

УДК 531.7.08; 621.317

## СПОСІБ ВИМІРЮВАННЯ ДИНАМІЧНОГО ТИСКУ У РЕАЛЬНОМУ МАСШТАБІ ЧАСУ

© Тихан Мирослав, 2008

Національний університет "Львівська політехніка"  
вул. С. Бандери, 12, 79013, Львів, Україна

*Пропонується спосіб вимірювання динамічного тиску, котрий дає змогу здійснювати вимірювання у реальному масштабі часу.*

*Предлагается способ измерения динамического давления, позволяющий осуществить измерение в реальном масштабе времени*

*The method of dynamic pressure measurement which give a possibility measurement in real time has been proposed.*

**1. Вступ.** Для багатьох сучасних високотехнологічних галузей промисловості (автомобілебудування, аерокосмічний комплекс тощо) вкрай необхідні швидкодіючі системи автоматичного керування. У багатьох таких системах гостро стоїть потреба вимірювання динамічних фізичних величин. Серед інших вимірюваних фізичних величин у згаданих галузях вимірювання тиску є вагомою часткою. Однією з головних особливостей динаміки вимірюваного тиску є те, що вона є сильно вираженим нестационарним процесом. Тобто в одному вимірювальному акті тиск може мати як різко змінний (ударний) характер з періодичною або неперіодичною повторюваністю, так і "гладкий" – гармонійний, майже гармонійний тощо характер, а також мати статичні ділянки.

Потреба збільшення швидкодії систем керування та істотна динамічність контрольованих величин, вреспті-решт, породжує проблему створення способів та пристроїв вимірювання динамічних величин у реальному або близькому до цього масштабі часу.

Як відомо, вимірювання динамічних величин належить до класу некоректно поставлених задач [1]. Розв'язують ці задачі методом регуляризації (метод Тихонова) [2], однак практичне його застосування при вимірюванні динамічного тиску у реальному масштабі часу не дає бажаних результатів. Така ситуація, очевидно, зумовлена фізичними особливостями як самої величини, так і особливостями вимірювальних приладів, що застосовуються.

**2. Опис способу.** Для вимірювання тиску функціональних середовищ у численних швидкодіючих

системах автоматичного керування широко використовуються тензометричні перетворювачі мембранного типу [3–7].

Вимірювальне перетворення динамічного тиску довільного характеру, котре здійснюється мембранними перетворювачами, описується рівняннями, що мають вигляд інтеграла Вольтерра або інтеграла згортки

$$U(t) = \int_0^t g(t, \tau) \cdot p(\tau) d\tau, \quad (1)$$

де  $g(t, \tau)$  – імпульсна перехідна характеристика;  $U(t)$  – вихідний сигнал перетворювача;  $p(t)$  – вимірюваний тиск (вхідний сигнал). Припускаємо, що  $g(t, \tau) \neq 0$ ,  $g(t, \tau)$  і  $U(t)$  існують і неперервні.

З урахуванням фізичних особливостей перетворювачів рівняння (1) у явнішому вигляді запишеться

$$U(t) = k \cdot \int_0^t e^{-b(t-\tau)} p(\tau) \sin(h_0 \cdot (t-\tau)) d\tau, \quad (2)$$

де  $b$  – коефіцієнт демпфування коливань первинного пружного перетворювача;  $h_0$  – основна частота його власних коливань;  $k$  – статичний коефіцієнт перетворення.

Нагадаємо, що за статичного режиму роботи перетворювача, за посередництва його статичної характеристики, отримують значення вхідного сигналу. Вимірювання динамічного тиску полягатиме у необхідності одержання з рівняння (2) рівняння виду:

$$p(t) = F^{-1}(U(t)), \quad (3)$$

де  $F^{-1}$  – обернений до перетворювальної функції оператор.

Ця процедура отримала назву відновлення вхідного сигналу.

Як показано у [8,9], рівняння типу (3) отримується подвійним диференціюванням рівняння (2), і воно має вигляд

$$p(t) = \frac{U''(t) + 2 \cdot b \cdot U'(t) + (h_0^2 + b^2) \cdot U(t)}{k \cdot h_0} \quad (4)$$

Формула (4) є ключем до способу вимірювання динамічного тиску у реальному масштабі часу.

Значення величин  $U''(t)$  і  $U'(t)$  будемо одержувати безпосереднім числовим диференціюванням вихідного сигналу  $U(t)$ .

Тобто

$$U''(t) = \frac{\partial U'(t)}{\partial t} \quad \text{і} \quad U'(t) = \frac{\partial U(t)}{\partial t} \quad (5)$$

Відомо [1, 2], що теоретично така процедура є некоректною, оскільки апріорі значення  $U(t)$  отримується з деякою похибкою. Очевидно, що поява такої похибки можна трактувати як певний фізичний процес, загалом динамічного характеру, що накладається на інформативний сигнал. За певних умов, накладених на похибку, як фізичний процес безпосереднє диференціювання дає прийнятні результати.

**3. Дослідження працездатності способу вимірювання.** Дослідимо, за яких параметрів похибки вимірювання вихідного сигналу  $U(t)$  його безпосереднє

числове диференціювання перестане бути коректним. З цієї метою на вхід перетворювача подамо тестовий сигнал у вигляді стрибка тиску ( $p(t)_{\text{задане}} = p_0 = \text{const}$ ), а на отриманий вихідний сигнал у вигляді перехідної функції перетворювача (рис. 1) накладемо білий шум (як певний аналог похибки) амплітудою, не більшою за прийнятну статичну похибку, тобто

$$U_{\text{виміряне}}(t) = U(t)(1 + Y_0 \cos(n \cdot t)), \quad (6)$$

де  $Y_0$  – амплітуда шуму, яка може сягати 0... $\zeta$  % від амплітуди корисного сигналу  $U(t)$ , а частота шуму  $n$  може змінюватись у певному діапазоні щодо власної частоти перетворювача  $h_0$ .

Відмінність між заданим тестовим сигналом і відновленим  $p(t)_{\text{відновлене}}$  згідно із запропонованим способом (формули (4–5)) оцінимо деякою щодо похибкою

$$d(t) = \frac{|p_0 - p(t)_{\text{відновлене}}|}{p_0} \cdot 100 \% \quad (7)$$

Задаючись відповідними фізико-конструктивними параметрами перетворювача і виконавши числове моделювання у системі MCD, отримуємо відновлений вхідний сигнал згідно з (4), при визначенні відповідних величин згідно (5) і встановлення значення відносної похибки відновлення, розрахованої за (7). Графічно одержані результати подані на рис. 2–17.

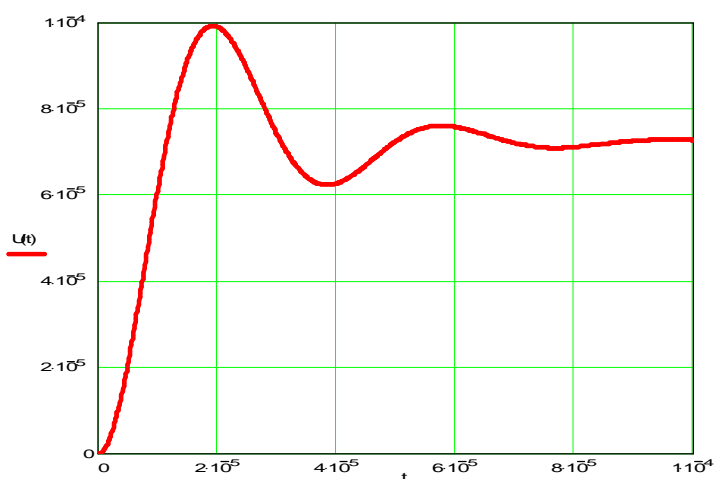


Рис. 1. Вихідний сигнал у вигляді перехідної функції перетворювача при вхідному  $p_0 = 1,0 \text{ МПа} = \text{const}$

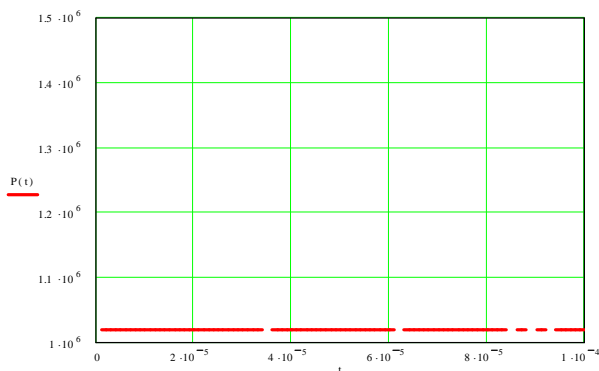


Рис. 2. Відновлений вхідний сигнал перетворювача, якщо  $Y_0 = 2\% \times U(t)$  і  $n = 0$  кГц.

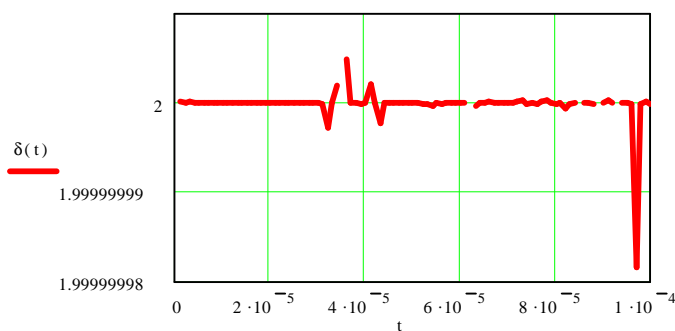


Рис. 3. Похибка відновлення вхідного сигналу (якщо  $Y_0 = 2\% \times U(t)$  і  $n = 0$  кГц.)

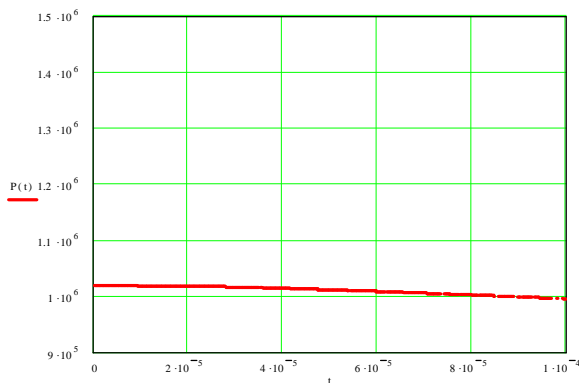


Рис. 4. Відновлений вхідний сигнал перетворювача (якщо  $Y_0 = 2\% \times U(t)$  і  $n = 0,1 \times h_0$ )

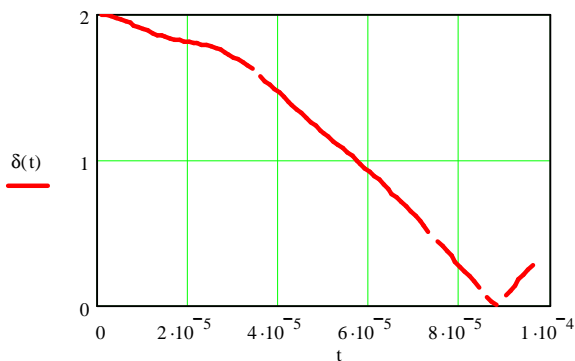


Рис. 5. Похибка відновлення вхідного сигналу (якщо  $Y_0 = 2\% \times U(t)$  і  $n = 0,1 \times h_0$ )

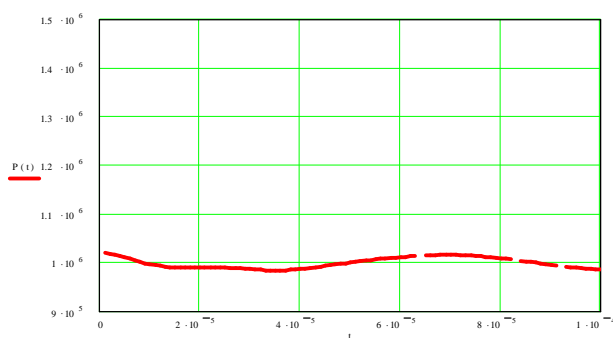


Рис. 6. Відновлений вхідний сигнал перетворювача, якщо  $Y_0 = 2\% \times U(t)$  і  $n = 0,5 \times h_0$

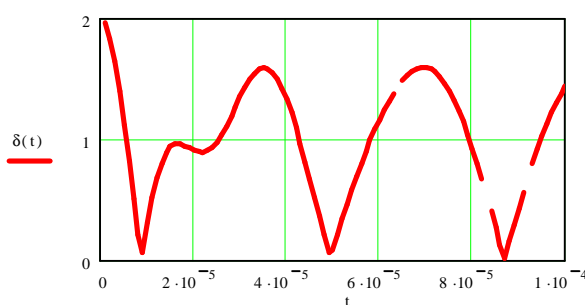


Рис. 7. Похибка відновлення вхідного сигналу (якщо  $Y_0 = 2\% \times U(t)$  і  $n = 0,5 \times h_0$ )

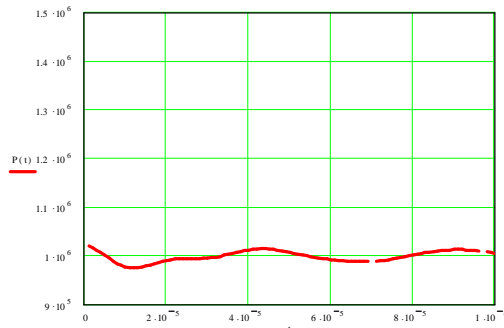


Рис. 8. Відновлений вхідний сигнал перетворювача, якщо  $Y_0 = 2\% \times U(t)$  і  $n = 0,75 \times h_0$

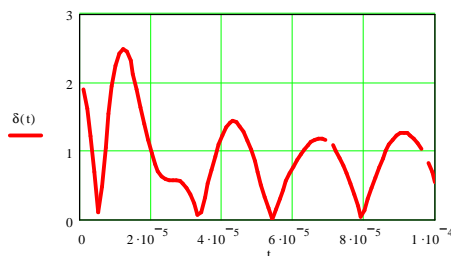


Рис. 9. Похибка відновлення тестового сигналу (якщо  $Y_0 = 2\% \times U(t)$  і  $n = 0,75 \times h_0$ )

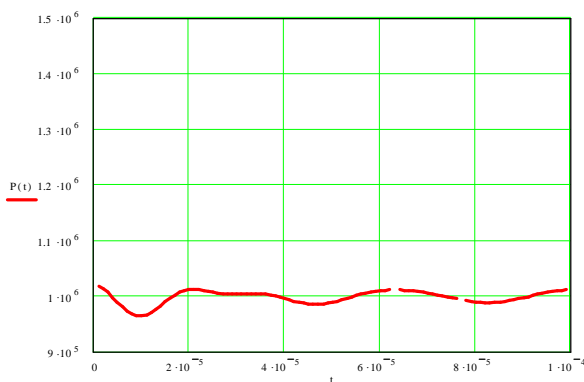


Рис. 10. Відновлений вхідний сигнал перетворювача, якщо  $Y_0 = 2\% \times U(t)$  і  $n = 1,0 \times h_0$

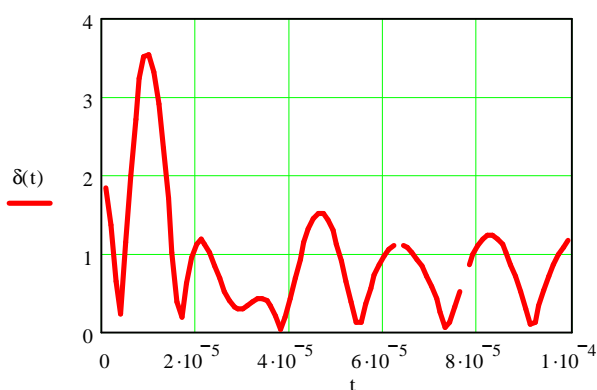


Рис. 11. Похибка відновлення тестового сигналу (якщо  $Y_0 = 2\% \times U(t)$  і  $n = 1,0 \times h_0$ )

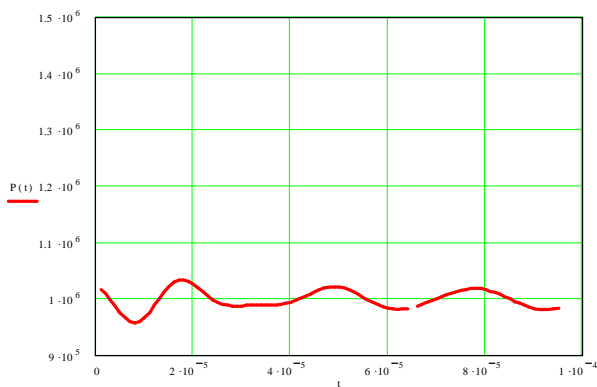


Рис. 12. Відновлений вхідний сигнал перетворювача, якщо  $Y_0 = 2\% \times U(t)$  і  $n = 1,25 \times h_0$

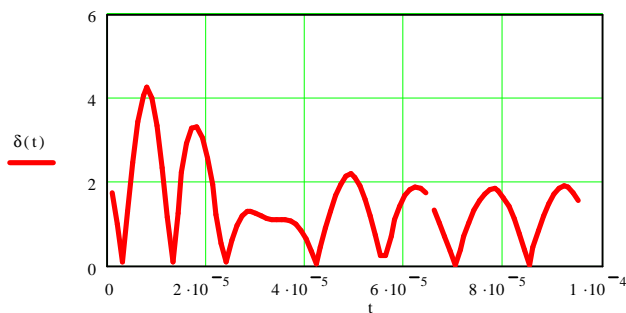


Рис. 13. Похибка відновлення тестового сигналу (якщо  $Y_0 = 2\% \times U(t)$  і  $n = 1,25 \times h_0$ )

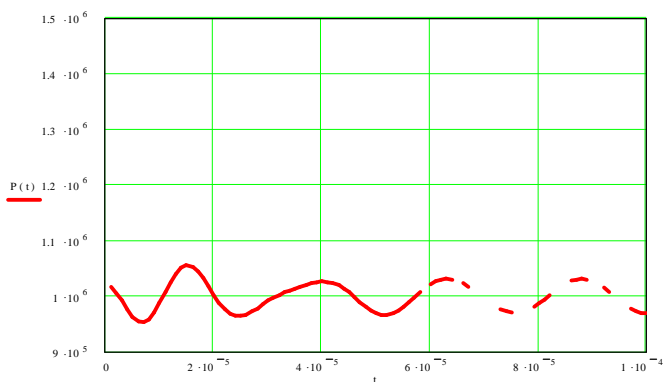


Рис. 14. Відновлений вхідний сигнал перетворювача, якщо  $Y_0 = 2\% \times U(t)$  і  $n = 1,5 \times h_0$

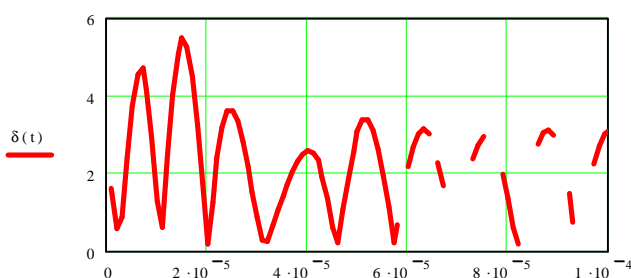


Рис. 15. Похибка відновлення тестового сигналу (якщо  $Y_0 = 2\% \times U(t)$  і  $n = 1,5 \times h_0$ )

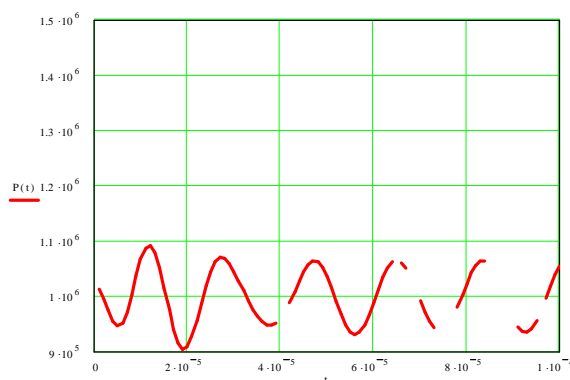


Рис. 16. Відновлений вхідний сигнал перетворювача при  $Y_0 = 2\% \times U(t)$  і  $n = 2,0 \times h_0$

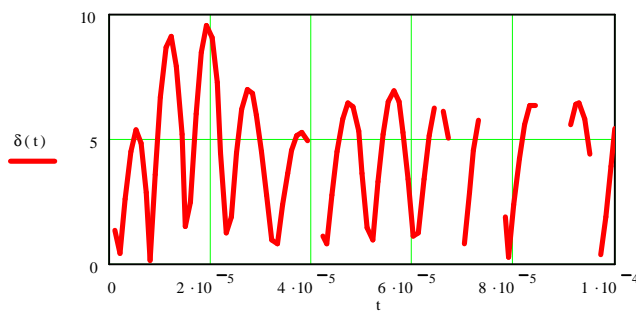


Рис. 17. Похибка відновлення тестового сигналу (якщо  $Y_0 = 2\% \times U(t)$  і  $n = 2,0 \times h_0$ )

Аналіз отриманих результатів дає змогу стверджувати, що максимум похибки відновлення вимірюваного сигналу за способом безпосереднього диференціювання можна апроксимувати залежністю

$$d_{\max}(\%) = Y_0(\%) + \left(\frac{n}{h}\right)^3 \quad (8)$$

З практичного погляду це означає, що якщо б вдалося у вихідному сигналі перетворювача погасити високочастотні дестабілізуючі шуми, то можна припустити, що відновлення вхідного вимірюваного сигналу можна здійснити способом безпосереднього диференціювання.

Для здійснення цієї ідеї пропонується використовувати цифровий фільтр Голя–Савицького. Принцип роботи цього фільтра полягає у тому, що він усереднює вимірюваний сигнал на квантованому проміжку часу, чим усуває з вимірюваного сигналу високочастотну складову.

Отже, спосіб вимірювання полягає у такому:

– вихідний сигнал перетворювача  $U(t)$  піддають цифровій фільтрації фільтром типу Голя–Савицького;

– відфільтрований вихідний сигнал  $\langle U(t) \rangle$  піддають цифровому диференціюванню, одержуючи сигнали

$$U_{\&}(t) = \frac{\partial \langle U(t) \rangle}{\partial t} \quad \text{і} \quad U_{\&\&}(t) = \frac{\partial^2 U_{\&}(t)}{\partial t^2};$$

– відповідно до формули (4) отримуємо значення вимірюваного тиску.

$$p(t) = \frac{U_{\&\&}(t) + 2 \cdot b \cdot U(t) + (h_0^2 + b^2) \cdot \langle U(t) \rangle}{k \cdot h_0}$$

Зазначимо, що технічно процедуру фільтрації вихідного сигналу та його диференціювання можна здійснити за допомогою поширених на ринку спеціальних процесорних плат чи інтерфейсних модулів (наприклад, типу L-CARD E 14-140) чи інших засобів. Ці засоби мають у своєму математичному забезпеченні швидкодіючі процедури фільтрації, диференціювання та арифметичні дії.

Зважаючи, що процедура вимірювання полягає у процедурі фільтрації і математичного опрацювання вихідного сигналу, що є доволі швидкодіючими, то можна стверджувати, що запропонований спосіб здійс-

нюватиме вимірювання у реальному (або доволі близькому до цього) масштабі часу.

Тут необхідно наголосити на обмеженості способу безпосереднього диференціювання порівняно з способом суміщеного вимірювання, котра полягає у тому, що необхідно апріорно знати про частотний характер дестабілізуючих факторів. Але у низці вимірювальних задач таку інформацію можна мати і тоді спосіб безпосереднього диференціювання може бути ефективнішим, оскільки перетворювачі для його здійснення володіють кращою конструктивною надійністю порівняно з перетворювачами суміщеного вимірювання [9].

1. Василенко Г. И. Теория восстановления сигналов: О редуциции к идеальному прибору в физике и технике. – М.: Сов. радио, 1979. – 272 с. 2. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач. – 2-е изд. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979. 3. Соколов Л.В. Анализ возрастающих потребностей в микромеханических сенсорах и МЭМС // Датчики и системы. – 2005. – № 6. – С. 41–43. 4. Мокров Е.А. НИИ физических измерений. 45 лет в космическом приборостроении // Датчики и системы. – 2005. – № 9. – С.2–3. 5. Мокров Е.А., Белозубов Е.М. Базовая системная модель нового поколения тонкопленочных тензорезисторных датчиков давления для ракетной и авиационной техники // Датчики и системы. – 2005. – № 6. – С. 10–14. 6. Маркелов И.Г. Комплекс датчиков давления для эксплуатации на объектах атомной энергетики // Sensors & Systems. – 2000. – № 11–12 – С. 24–25. 7. Козин С.А., Федюлов А.В. и др. Создание полупроводниковых интегральных датчиков механических параметров на основе технологии МЭМС // Датчики и системы. – 2005. – № 9. – С. 48–49. 8. Tykhan M. Method for input signal restoration during dynamic pressure measurement and its sensor. 9. 18th IMEKO WORLD CONGRESS // Rio de Janeiro, Brazil. September 17 – 22. – 2006. – V. IX A. – P. 99–103. 10. Тухан М. Теоретичні аспекти побудови суміщених тензометричних перетворювачів динамічного тиску // Приладобудування // Вісник Національного технічного університету "Київський політехнічний інститут". – 2007. – № 33. – С.93–100.