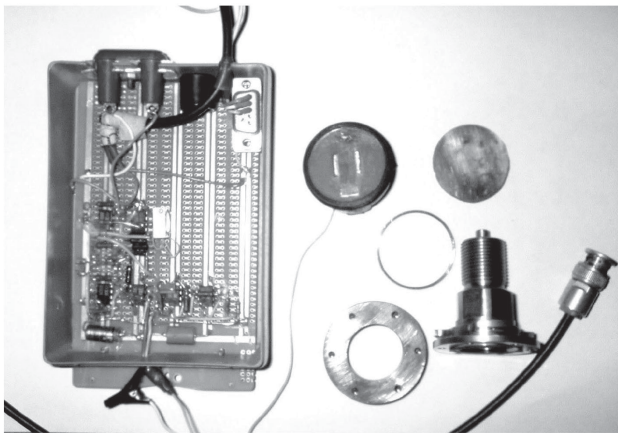


Рис. 3. Елементи макету датчика тиску

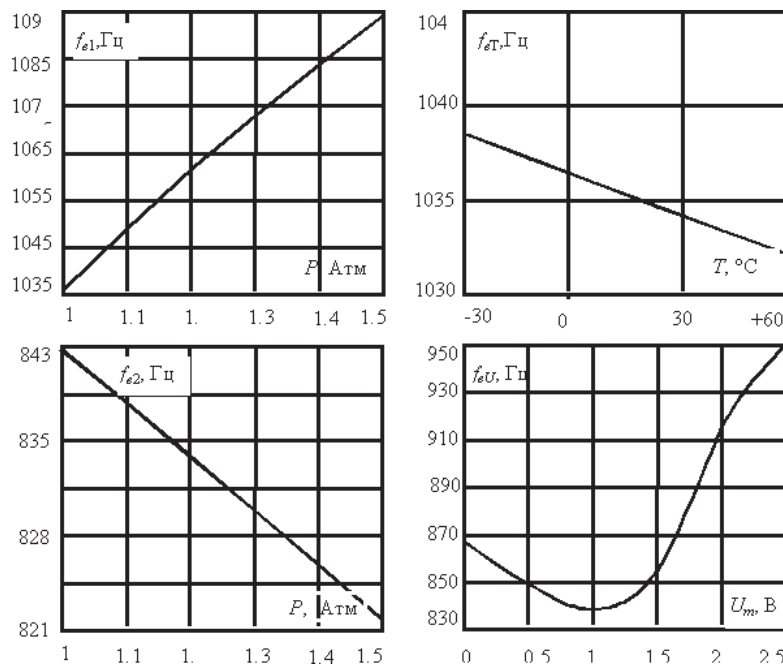


Рис. 4. Експериментальні характеристики макету:  $f_{e1}$  і  $f_{e2}$  — вихідні в режимі приєднаної жорсткості і демпфування;  $f_{eT}$  і  $f_{eU}$  — температурна і від амплітуди напруги системи ресстрації

– температурні характеристики ДТ (рис.4) в термокамері ТВТ-2 в діапазоні температур – 30...+60°C за нормального тиску в 1Атм по прямому та зворотному ходу термокамери;

– числовий коефіцієнт умови роботоздатності по точці перелому характеристики залежності (рис.4) вихідної частоти від амплітуди коливань РЕ (амплітуди  $U_m$  змінної напруги на електродах системи ресстрації);

– нестабільність вихідної частоти ДТ в нормальних умовах (температурі 20°C):

а) короткострокова протягом 1 хвилини по 10 точках,

Перехід з режиму демпфування в режим приєднаної жорсткості здійснювався зменшенням прорізів  $\Delta$  від 70 до 40 мкм (шляхом заміни РЕ), введенням додаткової прокладки товщиною 0,3 мм для збільшення товщини пневмокамери  $\delta_0$  (рис.3) і збільшенням амплітуди  $w_m$  коливань РЕ майже вдвічі. Контроль амплітуди  $w_m$  здійснювався по величині максимальної напруги  $U_m$  на електродах системи ресстрації, яка становила від 0,5 до 2,5 В.

Експериментально визначались:

– вихідні характеристики ДТ (рис.4) на задавачу повітряного тиску АЗД-2,5Т16, який згідно паспорту має похибку 0,25%, в діапазоні тиску  $P=1...1,5$ Атм по прямому та зворотному ходу при нормальній температурі 20°C;

б) режимна протягом 10 годин по 10 точках, в) довгострокова протягом 10 днів по 10 точках.

Статистична обробка результатів еспериментальних досліджень (таблиця 1) макету показала, що вони близькі до результатів попередніх теоретичних досліджень.

Виявлені в результаті випробувань характеристики ДТ (дев'яції частоти в діапазоні вимірювання 1...1,5 Атм склали до 100Гц, температурні похибки на рівні 5% від верхньої межі вимірювання та нестабільність нижче 0,5 Гц) є достатньо високими як для першого макету,

до того ж з окремими елементами конструкції, виготовленими із нестабільного матеріалу — пластмаси (див. рис.3). Компенсація температурних похибок по показам додаткового термодатчика та незначне доопрацювання конс-

трукції, разом з більш якісним виготовленням деталей ДТ, дозволить щонайменше на порядки підвищити його точність і досягти ДТ, створеному на базі макета, основної приведеної похибки меншої 0,1%.

Таблиця 1

Результати експериментальних досліджень макету

Параметри	Числове значення параметру		
	Абсолютне	Відносне, %	Теоретичне
Коефіцієнт умови роботоздатності $k_\delta$ $\delta_0 \geq k_\delta \frac{c_{зв}^2}{w_m (2\pi f_0)^2} \left( \frac{S_\Delta}{S_z} \right)^2$ $S_\Delta = L\Delta, S_z = \pi R^2$ *	6		$k_\delta = \frac{4}{0,87k_v 2,5} = 6,6$ $k_v = 0,28$
Коефіцієнти функцій перетворення: $k_p$ в режимі приєднаної жорсткості $f = \sqrt{f_0^2 + \frac{k_p P}{\rho h \delta_0}}$ * $k_\xi$ в режимі демпфірування $f \approx f_0 (1 - k_\xi P)$ *	0,19  9×10 <sup>-7</sup>		$k_m = 0,5$ $k_p = \frac{k_v^2 \gamma}{k_m} = 0,21$ * $k_\xi \approx 10^{-6}$ $k_\xi \approx 0,85 \frac{\gamma}{c_{зв}^2} \left( \frac{Lb}{h\Delta} \right)^2 \frac{(k_v)^2 f_0 w_m}{\sqrt{k_m E \rho}}$ *
Вихідна частота $f$ при $P=1$ Атм в режимі приєд. жорсткості в режимі демпфірування	1035Гц 843Гц		917Гц 717Гц
Девіації частоти в діапазоні вимірюваного тиску $P=1 \dots 1,5$ Атм: в режимі приєд. жорсткості в режимі демпфірування	60Гц 21Гц	100 30	67Гц 24Гц
Температурна похибка в діапазоні – 30...+60°C	6Гц	5	6%
Нестабільність частоти: короткострокова(до 1хв.) режимна (до 10 год.) довгострокова(до 10 дн.)	0,2 Гц 0,4 Гц 0,5 Гц	0,3 0,6 0,9	

\*  $f_0$  – власна частота коливань РЕ в вакуумі;  $E$  і  $\rho$ ,  $h$ ,  $b$ ,  $L$ ,  $w_{pe}$  і  $R$  – модуль пружності і щільність матеріалу, товщина, ширина, довжина, прогини під час коливань активної частини і радіус закріплення РЕ 1;  $\gamma$  і  $c_{зв}$  – коефіцієнт Пуассона і швидкість звуку в газі, що подається до пневмокамери ( $\gamma=1,4$ ;  $c_{зв}=332$ м/с для повітря);  $\delta_0$  – товщина пневмокамери

### Література

1. Dimeff J., Deboo G.J., Lane J.W., Hedlund R.C. A vibrating diaphragm pressure measuring system // Instrum., Aerospace Ind. — Pittsburgh. — 1969. — Vol.15. — Pp.383-389.
2. Пат. 3628083 США, МКИ G 01 L 9/12. wide range dynamic pressure sensor / John Dimeff, San Jose, and James W. Lane (США); Sunnyvale, Calif. — №882122; Заявлен 04.12.69; Опубл. 16.11.71; НКІ 73-398 С. — 11 с.
3. А.с. СССР №228992, МКИ G01L; G08с. Датчик давления с частотным выходом / И.А.Горенштейн. (СССР). — №1106539/26-10; Заявлен 10.10.66; Опубл. 17.10.68, Бюл.№32. — 4 с.
4. А.с. СССР №757889, МКИ G01L11/00. Частотный датчик давления / И.А.Горенштейн, В.Г.Кравцов (СССР). — № 2672006/18-10; Заявлен 09.10.78; Опубл. 23.08.80, Бюл.№31. — 10 с.
5. А.с. СССР №798523, МКИ G01L11/00. Частотный датчик давления / И.А.Горенштейн, В.Г.Кравцов (СССР). — № 2672007/18-10; Заявлен 09.10.78; Опубл. 23.01.81, Бюл.№3. — 8с.
6. Пат. 1175664 Великобритании, МКИ G 01 N 9/00. Improvement in relating to Methods of measuring the Pressure of Easily moving Media / William Eduard Abbotts (Великобритания). — №4042/66; Заявлен 28.01.66; Опубл. 23.12.69. — 11 с.

7. Vibrate vacuum-gauge. Fuji Elec. J. // IEEE Transactions on Electron Devices. — 1970. — Vol.43. — No.8. — Pp.782-787.
8. Черняк Н.Г., Бондаренко А.Н. Прецизионный датчик давления с пневмомеханическим резонатором для бортового оборудования летательных аппаратов и контрольно-проверочной аппаратуры// Технология и конструирование в радиоэлектронной аппаратуре . — 2001г. — №1. — с.88–101.