

ТЕОРІЯ ТА ПРАКТИКА СУЧАСНОГО ПРЕЦИЗІЙНОГО ПРИЛАДОБУДУВАННЯ

УДК 531.7.08; 621.317

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕНЗОРЕЗИСТИВНИХ СЕНСОРІВ ТИСКУ НЕСТАЦІОНАРНИХ ПРОЦЕСІВ*Тихан М. О.**Національний університет "Львівська політехніка"**м. Львів, Україна**E-mail: TYKHANM@UKR.NET*

На сьогодні ціла низка високотехнологічних галузей (аерокосмічна техніка, енергетичне машинобудування, наукові дослідження тощо) потребують високоточного вимірювання тиску нестационарних процесів. При цьому вимірювання повинне відбуватись у реальному часі. Для забезпечення цих вимог необхідні спеціальні методи вимірювання динамічних величин та відповідні сенсори. Саме особливості вимірювання нестационарних величин у реальному часі призвели до створення нового типу сенсорів, а це, своєю чергою, потребувало нового підходу та методики експериментальних досліджень характеристик цих сенсорів.

Стаття присвячена експериментальним дослідженням характеристик тензорезистивних сенсорів тиску нестационарних процесів. Першим етапом таких досліджень є встановлення статичної характеристики сенсора та встановлення його класу точності. Після встановлення статичної характеристики сенсора та його класу точності досліджуються динамічні характеристики.

Дослідження динамічної характеристики та ефективності процедури відновлення вхідного сигналу здійснюється через вимірювання імпульсу тиску, імітованого імпульсом сили внаслідок падіння кульки на мембрану сенсора. Водночас, подаються теоретичні аспекти для обґрунтування вибору тестового динамічного сигналу. У роботі запропоновано методику згаданих процедур та показано результати досліджень екземпляра сенсора, призначеного для вимірювання тиску нестационарних процесів у реальному часі.

Ключові слова: *сенсор, тиск, нестационарний, дослідження.*

1. Постановка задачі та загальний план досліджень

Однією з головних особливостей сенсорів для вимірювання тиску нестационарних процесів у реальному часі є двокомпонентність ланцюга вимірювальних перетворювачів [1 - 3]. Тобто, принцип роботи сенсора полягає у перетворенні вимірюваного тиску в прогин мембрани, вимірювання цього прогину за допомогою тензорезисторів, вимірювання прискорення коливань мембрани за допомогою акселерометра і наступного опрацювання сигналів на підставі розв'язку оберненої задачі вимірювання [1]. Саме наявність сумішених перетворювачів у структурі сенсорів детермінує особливості експериментальних досліджень їхніх характеристик.

Метою експериментальних досліджень є встановлення характеристик сенсорів для вимірювання тиску нестационарних процесів та перевірка ефективності їхнього функціонування.

Експериментальним дослідженням піддавався сенсор (рис. 1, а), конструкція якого містить корпус 1 (рис. 1, б) з круглою мембраною 2, на якій

розташовані тензорезистори 3 та акселерометр 5. Відповідно до своєї конструкції, сенсор призначений для вимірювання нестационарного тиску в реальному часі за методами суміщеного вимірювання [4] і диференціювання вихідного сигналу [5]. Водночас, для коректності досліджень всі ці методи реалізовувалися одночасно.

Дослідження ефективності функціонування сенсора відбувалось вимірюванням імпульсу тиску, імітованого імпульсом сили внаслідок падаючої на мембрану кульки.

Для повноти і коректності експериментальних досліджень попередньо необхідно встановити статичні характеристики та параметри точності сенсора. Реалізація поставленої мети здійснювалось десятикратним проведенням експериментальних досліджень.

2. Встановлення статичних характеристик і параметрів точності сенсора тиску

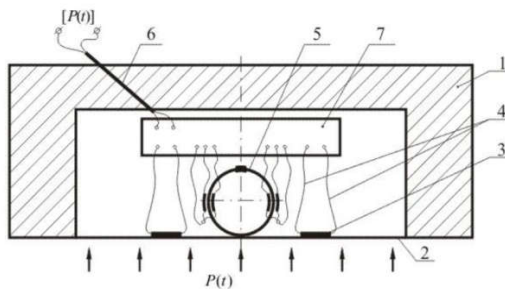
Загальний вигляд системи для цих досліджень показаний на рис. 2. Система складається з: 1 - автоматичного задавача тиску типу АЗТ-5, 2 -

дослідного сенсора тиску, 3 - інтерфейсного модуля типу I-7520BL для опрацювання та передачі даних до комп'ютера⁴, де проводиться їхня візуа-



а)

лізація. У робочому каналі автоматичного задавача тиску (АЗТ) встановлюється досліджуваний сенсор. АЗТ генерує ряд каліброваних значень тиску



1-корпус, 2-мембрана, 3-тензорезистори, 4-струмовиводи, 5-акселерометр, 6- вихідний кабель, 7-комутаційна колодка

б)

Рис. 1. Сенсор тиску нестационарних середовищ – а), та його конструкційна схема – б)



Рис. 2. Система для експериментального встановлення статичних характеристик та параметрів точності сенсора

в діапазоні 0...0,25 МПа, що контролюється вірцевим манометром. Вихідний сигнал сенсора подається на інтерфейсний модуль, опрацьовується, і результат візуалізується на моніторі комп'ютера. Процедури експериментів проводяться зі зростанням (“↑”) та спаданням тиску (“↓”) тиску. Сукупність зростаючого і спадаючого напрямків є одним циклом контролю. Зростаючий, чи спадаючий напрямок задавання вхідного сигналу є підциклом градуювання.

В експериментах проводилося вісім циклів (r) і відповідно було 16 підциклів. Значення вихідних сигналів сенсорів U_{ji} ($i = 1...2r$) при кожному з m каліброваних значень вхідного сигналу p_j ($j = 1...m$) в i -тому підциклі градуювання до відповідної таблиці.

Для кожного значення вхідного сигналу p_j обчислюється:

- математичне сподівання вихідного сигналу

$$\bar{U}_j = \frac{1}{2r} \sum_{i=1}^{2r} U_{ji} \quad (1)$$

- центр згинів за припущення одномодальності і нормальності закону розподілу даних

$$U_j = \frac{\bar{U}_j + U_{cj}}{2} \quad (2)$$

де
$$U_{cj} = \frac{U_{(t+1)} + U_{(2r-t)}}{2} \quad (3)$$

а t – ціла частина числа $\frac{2r}{4}$.

Представляючи статичну характеристику сенсора лінійною функцією виду

$$U(p) = a + b \cdot p \quad (4)$$

за методом найменших квадратів обчислюється значення коефіцієнтів цієї характеристики:

$$a = \frac{\sum_{j=1}^m U_j \cdot \sum_{j=1}^m p_j^2 - \sum_{j=1}^m (U_j \cdot p_j) \cdot \sum_{j=1}^m p_j}{m \cdot \sum_{j=1}^m p_j^2 - (\sum_{j=1}^m p_j)^2}$$

та

$$b = \frac{m \cdot \sum_{j=1}^m (U_j \cdot p_j) - \sum_{j=1}^m U_j \cdot \sum_{j=1}^m p_j}{m \cdot \sum_{j=1}^m p_j^2 - (\sum_{j=1}^m p_j)^2}$$

За отриманими даними обчислюється статична характеристика досліджуваного сенсора (рис. 3).

Тобто
$$U(p) = b \cdot p = 85,07 \cdot p \text{ [мВ]} \quad (4)$$

Після отримання статичної характеристики, сенсор знову сприймав калібровані значення тиску і отримувались вихідні сигнали U_{ji} ($i = 1...2r$) при кожному з m каліброваних значень вхідного сигналу p_j ($j = 1...m$) в i -тому підциклі експерименту і формувалась відповідна таблиця.

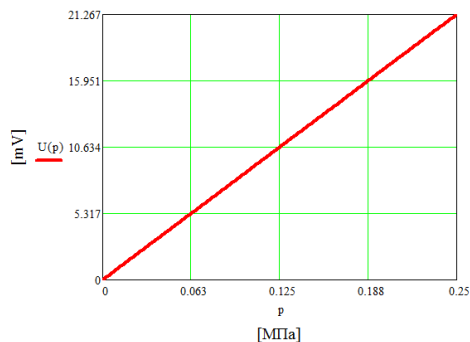


Рис. 3. Статична характеристика сенсора тиску

Після цього, для кожного значення вхідного сигналу $p_j \uparrow$ і $p_j \downarrow$ обчислюємо:

- значення абсолютних і відносних похибок:

$$\Delta_{ji} \uparrow = \frac{U_{ji} \uparrow - p_j \uparrow}{b},$$

$$\Delta_{ji} \downarrow = \frac{U_{ji} \downarrow - p_j \downarrow}{b}, \quad (5)$$

$$\delta_{ji} \uparrow = \frac{\Delta_{ji} \uparrow}{p_j \uparrow} \times 100\%,$$

$$\delta_{ji} \downarrow = \frac{\Delta_{ji} \downarrow}{p_j \downarrow} \times 100\%, \quad (6)$$

- середні за цикл значення відносних похибок

$$\delta_i = \frac{\sum_{j=1}^m \delta_{ji} \uparrow + \sum_{j=1}^m \delta_{ji} \downarrow}{2m}; \quad (7)$$

- математичне сподівання похибки

$$M(\delta) = \frac{\sum_{i=1}^{2r} \delta_i}{2r}; \quad (8)$$

- середньоквадратичне відхилення похибки

$$\sigma(\delta) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{2r} \delta_i^2}{2r} - (M(\delta))^2}; \quad (9)$$

- значення основної похибки

$$[\delta] = M(\delta) \pm 3\sigma(\delta). \quad (10)$$

Отже, за отриманими даними маємо

$$M_A(\delta) = 0,07205; \quad \sigma_A(\delta) = 0,0169.$$

Тому $[\delta] = 0,1228$, а це означає, що досліджуваний сенсор відповідає класу точності 0,2.

3. Обґрунтування вибору параметрів тестового сигналу при дослідженнях динамічних характеристик

Для сенсорів нестационарного тиску на сьогодні існує ряд способів та пристроїв для експериментального визначення, чи перевірки їхніх динамічних характеристик [6]. Ці способи і пристрої відрізняються між собою за типом динамічних характеристик, що визначатимуться, а також за точністю їх визначення і за вартістю процедури експерименту.

Тому при розробці нових сенсорів тиску існує проблема вибору того, чи іншого способу за допомогою якого проводитимуться дослідження працездатності приладу при вимірюванні змінного тиску.

Для сенсорів тиску нестационарного характеру дослідження проводяться при вхідному сигналі у вигляді стрибка, чи короткого імпульсу тиску. Такі сигнали отримують на установках типу ударної труби, силових імітаторів імпульсних тисків, різноманітних інерційних поршневих установках, клапанних чи мембранних пневмо, або гідроустановках [6].

Тестові сигнали у вигляді стрибків чи імпульсів тиску, які створюються у цих установках мають різну тривалість переднього, чи тривалість переднього та заднього фронтів. Оскільки, чим стрімкішим є передній фронт тестового сигналу, тим він більш подібний до “ідеального”, тому адекватність отриманого вихідного сигналу є кращою.

“Ідеальний” стрибок тиску (рис. 4,а) описано функцією

$$p(\tau) = p_0 = const \text{ при } \tau \geq 0, \quad (11)$$

а при вимірюванні реального стрибка тиску (рис. 4, б), його передній фронт досить точно співпадає з півперіодом косинусоїди

$$p(\tau) = \frac{P_0}{2}(1 - \cos v\tau) \text{ для } 0 \leq \tau \leq t_1 \quad (12)$$

і далі для $t_1 \leq \tau \leq t_2$

$$p(\tau) = p_0 = const, \quad (13)$$

де $v = \frac{\pi}{t_1}$, t_1 - тривалість фронту стрибка тиску

(рис. 4, б).

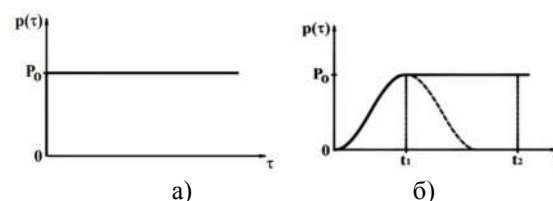


Рис. 4. Форми стрибка тиску : а) - “ідеальний” ; б) - реальний

Мірою адекватності вихідного сигналу, отриманого від деякого реального тестового сигналу з певною тривалістю переднього фронту, вважатимемо різницю між ним, та сигналом, отриманим від дії “ідеального” тестового сигналу.

Виходячи з динамічної моделі тензорезистивного сенсора тиску у вигляді інтегрального рівняння Вольтерра [1]

$$U(t) = k \cdot \int_0^t e^{-\beta(t-\tau)} p(\tau) \sin(\omega \cdot (t - \tau)) d\tau, \quad (14)$$

де ω – частота власних коливань сенсора, β – ко-

ефіцієнт демпфування коливань мембрани сенсора,
 k – статичний коефіцієнт перетворення сенсора.

міжку $\tau = 0 \dots t_1$, підставляючи (12) у (14).
 Отже,

Отримуємо реальний вихідний сигнал на про-

$$U(t) = k \cdot \int_0^t e^{-\beta(t-\tau)} \frac{p_0}{2} (1 - \cos v\tau) \sin(\omega \cdot (t - \tau)) d\tau = k \cdot \frac{p_0}{2} [F_1 - F_2 - F_3],$$

$$\text{де } F_1 = \frac{\omega - e^{-\beta t} (\omega \cdot \cos \omega t + \beta \cdot \sin \omega t)}{\omega^2 + \beta^2}, \quad F_2 = \frac{\beta}{2} \left[\frac{1}{\beta^2 + (\omega - v)^2} (\sin \omega t + \frac{\omega - v}{\beta} \cos \omega t - e^{-\beta t} (\sin \omega t + \frac{\omega - v}{\beta} \cos \omega t)) \right],$$

$$F_3 = \frac{\beta}{2} \left[\frac{1}{\beta^2 + (\omega + v)^2} (-\sin \omega t + \frac{\omega + v}{\beta} \cos \omega t - e^{-\beta t} (\sin \omega t + \frac{\omega + v}{\beta} \cos \omega t)) \right].$$

Для $\tau > t_1$, маємо

$$U(t) = e^{-\beta t} \left[\frac{\dot{U}(t_1) + \beta U(t_1)}{\omega} \sin \omega t + U(t_1) \cos \omega t \right] +$$

$$+ k \cdot \int_0^{t_1} e^{-\beta(t-\tau)} p_0 \sin(\omega(t-\tau)) d\tau = e^{-\beta t} \left[\frac{\dot{U}(t_1) + \beta U(t_1)}{\omega} \sin \omega t + U(t_1) \cos \omega t \right] +$$

$$+ k \left[p_0 \frac{\omega - e^{-\beta t} (\omega \cdot \cos \omega t + \beta \sin \omega t)}{\omega^2 + \beta^2} \right]$$

У випадку “ідеального” тестового сигналу вихідний сигнал буде

$$U(t)_{\text{ідеал}} = k \int_0^t e^{-\beta(t-\tau)} p_0 \sin(\omega(t-\tau)) d\tau = k p_0 \left[\frac{\omega - e^{-\beta t} (\omega \cos \omega t + \beta \sin \omega t)}{\omega^2 + \beta^2} \right]. \quad (15)$$

Різниця “ідеального” і реального вихідного сигналів на проміжках часу $\tau = 0 \dots t_1$ і $\tau > t_1$ становитимуть

$$\Delta_1 = U(t)_{\text{ідеал}} - U(t) = k p_0 \left[\frac{\omega - e^{-\beta t} (\omega \cos \omega t + \beta \sin \omega t)}{\omega^2 + \beta^2} \right] - k \frac{p_0}{2} [F_1 - F_2 - F_3] =$$

$$= \frac{\beta}{2} \left\{ \left[\frac{1}{\beta^2 + (\omega - v)^2} (\sin \omega t + \frac{\omega - v}{\beta} \cos \omega t - e^{-\beta t} (\sin \omega t + \frac{\omega - v}{\beta} \cos \omega t)) \right] + \right. \quad (16)$$

$$\left. + \left[\frac{1}{\beta^2 + (\omega + v)^2} (-\sin \omega t + \frac{\omega + v}{\beta} \cos \omega t - e^{-\beta t} (\sin \omega t + \frac{\omega + v}{\beta} \cos \omega t)) \right] \right\}$$

$$\Delta_2 = U(t)_{\text{ідеал}} - U(t) = k \cdot p_0 \cdot \left[\frac{\omega - e^{-\beta t} (\omega \cdot \cos \omega t + \beta \sin \omega t)}{\omega^2 + \beta^2} \right] -$$

$$- e^{-\beta t} \left[\frac{\dot{U}(t_1) + \beta U(t_1)}{\omega} \sin \omega t + U(t_1) \cos \omega t \right] - k \left[p_0 \frac{\omega - e^{-\beta t} (\omega \cdot \cos \omega t + \beta \sin \omega t)}{\omega^2 + \beta^2} \right] =$$

$$= -e^{-\beta t} \left[\frac{\dot{U}(t_1) + \beta U(t_1)}{\omega} \sin \omega t + U(t_1) \cos \omega t \right]. \quad (17)$$

Для реальних тензорезистивних сенсорів значення величин β , ω і v перебувають в інтервалі від кГц до МГц. Тому значення $\Delta_2 \gg \Delta_1$. Отже оцінку адекватності реального вихідного сигналу доцільно давати за (17).

Визначимо момент часу, при якому різниця реального і “ідеального” вихідних сигналів набуде максимального значення. Для цього диференціюємо (17) по t і прирівняємо отриману залежність до нуля

$$\frac{\partial \Delta_2}{\partial t} = e^{-\beta t} \left[\frac{\beta \dot{U}(t_1) + \beta^2 U(t_1) + \omega^2 U(t_1)}{\omega} \times \right.$$

$$\left. \times \sin \omega t - \dot{U}(t_1) \cos \omega t \right] = 0,$$

звідки

$$t = \frac{1}{\omega} \operatorname{arctg} \frac{\omega \dot{U}(t_1)}{\beta \dot{U}(t_1) + \beta^2 U(t_1) + \omega^2 U(t_1)}. \quad (18)$$

Подамо визначену максимальну різницю реального та “ідеального” сигналів у вигляді деякої відносної похибки

$$\delta_{\max} = \frac{\Delta_2(t)}{U(t)_{\text{ідеал}}} \times 100\%, \quad (19)$$

де значення величин, що входять у цю формулу, визначаються у момент часу відповідно до (18).

Числовий аналіз максимуму (19) при різних співвідношеннях величин t_1 і ω дає результат, графічне зображення якого подане на рис. 5.

Отримані залежності інтерполюються функцією

$$t_1 = \frac{\delta_{\max}}{100 \cdot \omega}, \quad (20)$$

де δ_{\max} – допустима максимальна відносна похибка визначення реальної характеристики.

Таким чином, маючи значення власної частоти коливачів сенсора ω , а також значення допустимої похибки визначення реальної характеристики – δ_{\max} , за виразом (20) визначається допустима тривалість переднього фронту тестового сигналу. Після цього можна обґрунтовано підібрати спосіб для випробувань сенсора та довіряти отриманим результатам.

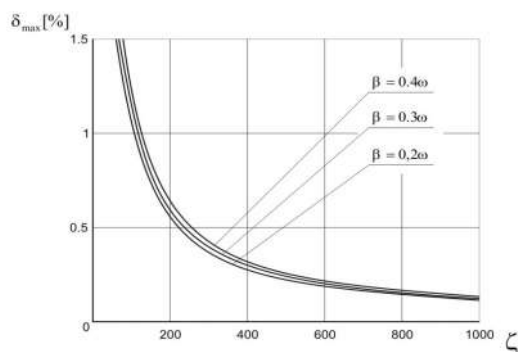


Рис. 5. Залежність δ_{\max} від співвідношення

$$\zeta = \frac{1}{t_1 \cdot \omega}$$

Наприклад, для $\delta = 0,1\%$ і $\omega = 1,0$ кГц, допустима тривалість переднього фронту скачка реального тестового сигналу повинна бути $t_1 \leq 1 \cdot 10^{-6}$ с. Для випробування такого сенсора відповідним пристроєм може бути ударна газодинамічна труба, яка дозволяє утворити стрибок тиску з тривалістю переднього фронту $t_1 \cong 1 \cdot 10^{-6}$ с, силовий імітатор імпульсного тиску (метод падаючої кульки), який дає $t_1 \cong 2 \dots 9 \cdot 10^{-7}$ с, чи спеціальні пристрої, що використовують методику розриву мембран між різотисковими камерами.

4. Методика та устаткування для досліджень динамічної характеристики

Для експериментального отримання динамічної характеристики сенсора та експериментальної перевірки його працездатності при вимірюванні нестационарного тиску в реальному часі використовуємо силовий імітатор імпульсного тиску. Тобто, на вхід сенсора подаємо динамічний сигнал у вигляді короткого імпульсу сили, який створюємо шляхом удару об його мембрану металеві кульки з масою m , що вільно падає з висоти H .

Дослідна установка (рис. 6) складається з застискача 1, в якому строго вертикально закріплені дослідний сенсор 2 мембраною вгору, спрямовуючої трубки 3, 4 – модуля інтерфейсного I-7520VL для опрацювання даних і передачі їх до комп'ютера 5. Спрямовуюча трубка довжиною 25 см накручена на різбову ділянку мембранної частини сенсора. У верхній частині спрямовуючої трубки розташований електромагніт, котрий утри-

мує кульку масою 2г і при потребі звільняє її для вільного падіння на мембрану.

При використанні силового імітатора імпульсного тиску процедура перевірки працездатності сенсора при вимірюванні нестационарного тиску полягає у встановленні значення маси падаючої кульки, порівнянні цього значення з дійсним, а також хронометричного порівняння тривалостей контакту кульки з мембраною та відновленого вхідного сигналу.



Рис. 6. Установка силової імітації імпульсу тиску

Для з'ясування дійсної тривалості контакту кульки з мембраною під час удару, кулька через гнучкий електропровід була задіяна в спеціальну схему (рис. 7), сигнали з якої фіксувалися системою відліку часу інтерфейсного модуля.

Як тільки кулька торкалась мембрани, утворювалась лінія зв'язку, і електричний сигнал від джерела живлення реєструвався системою відліку часу. Як тільки кулька відскочила від мембрани лінія зв'язку розривалась, сигнал пропадав (наступні удари кульки по мембрані до уваги не брались). Тривалість такого сигналу дорівнювала часу контакту кульки з мембраною. У даному експерименті тривалість контакту складала $8 \cdot 10^{-5}$ с. Оскільки власна частота сенсора складала 4 кГц, то удар кульки об мембрану коректно інтерпретувати як короткий прямокутний імпульс.

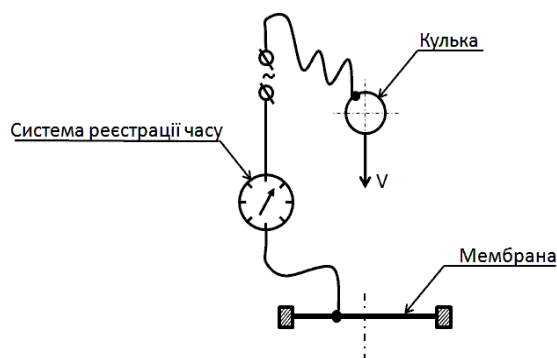


Рис. 7. Схема установки для визначення тривалості контакту кульки з мембраною

Така методика є непрямим способом вимірювання і потребує відповідних аналітичних залежностей.

Кулька, яка вільно падає з висоти H в момент удару об мембрану матиме швидкість $v = \sqrt{2gH}$.

Оскільки в момент відбиття від мембрани швидкість кульки дорівнювала нулевій, то за час контакту кульки і мембрани та за час дії прямокутного імпульсу сили амплітудою $F = \frac{m\sqrt{2gH}}{t_1}$.

Цей імпульс сили імітує імпульс тиску з амплітудою

$$p = \frac{4}{\pi R^2} F = \frac{4}{\pi R^2} \frac{m\sqrt{2gH}}{t_1} \quad (21)$$

Тоді маса кульки, яка зімітувала такий імпульс тиску, становить

$$m = \frac{p\pi R^2 t_1}{4\sqrt{2gH}} \quad (22)$$

5. Результати досліджень

В результаті дослідження, при падінні на мембрану сенсора кульки отримуємо вихідний

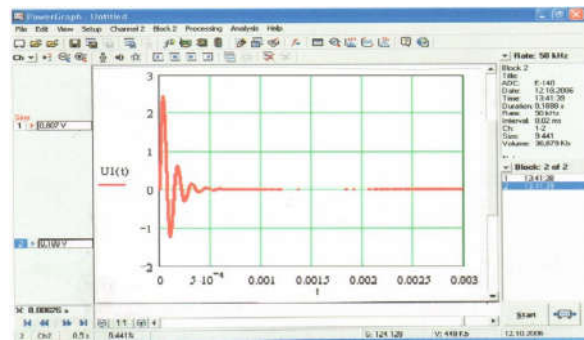


Рис. 8. Імпульсна перехідна характеристика сенсора

Оскільки тривалість імпульсу t_1 становила $8 \cdot 10^{-5}$ с, тому, за методом сумісного вимірювання маса падаючої кульки становила $m = 1,987$ г, а за методом диференціювання вихідного сигналу $m = 2,022$ г.

Таким чином, максимальна відносна похибка визначення маси падаючої кульки за методом сумісного вимірювання становить 0,65 %, а за методом диференціювання вихідного сигналу 1,2 %.

Висновки

Запропонована методика експериментальних досліджень статичної та динамічної характеристик сенсора показала свою дієздатність, а тому може бути основою нормативної процедури атестації сенсорів тиску нестационарних середовищ.

Запропонована залежність для визначення оптимальної тривалості фронту удару тиску тестового сигналу дозволяє здійснити обґрунтований вибір методу створення такого сигналу.

Експериментальні дослідження характеристик сенсора при вимірюванні імітованого імпульсу тиску показали дієздатність методу падаючої кульки.

сигнал, що представляє собою імпульсну перехідну характеристику сенсора (рис. 8).

Для перевірки правильності методики і точності сенсора відновлювався вхідний сигнал імітованого тиску і відповідно імпульсу сили. Значення амплітуди імітованого імпульсу тиску p та його тривалості t_1 отримуємо в процесі реалізації того, чи іншого методу вимірювання нестационарного тиску в реальному часі [4, 5]. А далі, використовуючи (22), отримуємо значення маси кульки m . Відмінність отриманого експериментально значення маси кульки та реального її маси є мірою точності сенсора і коректності експерименту.

Відновлений за двома методами [4, 5] вхідний сигнал імпульсу сили поданий на рис. 9.

За результатами 10-ти кратного випробування математичне сподівання амплітуди імпульсу імітованого тиску становило 0,43 МПа – за методом сумісного вимірювання [4] і 0,454 МПа за методом диференціювання сигналу [5].

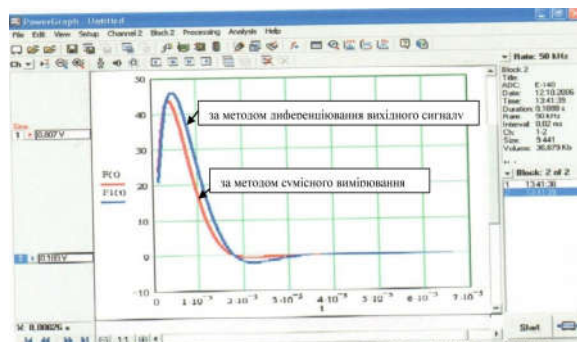


Рис. 9. Відновлений вхідний сигнал імітованого імпульсу сили

Оскільки дослідження передбачає безпосереднє експериментальне визначення тривалості імпульсу t_1 , то запропонована методика дозволяє високоточну перевірку ефективності функціонування сенсора при його роботі в реальному часі.

Література

1. Тихан М. О. Розвиток теоретичних засад та принципів побудови тензорезистивних сенсорів тиску нестационарних середовищ. – Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук. НУ “Львівська політехніка”. Львів, 2013.
2. Пат. 75915 Україна. МПК(2006) G01L 23/00. Датчик динамічного тиску / М.О. Тихан. № 2003109369; заявл. 17.10.2003; опубл. 15.06.2006, Бюл. № 6.– 2 с.
3. Пат. 88935 Україна. МПК(2009) G01L 23/00, G01L 9/00, G01L 9/04. Перетворювач для вимірювання динамічного тиску / М.О. Тихан. № 200707927; заявл. 13.07.2007; опубл. 10.12.2009, Бюл. № 23. – 2 с.

4. Пат. 88936 Україна. МПК(2009) G01L 23/00 Спосіб вимірювання динамічного тиску / М.О. Тихан. №а200707947 заявл. 13.07.2007; опубл. 10.12.2009, Бюл. № 23. – 3 с.
5. Пат. на корисну модель 45961 Україна. МПК(2009) G01L 23/00. Спосіб вимірювання динамічного тиску / М. О. Тихан. № а200606868 заявл. 19.06.2006; опубл. 10.12.2009, Бюл. № 23. – 2 с.
6. Федяков Е. М. Измерение переменных давлений / Е. М. Федяков [и др.]. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 216 с.

УДК 531.7.08; 621.317

М. А. Тихан*Национальный университет “Львівська политехніка”, г. Львов, Украина***ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕНЗОРЕЗИСТИВНЫХ СЕНСОРОВ ДАВЛЕНИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ**

На сегодня целый ряд высокотехнологичных отраслей (аэрокосмическая техника, энергетическое машиностроение, научные исследования и т.д.) требуют высокоточного измерения давления нестационарных процессов. При этом измерение должно происходить в реальном времени. Для обеспечения этих требований необходимы специальные методы измерения динамических величин и соответствующие сенсоры. Именно особенности измерения нестационарных величин в реальном времени привели к созданию нового типа сенсоров, а это, в свою очередь, требовало нового подхода и методики экспериментальных исследований характеристик этих сенсоров.

Статья посвящена экспериментальным исследованиям характеристик тензорезистивных сенсоров давления нестационарных процессов. Первым этапом таких исследований является установление статической характеристики датчика и его класса точности, затем исследуются динамические характеристики. Исследование динамической характеристики осуществляется через измерения импульса давления, имитированного импульсом силы путем падения шарика на мембрану датчика. При этом в работе даются теоретические аспекты для обоснования выбора тестового динамического сигнала. В работе предложена методика упомянутых процедур и показаны результаты исследований экземпляра сенсора, предназначенного для измерения давления нестационарных процессов в реальном времени.

Ключевые слова: сенсор, давление, нестационарный, исследование.**М. О. Tykhan***Lviv Politechnic National University, Lviv, Ukraine***EXPERIMENTAL RESEARCH CHARACTERISTICS OF PIEZORESISTIVE SENSORS OF PRESSURE NON-STATIONARY PROCESSES**

Nowadays, a number of high-tech industries (aerospace engineering, power engineering, research, etc.) require high accuracy pressure unsteady processes. This measurement should take place in real time. To ensure these requirements require special methods of measuring dynamic values and corresponding sensors. It features non-stationary measurement values in real time led to the creation of a new type of sensor, which, in turn, require a new approach and methodology of experimental research characteristics of these sensors.

This article is devoted to experimental study of the characteristics of piezoresistive pressure sensors unsteady processes. The first stage of such studies is to establish static characteristics of the sensor and setting its accuracy class. After installing the static characteristics of the sensor and its accuracy class studied the dynamic characteristics. Investigation of dynamic characteristics through measurement of pulse pressure, which is formed by the balls fall to the membrane sensor. In the submitted paper the theoretical aspects to justify the choice of the dynamic test signal.

In this article, the technique of these procedures and the results of studies showing an instance of a sensor designed to measure the pressure of non-stationary processes in real time.

Keywords: sensor, pressure, non-stationary, research.*Надійшла до редакції
26 квітня 2016 року**Рецензовано
11 травня 2016 року*

© Тихан М. О., 2016