

УДК. 620.179

М.О. ТИХАН

Національний університет “Львівська політехніка”

ПЕРЕТВОРЮВАЧ ДИНАМІЧНОГО ТИСКУ

©, Тихан М.О., 2007

*Пропонується перетворювач динамічного тиску,
який здійснює вимірювання в реальному масштабі часу.*

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

Вступ. Для багатьох сучасних галузей техніки необхідні високоточні перетворювачі динамічного тиску. Передусім це стосується аерокосмічної промисловості, двигунобудування, теплоенергетики [1–7]. При цьому однією з головних особливостей вимірюваного тиску є те, що його динамічність може мати довільний характер з непередбачуваним перебігом. Довільність і непередбачуваність динамічності вимірюваного тиску виражається у тому, що в одному вимірювальному акті тиск може мати як різко змінний (ударний) характер з періодичною або неперіодичною повторюваністю, так і “гладкий” – гармонічний, майже гармонічний тощо характер, а також мати статичні ділянки. І такі особливості можуть перемішуватися довільно за значних амплітудних значень. Тобто вимірюваний тиск являє собою сильно виражений нестационарний процес. Окрім того, вихідний сигнал з перетворювача є інформативним для вироблення керуючих сигналів виконавчих механізмів різноманітних систем автоматики. Тому у цих системах є потреба вимірювань у реальному масштабі часу, або якомога наближена до цього. Тобто проміжок часу між настанням значення вимірюваного тиску і виробленням керуючого сигналу системи автоматики має бути настільки мінімальним, наскільки це вимагають умови роботи об’єкта. Сьогодні у системах автоматики згаданих галузей застосування перетворювачів (допустимий час спрацювання виконавчих пристроїв) коливається в межах 0.01...0.1 с. Крім того, до систем автоматики висуваються надзвичайно високі вимоги з надійності (як з фізико-технічної, так і метрологічної), тому зрозуміло, що точність вимірювання є головним завданням якості і ефективності роботи системи загалом.

Як відомо, під час вимірювання динамічного тиску вихідний сигнал перетворювача, крім статичної, містить динамічну похибку, яка може бути на порядок більша, ніж статична. Дійсно, адже за різко змінного вхідного сигналу у вихідному є присутня перехідна складова, амплітуда якої може сягати 120...180 % від амплітуди вхідного сигналу (залежно від середовища вимірювання і фізико-технічних параметрів перетворювача) [8]. Зрозуміло, що за таких значень похибки робота будь-якої системи автоматики неможлива. Крім того, наголосимо на тому, що характер і значення динамічної похибки залежить від характеру (швидкості зміни) вхідного сигналу. А оскільки під час реальних вимірювань характер зміни вимірюваного тиску є непередбачуваним, то це породжує серйозні проблеми під час створення вимірювальних перетворювачів для швидкодіючих систем автоматики.

Сьогодні для забезпечення роботи, а також з метою підвищення ефективності систем автоматики насамперед намагаються забезпечити точність самих вимірювальних перетворювачів. За динамічних вимірювань таку задачу можна розв’язати двома способами: корегуванням динамічної похибки безпосередньо або відновленням вхідного сигналу [9–12]. Ефективність усунення динамічної похибки методом корегування насамперед залежить від обсягу апріорної інформації про характер вимірюваного тиску. Але, власне, у багатьох сучасних системах, які потребують високоточного вимірювання динамічного тиску, обсяг такої інформації практично мінімальний. Як

правило, відоме лише амплітудне значення тиску. Тому метод безпосереднього корегування похибки у швидкодіючих системах автоматики не має широкого застосування.

Інший спосіб вимірювання динамічного тиску належить до способів відновлення вхідної величини і, як відомо, належить до класу некоректно поставлених задач [13]. Їхнє розв'язання здійснюють методом регуляризації (метод Тихонова) [14], однак практичне його застосування під час вимірювання тієї чи іншої величини не дає бажаних результатів. Така ситуація, очевидно, зумовлена фізичними особливостями як самих величин, так і особливостями вимірювальних приладів, що застосовуються.

Опис перетворювача і принципу вимірювання. В сучасних високоточних системах автоматики у аерокосмічній техніці, двигунобудуванні, теплоенергетиці тощо для вимірювання динамічного тиску широко застосовуються тензометричні перетворювачі, в яких вимірюваний тиск сприймається круглою, жорстко защемленою мембраною, на якій розташовані тензорезистори із струмовиводами (рис. 1).

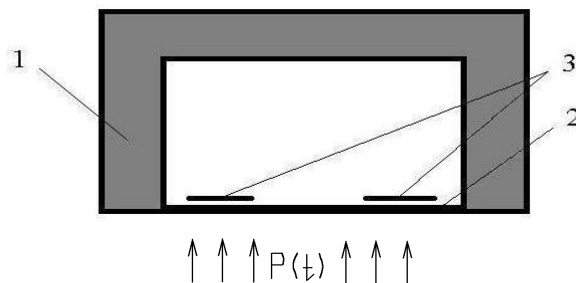


Рис. 1. Структурна схема типового тензометричного перетворювача тиску:
1 – корпус; 2 – мембрана; 3 – тензорезистори

З метою забезпечення вимірювання динамічного тиску в реальному масштабі часу перетворювач додатково містить акселерометр, який розташований в центрі мембрани, електровиводи якого разом із струмовиводами з тензорезисторів під'єднаний до блока обробки сигналів (рис. 2).

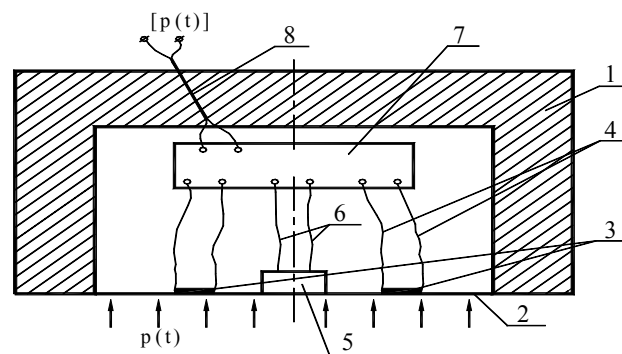


Рис. 2. Принципова схема перетворювача динамічного тиску:
1 – корпус; 2 – мембрана; 3 – тензорезистори із струмовиводами; 4, 5 – акселерометр з електровиводами; 6, 7 – блок обробки сигналів; 8 – вихідний кабель

Процедура вимірювання здійснюється в такий спосіб.

Вимірюваний тиск $p(t)$ сприймається мембраною 2, прогин її центра $w_0(t)$ вимірюють тензорезисторами 3, одночасно акселерометром 5 вимірюють прискорення руху центра мембрани -

$\dot{w}_0(t)$, вихідні сигнали з тензорезисторів 3 через струмовиводи 4, і вихідний сигнал з акселерометра 5 через електровиводи 6 поступають у блок обробки сигналів 7, у блоці обробки вихідних сигналів здійснюється обчислення швидкості руху центра мембрани за формулою

$$\dot{w}_0(t) = \int_0^t \ddot{w}_0(\tau) d\tau, \quad (1)$$

а також відновлення вхідного сигналу в реальному часі шляхом обчислення його значення за формулою

$$[p(t)] = \frac{\ddot{w}_0(t) + 2\beta \dot{w}_0(t) + (\omega_0^2 + \beta^2)w_0(t)}{k\omega_0}, \quad (2)$$

де $w_0(t)$, $\dot{w}_0(t)$, $\ddot{w}_0(t)$ – прогин, швидкість та прискорення центра мембрани; β – коефіцієнт демпфування коливань мембрани; ω_0 – частота власних коливань мембрани; k – сталий коефіцієнт.

Вихідний сигнал $[p(t)]$ з блока обробки сигналів 7, значення якого пропорційне до значення вимірюваного тиску, обчисленого за згаданою формулою, через кабель 8 подають на пристрій, що показує, чи у систему автоматичного керування тощо.

Залежність (2) отримана з таких міркувань.

Нехай кругла мембрана перетворювача жорстко защемлена по контуру і піддана дії тиску $p(t)$, а з протилежного боку на неї діє зосереджена в центрі мембрани сила

$$F(t) = m \cdot \frac{\partial^2 w_0(t)}{\partial t^2},$$

де m – деяка маса; $\frac{\partial^2 w_0(t)}{\partial t^2}$ – прискорення руху центра мембрани, $w_0(t)$ – переміщення центра мембрани (рис. 3).

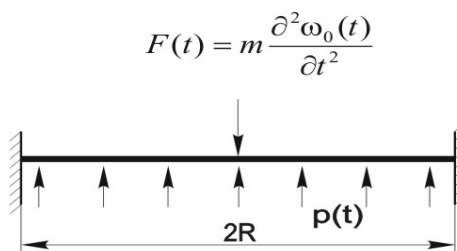


Рис. 3. Схема навантаження мембрани

Як відомо, вільні коливання круглої пластини-мембрани з демпфуванням, які пропорційні до швидкості її руху, описуються рівнянням [15]

$$c^4 \Delta \Delta w(r,t) + \frac{\partial^2 w(r,t)}{\partial t^2} + 2\beta \frac{\partial w(r,t)}{\partial t} = 0, \quad (3)$$

де $c^4 = \frac{D}{\gamma} = \frac{Eh^2}{12(1-\nu^2)\rho}$; E – модуль пружності; ρ і γ – густина і питома вага одиниці площі мембрани; D – циліндрична жорсткість; β – коефіцієнт демпфування; ν – коефіцієнт Пуассона.

Вимушені коливання в першому випадку навантаження мембрани описуються рівнянням [8]

$$c^4 \Delta \Delta w(r, t) + \frac{\partial^2 w(r, t)}{\partial t^2} + 2\beta \frac{\partial w(r, t)}{\partial t} = \frac{p(t)}{\gamma} - \frac{m \partial^2 w_0(t)}{\gamma \partial t^2} \cdot \frac{\delta(r)}{2\pi r}, \quad (4)$$

де $\delta(r)$ – функція Дірака.

Розв’язок рівняння (4) шукаємо у вигляді

$$w(r, t) = \sum_{n=0}^{\infty} \Phi_n(r) \cdot T_n(t) \quad (5)$$

за межових і початкових умов:

$$w(r, t) = \frac{\partial w(r, t)}{\partial r} = 0 \quad \text{при } r = R; \quad (6)$$

$$w(r, t) = \frac{\partial w(r, t)}{\partial t} = 0 \quad \text{при } t = 0. \quad (7)$$

Функцію $\Phi_n(r)$ шукаємо у вигляді

$$\Phi_n(r) = A \cdot J_0(k_n \cdot r) + B \cdot I_0(k_n \cdot r). \quad (8)$$

де A і B – деякі сталі; $J_0(k_n \cdot r)$ і $I_0(k_n \cdot r)$ – функції Бесселя першого і другого роду; $k_n = \frac{\mu_n}{R}$, μ_n – власні значення відповідної межової задачі.

Враховуючи умови (6) для (8), матимемо

$$\left. \begin{aligned} A \cdot J_0(k_n \cdot R) + B \cdot I_0(k_n \cdot R) &= 0 \\ -k_n \cdot A \cdot J_1(k_n \cdot R) + k_n \cdot B \cdot I_1(k_n \cdot R) &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (9)$$

звідки

$$J_0(\mu_n) \cdot I_1(\mu_n) + J_1(\mu_n) \cdot I_0(\mu_n) = 0. \quad (10)$$

З (8) отримаємо власні значення $\mu_n = k_n \cdot R$.

Як власні функції беремо

$$\Phi_n(k_n \cdot r) = J_0(k_n \cdot r) \cdot I_0(\mu_n) + J_0(\mu_n) \cdot I_0(k_n \cdot r). \quad (11)$$

Як відомо, система (11) на відріжку $(0, R)$ є ортогональною з вагою r . Тобто

$$\int_0^R r \cdot \Phi_n(k_n \cdot r) \cdot \Phi_m(k_m \cdot r) = \begin{cases} 0 & \text{за } m \neq n, \\ R^2 \cdot J_0^2(\mu_n) \cdot I_0^2(\mu_n) & \text{за } m = n. \end{cases} \quad (12)$$

Підставляючи (11) в (5) і далі в (4), отримаємо

$$\begin{aligned} c^4 \cdot k_n^4 \cdot \Phi_n(k_n \cdot r) \cdot T_n(t) + \Phi_n(k_n \cdot r) \cdot T_n''(t) + 2\beta \cdot \Phi_n(k_n \cdot r) \cdot T_n'(t) = \\ = \frac{p(t)}{\gamma} - \frac{m}{\gamma} T_n''(t) \cdot (I_0(\mu_n) - J_0(\mu_n)) \cdot \frac{\delta(r)}{2\pi r}. \end{aligned} \quad (13)$$

Помноживши (13) на $r \cdot \Phi_m(k_m \cdot r)$ та інтегруючи від 0 до R , з урахуванням ортогональності (11) і залежностей

$$\int_0^R r \cdot J_0(k_n \cdot r) dr = \frac{R^2 \cdot J_1(\mu_n)}{\mu_n}; \quad (14)$$

$$\int_0^R r \cdot I_0(k_n \cdot r) dr = \frac{R^2 \cdot I_1(\mu_n)}{\mu_n}; \quad (15)$$

$$\int_0^R \delta(r) \cdot f(r) dr = f(0), \quad (16)$$

де $f(r)$ – деяка функція, матимемо

$$\begin{aligned} & R^2 J_0^2(\mu_n) \cdot I_0^2(\mu_n) \cdot \left[c^4 \cdot \frac{\mu_n^4}{R^4} \cdot T_n(t) + T_n''(t) + 2\beta \cdot T_n'(t) \right] = \\ & = \frac{p(t)}{\gamma} \frac{R^2}{\mu_n} [J_1(\mu_n) \cdot I_0(\mu_n) - J_0(\mu_n) \cdot I_1(\mu_n)] - \frac{m}{2\pi\gamma} T_n''(t) \cdot (I_0(\mu_n) - J_0(\mu_n))^2, \end{aligned}$$

звідки

$$T_n''(t) + 2\tilde{\beta} \cdot T_n'(t) + \xi_n^2 \cdot T_n(t) = p(t) \cdot \zeta_n; \quad (17)$$

$$\xi_n^2 = c^4 \cdot \frac{\mu_n^4}{R^2} \frac{2\pi\gamma \cdot J_0^2(\mu_n) \cdot I_0^2(\mu_n)}{(2\pi\gamma R^2 \cdot J_0^2(\mu_n) \cdot I_0^2(\mu_n) + m \cdot (I_0(\mu_n) - J_0(\mu_n))^2)} \quad (18)$$

– власна частота коливань мембрани;

$$\zeta_n = \frac{2\pi\gamma R^2 \cdot (J_1(\mu_n) \cdot I_0(\mu_n) - J_0(\mu_n) \cdot I_1(\mu_n))}{\mu_n \cdot (2\pi\gamma R^2 \cdot J_0^2(\mu_n) \cdot I_0^2(\mu_n) + m \cdot (I_0(\mu_n) - J_0(\mu_n))^2)}; \quad (19)$$

$$\tilde{\beta} = \frac{\beta \cdot 2\pi\gamma R^2 \cdot J_0^2(\mu_n) \cdot I_0^2(\mu_n)}{2\pi\gamma R^2 \cdot J_0^2(\mu_n) \cdot I_0^2(\mu_n) + m \cdot (I_0(\mu_n) - J_0(\mu_n))^2}. \quad (20)$$

Покладаючи, що $\xi_n^2 > \tilde{\beta}$, розв'язок (16) запишемо у вигляді

$$T_n(t) = \frac{\zeta_n}{\eta_n} \int_0^t p(\tau) \cdot e^{-\tilde{\beta}(t-\tau)} \cdot \sin(\eta_n(t-\tau)) d\tau, \quad (21)$$

де

$$\eta_n = \sqrt{\xi_n^2 - \tilde{\beta}^2}. \quad (22)$$

Тоді вимушені коливання мембрани опишуться рівнянням

$$w(r, t) = \sum_{n=0}^{\infty} \Phi_n(k_n \cdot r) \cdot \frac{\zeta_n}{\eta_n} \int_0^t p(\tau) \cdot e^{-\tilde{\beta}(t-\tau)} \cdot \sin(\eta_n(t-\tau)) d\tau. \quad (23)$$

Для практичних обчислень достатньо взяти $n = 0$, і тоді для центра мембрани матимемо

$$w_0(t) = k \cdot \int_0^t e^{-\tilde{\beta}(t-\tau)} p(\tau) \sin(\eta_0 \cdot (t-\tau)) d\tau, \quad (24)$$

приймавши $k = \frac{\zeta_0}{\eta_0} \Phi_0(k_0, 0)$.

Шляхом подвійного диференціювання формули (24) отримаємо

$$[p(t)] = \frac{\ddot{w}_0(t) + 2\beta \dot{w}_0(t) + (\omega_0^2 + \beta^2) w_0(t)}{k\omega_0}.$$

Висновки. Запропонований перетворювач динамічного тиску дає змогу вимірювати тиск довільного характеру в реальному часі, а похибка перетворювача визначається тільки статичними похибками вимірювання прогину мембрани, прискорення руху її центра і похибками обчислення

швидкості руху центра мембрани та значення вимірюваного тиску [16]. При цьому процедура вимірювання здійснюється апаратним відновленням вхідного сигналу.

1. Маркелов И.Г. Комплекс датчиков давления для эксплуатации на объектах атомной энергетики / *Sensors & Systems*. – 2000. – № 11–12. – С. 24–25. 2. Мокров Е.А. 45 лет в космическом приборостроении // *Датчики и системы/ НИИ физических измерений*. – 2005. – № 9. – С.2–3. 3. 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. 4. Соколов Л.В. Анализ возрастающих потребностей в микромеханических сенсорах и МЭМС // *Датчики и системы*. – 2005. – № 6. – С. 41–43. 5. Казарян А.А. Обзор датчиков пульсаций давления // *Измерительная техника*. – 1998. – № 8. – С. 27–31. 6. Козин С.А., Федулов А.В. и др. Создание полупроводниковых интегральных датчиков механических параметров на основе технологии МЭМС // *Датчики и системы*. – 2005. – №9. – С. 48–49. 7. Лурье Г.И., Мартыненко В.Т. Новое поколение полупроводниковых датчиков теплоэнергетических параметров // *Приборы и системы управления*. – 1996. – № 4. – С. 26–28. 8. Тихан М.А. Тензометрические датчики переменного давления для систем автоматики с нестационарными термовлияниями: Автореф. ... канд. техн. наук. – Пенза, 1995. – 18 с. 9. Тихонов А. Н. Коррекция результатов измерения по динамическим характеристикам измерительных систем // *Измерительная техника*. – 1967. – №9. 10. Грановский В.А., Этингер Ю.С. Оценивание и коррекция динамической погрешности средств измерений. Исследования в области оценивания погрешностей измерений: Сб. науч. тр. ВНИИМ. – 1986. – С.32–35. 11. Земельман М.А. Автоматическая коррекция погрешностей измерений. – М. 1972. 12. Лаврова А.Т. Коррекция динамических характеристик датчиков давления // *Метрология*. – 1982. – №3. 13. Василенко Г.И. Теория восстановления сигналов: О редукации к идеальному прибору в физике и технике. – М.: Сов. радио, 1979. – С.272. 14. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. –2-е изд. – М.: Наука, 1979. 15. Василенко Н.В. Теория колебаний. – К.: Вища шк., 1992. 16. Високоточні датчики тиску для систем автоматичного керування у теплоенергетиці, енергообліковуючій та аерокосмічній техніці: Звіт про науково-дослідну роботу № ДЗ /145-2005. – К.: Міністерство освіти та науки України; Львів: Національний університет “Львівська політехніка”.