

вейвлет-перетворення сигналу на ділянках, де спостерігається екстремуми кореляційної функції. Точність вимірювання при застосуванні методу вейвлет-перетворення підвищується. При подальших дослідженнях буде здійснена ідентифікація параметрів об'єктів прецизійних деталей.

Література

1. Биков М.М., Ковтун В.В. Аналіз ефективності ідентифікації диктора за частотою основного тону. Вісник технологічного університету Поділля - Хмельницький: ХДУ - №2. Ч.1. – Т.2. – С.20-24.
2. Пупков К.А., Неусыпин К.А. Выбор оптимальной структуры измерительного комплекса. // Изв.вузов. Приборостроение. – 1998. – Т.41, №1-2. – С.34-39.
3. Воробьев В.И., Грибунин В.Г. Теория и практика вейвлет-перетворения. СПб.: ВУС, 1999. – 203 с.
4. Цыпкин Я.З. Информационная теория идентификации. – М.: Наука–Физ.мат.лит. – 1995. –336 с.
5. Шередко Ю.Л., Марусяк А.В. Способ корректного сведения задачи идентификации к задаче распознавания образов // Управляющие системы и машины.– 2002.– №5. – С.5-12.
6. Ту Д.Т., Гонсалес Р.К. Принципы распознавания образов / Пер. с англ. И.Б. Гуревич; Под ред. Р.И.Журавлева. – М.: Мир, 1978. – 411 с.
7. Сибрин А.П. Вопросы идентификации нелинейных систем управления с использованием частотных характеристик // Применение систем автоматизированного проектирования в приборостроении и машиностроении. – Челябинск, 1980. – С.92-99.

Руднева М.С. Оптимальная модель идентификации при измерении объектов с применением вейвлет-преобразования.

Разработана оптимальная модель идентификации при измерении объектов с применением вейвлет-преобразования. Приведенный метод позволяет обеспечить наиболее эффективный режим работы интеллектуальной системы измерений в реальном масштабе времени.

Rydneva M.S. Optimum model authentication at measuring objects with the use of wavelet – transformation.

The optimum model of authentication at measuring of objects is developed with the use of wavelet-transformation. The resulted method allows to provide the most effective mode of operations of the intellectual system of measurings in the real time.

*Надійшла до редакції
4 вересня 2006 року*

УДК 681.325

ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ ПОБУДОВИ СУМІЩЕНИХ ТЕНЗОМЕТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ДИНАМІЧНОГО ТИСКУ

Тихан М.О., Національний університет “Львівська політехніка”, м. Львів, Україна

Запропоновані головні теоретичні засади побудови нового типу мікромеханічних сенсорів - суміщених тензометричних перетворювачів динамічного тиску, котрі покликані здійснювати вимірювання в реальному масштабі часу

Вступ

Сучасні високотехнологічні галузі, а саме: аерокосмічна промисловість, двигунобудування, теплоенергетика та інші вимагають створення більш швидкодіючих та точніших систем автоматичного контролю та керування [1-6].

Відомо, що на таку швидкодію та точність суттєвий вплив мають первинні вимірювальні перетворювачі, що перебувають у середовищі, параметри стану якого контролюються.

Серед інших вимірюваних параметрів фізичних функціональних процесів у згаданих галузях, вимірювання тиску є вагомим частком. При цьому, однією з головних особливостей вимірюваного тиску є його швидкоплинність (динамічність) у поєднанні з непередбачуваним перебігом. Довільність і непередбачуваність динамічності тиску полягає у тому, що в одному вимірювальному акті він може мати як різко змінний (ударний) характер з періодичною, або неперіодичною повторюваністю, так і “гладкий”-гармонійний, майже гармонійний і т.п. характер, а також мати статичні ділянки. Тобто, вимірюваний тиск - це сильно виражений нестационарний процес.

Оскільки вихідний сигнал з перетворювача є інформативним при формуванні керуючих сигналів для виконавчих механізмів швидкодіючих систем автоматики, тому існує потреба вимірювань у реальному масштабі часу, або якомога близько до цього.

Як відомо, вимірювання динамічних величин відноситься до класу некоректно поставлених задач [7]. Розв’язок цих задач здійснюють методом регуляризації (метод Тихонова) [8], однак практичне його застосування при вимірюванні динамічного тиску в реальному масштабі часу не дає бажаних результатів. Така ситуація очевидно зумовлена фізичними особливостями як самої величини, так і особливостями вимірювальних приладів, що застосовуються.

Спосіб та перетворювач для вимірювання динамічного тиску в реальному масштабі часу

На сьогодні відомий апаратно-обчислювальний спосіб і відповідний перетворювач для вимірювання динамічного тиску в реальному масштабі часу [9, 10]. Суть запропонованих ідей полягає у такому.

Відомо, що робота лінійних систем в динамічному режимі описується інтегралом згортки [11]

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

де $g(t, \tau)$ – імпульсна перехідна характеристика; $U(t)$ – вихідний сигнал перетворювача; $p(t)$ – вимірюваний тиск (вхідний сигнал).

Припускаємо, що $g(t, \tau) \neq 0$ і $\ddot{g}(t, \tau)$ та $\ddot{U}(t)$ існують і є неперервними.

Враховуючи конструктивні особливості тензометричних перетворювачів тиску, інтеграл згортки можна подати у більш явному вигляді

$$U(t) = k \cdot \int_0^t e^{-\beta(t-\tau)} p(\tau) \sin(\eta_0 \cdot (t - \tau)) d\tau \quad (2)$$

де β – коефіцієнт демпфування коливань первинного пружного перетворювача; η_0 – основна частота його власних коливань; k – статичний коефіцієнт перетворення.

Подвійним диференціюванням залежності (2), отримуємо

$$\ddot{U}(t) = -2 \cdot \beta \cdot \dot{U}(t) + k \cdot \eta_0 \cdot p(t) - (\eta_0^2 + \beta^2) \cdot U(t)$$

З останнього рівняння маємо

$$p(t) = \frac{\ddot{U}(t) + 2 \cdot \beta \cdot \dot{U}(t) + (\eta_0^2 + \beta^2) \cdot U(t)}{k \cdot \eta_0} \quad (3)$$

Формула (3) є ключовою до способу вимірювання динамічного тиску в реальному масштабі часу.

Отже, суть способу є такою:

1. Безпосереднім вимірюванням тиску одержуємо значення вихідного сигналу перетворювача – $U(t)$, яке пропорційне деформації первинного пружного елемента.

2. Одночасно, тим чи іншим способом вимірюємо значення величини $\ddot{U}(t)$, яка згідно до фізичної суті тензометричних перетворювачів пропорційна пришвидченню деформації первинного пружного елемента.

2. Числовим інтегруванням величини $\ddot{U}(t)$ отримуємо значення величини $\dot{U}(t)$, котра з фізичного погляду пропорційна швидкості деформації первинного пружного елемента.

3. Знаючи конструктивні параметри η_0 , β , та k , а також використовуючи залежність (3), відновлюємо вхідний сигнал $p(t)$.

Оскільки вимірювання величин $U(t)$ і $\ddot{U}(t)$, а також обчислення величини $\dot{U}(t)$ відбувається практично одночасно, то можна стверджувати, що процедура вимірювання вхідного динамічного тиску $p(t)$ здійснюється у реальному масштабі часу із затримкою, зумовленою лише обчислювальною процедурою.

Для реалізації описаного способу вимірювання динамічного тиску запропоновано суміщений тензометричний перетворювач, принципова конструктивна схема якого показана на Рис.1 [9].

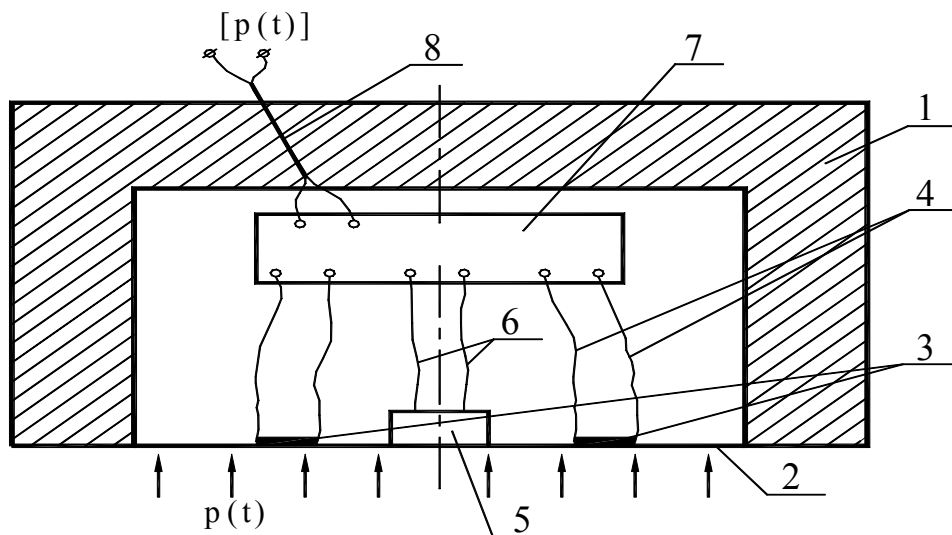


Рисунок 1 – Принципова схема суміщеного перетворювача динамічного тиску

Суміщений перетворювач динамічного тиску містить корпус 1 з круглою

жорстко заземленою мембраною 2, на якій розташовані тензорезистори 3 і акселерометр 5, що розташований в центрі мембрани, електровиводи якого 6 разом з струмовиводами з тензорезисторів 4 під'єднані до блоку обробки сигналів 7.

Процедура вимірювання здійснюється таким чином.

Вимірюваний тиск $p(t)$ сприймається мембраною 2, її прогин $U(t)$ вимірюють тензорезисторами 3, одночасно акселерометром 5 вимірюють прискорення руху центра мембрани – $\ddot{U}(t)$, 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 згідно формули

$$\dot{U}(t) = \int_0^t \ddot{U}(\tau) d\tau, \quad (4)$$

а також відновлення вхідного сигналу в реальному часі обчисленням його значення за формулою (3).

Очевидно, що прискорення $\ddot{U}(t)$ саме по собі є динамічною величиною. Тому при його вимірюванні постають ті ж самі проблеми, як і при вимірюванні динамічного тиску. Але тут є одна суттєва особливість.

Як відомо, загальна динамічна похибка має дві складові - динамічну похибку перехідної фази, що залежить від швидкості зміни вхідного сигналу, і динамічну похибку усталеної фази, що залежить від співвідношення частоти вхідного сигналу і власної частоти перетворювача.

Для первинного перетворювача-мембрани найбільш швидкозмінним вхідним сигналом є стрибок тиску, відгук на який є фактично перехідною функцією мембрани. Як відомо, ця функція є затухаючою по експоненті синусоїдою з частотою власних коливань мембрани. Тому саме перехідна функція мембрани буде найбільш швидкозмінним і найбільш високочастотним вхідним сигналом для акселерометра.

Отже, для суміщених перетворювачів динамічного тиску необхідно з'ясувати, при яких фізичних параметрах акселерометра, як коливної системи, його загальна динамічна похибка буде не більшою від заданої. Для вирішення цієї задачі оцінимо динамічну похибку лінійної коливної системи при гармонійному вхідному сигналі

$$p(t) = \frac{p_0}{2} (1 - \cos \omega t) \quad (5)$$

де p_0 , ω – амплітуда та частота вхідного сигналу.

Підставивши вираз (5) у формулу (2) отримуємо

$$U(t) = k \cdot \int_0^t e^{-\beta(t-\tau)} \cdot \frac{p_0}{2} (1 - \cos \omega \tau) \cdot \sin(\eta_0 \cdot (t - \tau)) d\tau = \frac{k}{2} p_0 [\Psi_1 + \Psi_2 + \Psi_3] \quad (6)$$

$$\Psi_1 = \frac{\eta_0 - e^{-\beta t} (\eta_0 \cdot \cos \eta_0 t + \beta \cdot \sin \eta_0 t)}{\eta_0^2 - \beta^2},$$

де

$$\Psi_2 = \frac{\beta}{2} \left[\frac{1}{\beta^2 + (\eta_0 - \omega)^2} \left(\sin \omega t + \frac{\eta_0 - \omega}{\beta} \cos \omega t - e^{-\beta t} \left(\sin \eta_0 t + \frac{\eta_0 - \omega}{\beta} \cos \eta_0 t \right) \right) \right],$$

$$\Psi_3 = \frac{\beta}{2} \left[\frac{1}{\beta^2 + (\eta_0 + \omega)^2} \left(\frac{\eta_0 + \omega}{\beta} \cos \omega t - \sin \omega t - e^{-\beta t} \left(\sin \eta_0 t + \frac{\eta_0 + \omega}{\beta} \cos \eta_0 t \right) \right) \right]$$

Очевидно, що залежність (6) – це амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) перетворювача в часовій області, що дозволяє знайти його загальну динамічну похибку при тій чи іншій частоті вхідного гармонійного сигналу в конкретний момент часу, а також дозволяє відшукати максимальну динамічну похибку перетворювача з урахуванням як перехідної, так і усталеної фаз вимірювального перетворення, а також фазового зміщення.

Відшукаємо максимальну відносну динамічну похибку на деякому проміжку часу. Оскільки при статичному вимірюванні вихідний сигнал перетворювача становив би

$$U_{ст} = k \cdot p, \quad (7)$$

то максимальна відносна динамічна похибка перетворювача тиску становитиме

$$\delta_{\max}(\zeta) = \frac{\max[U(t) - U_{ст}]}{U_{ст}^{\max}} 100\% \quad (8)$$

де $U_{ст}^{\max}$ – максимальне значення статичного сигналу.

На рис.2 подане графічне зображення розрахованої за формулою (8) залежності максимальної відносної динамічної похибки перетворювача від співвідношення власної частоти перетворювача до частоти вхідного сигналу

$$\zeta = \eta_0 / \omega.$$

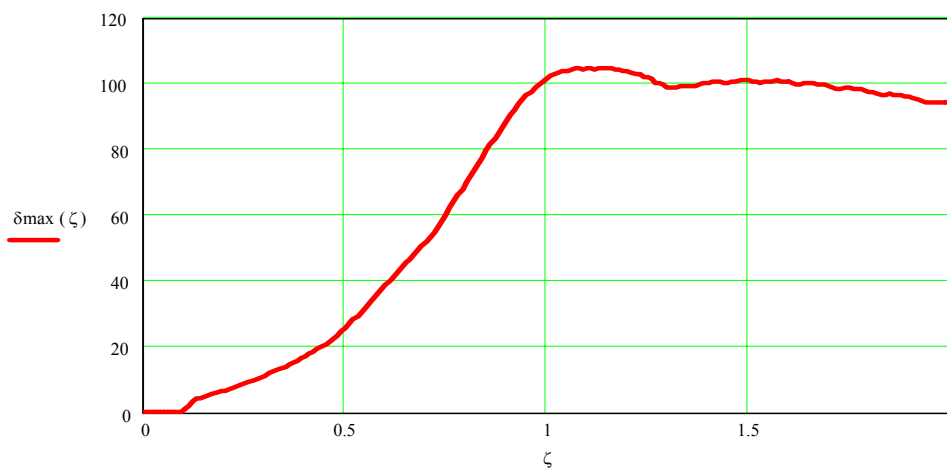


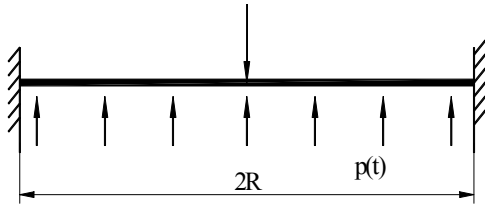
Рисунок 2 – Залежність відносної основної динамічної похибки перетворювача від співвідношення частот $z = \eta_0 / \omega$.

За отриманою залежністю можна визначити співвідношення власної частоти коливання мембрани і власної частоти коливання акселерометра, при якому основна динамічна похибка останнього не буде більшою від заданої. Такий розрахунок враховуватиме як усталену, так і перехідну фази вимірювального перетворення, а також враховуватиме фазове зміщення. Так, скажімо, при співвідношенні згаданих частот 1/10 динамічна похибка акселерометра становить 0,1%, що для багатьох випадків менше від статичної похибки.

Отже, для суміщених перетворювачів намагання збільшити власну частоту коливання акселерометра є цілком логічним. Проте у цьому випадку зростатиме його маса. Оцінимо, як це відіб'ється на динамічних властивостях перетворювача загалом.

Для з'ясування цієї проблеми дослідимо динаміку круглої, жорстко защемленої мембрани при схемі навантаження поданої на Рис.3.

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



Рисунки 3 – Схем навантаження мембрани

Тобто, на мембрану діє тиск $p(t)$, а з протилежної сторони – зосереджена в центрі мембрани сила $F(t) = m \cdot \frac{\partial^2 w_0(t)}{\partial t^2}$, де m – деяка маса, $\frac{\partial^2 w_0(t)}{\partial t^2}$ – пришвидчення руху центра мембрани.

Вимушені коливання при даній схемі навантаження мембрани опишуться рівнянням [10]

$$c^4 \Delta \Delta w(r, t) + \frac{\partial^2 w(r, t)}{\partial t^2} + 2\beta \frac{\partial w(r, t)}{\partial t} = \frac{p(t)}{\gamma} - \frac{m \partial^2 w_0(t)}{\gamma \partial t^2} \cdot \frac{\delta(r)}{2\pi r} \quad (9)$$

де $c^4 = \frac{D}{\gamma}$, D – циліндрична жорсткість, γ – питома вага одиниці площі мембрани, β – коефіцієнт демпфування, $\delta(r)$ – функція Дірака.

Як відомо [10], розв'язок рівняння (9) записується у вигляді

$$w(r, t) = \sum_{n=0}^{\infty} \Phi_n(k_n \cdot r) \cdot \frac{\zeta_n}{\eta_n} \int_0^t p(\tau) \cdot e^{-\tilde{\beta}(t-\tau)} \cdot \sin(\eta_n(t-\tau)) d\tau \quad (10)$$

де $\Phi_n(k_n \cdot r) = J_0(k_n \cdot r) \cdot I_0(\mu_n) + J_0(\mu_n) \cdot I_0(k_n \cdot r)$ – власна функція відповідної межевої задачі, $J_0(k_n \cdot r)$ і $I_0(k_n \cdot r)$ – функції Бесселя першого і другого роду,

$k_n = \frac{\mu_n}{R}$, μ_n – власні значення відповідної межевої задачі,

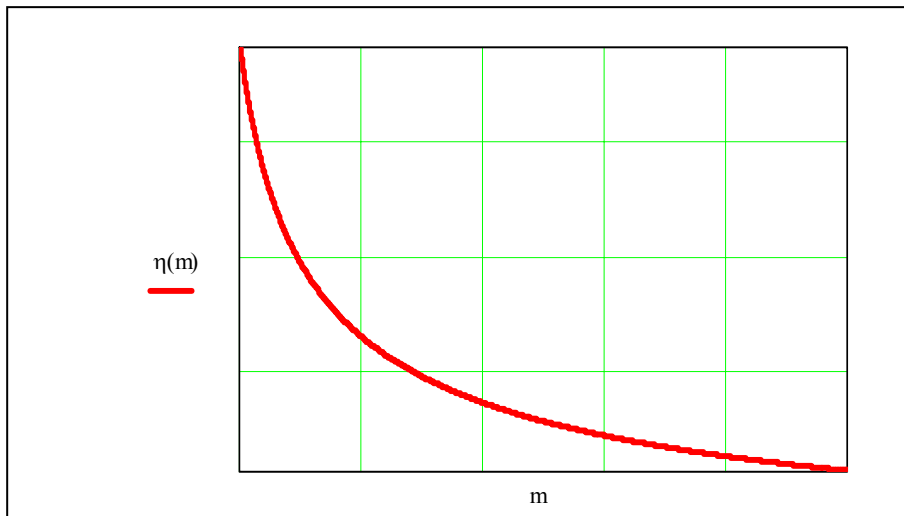
$$\zeta_n = \frac{2\pi\gamma R^2 \cdot (J_1(\mu_n) \cdot I_0(\mu_n) - J_0(\mu_n) \cdot I_1(\mu_n))}{\mu_n \cdot (2\pi\gamma R^2 \cdot J_0^2(\mu_n) \cdot I_0^2(\mu_n) + m \cdot (I_0(\mu_n) - J_0(\mu_n))^2)} \quad (11)$$

$$\eta_n = \sqrt{\zeta_n^2 - \tilde{\beta}^2} \text{ – власна частота коливань мембрани.} \quad (12)$$

$$\zeta_n^2 = c^4 \cdot \frac{\mu_n^4}{R^2} \cdot \frac{2\pi\gamma \cdot J_0^2(\mu_n) \cdot I_0^2(\mu_n)}{(2\pi\gamma R^2 \cdot J_0^2(\mu_n) \cdot I_0^2(\mu_n) + m \cdot (I_0(\mu_n) - J_0(\mu_n))^2)} \quad (13)$$

$$\tilde{\beta} = \frac{\beta \cdot 2\pi R^2 \cdot J_0^2(\mu_n) \cdot I_0^2(\mu_n)}{2\pi R^2 \cdot J_0^2(\mu_n) \cdot I_0^2(\mu_n) + m \cdot (I_0(\mu_n) - J_0(\mu_n))^2} \quad (14)$$

Вираз (12) засвідчує, що власна частота коливань мембрани залежить від



зосередженої в її центрі маси (маса акселерометра). Якісний характер такої залежності подано на рис.4.

Рисунок 4 – Залежність власної частоти мембрани від значення зосередженої маси

Така ситуація буде регламентувати вибір конструкції акселерометра, адже зростання його маси відчутно змінює динамічні властивості перетворювача загалом.

Покладаючи у виразі (14) $p(\tau) = p_0 = \text{const}$ при $t \geq 0$, отримуємо перехідну функцію мембранного перетворювача

$$w(r, t) = p_0 \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \Phi_n(k_n \cdot r) \cdot \frac{\zeta_n}{\eta_n} \cdot \left[\frac{\eta_n - e^{-\tilde{\beta} \cdot t} (\eta_n \cdot \cos \eta_n t + \tilde{\beta} \sin \eta_n t)}{\eta_n^2 + \tilde{\beta}^2} \right] \quad (19)$$

З виразу (19) отримуємо залежність, що дозволяє розрахувати ще один важливий динамічний параметр – мінімальну тривалість погасання перехідних коливань мембрани. Покладаючи, що перехідний процес погас, якщо амплітуда перехідних коливань менша від тисячної частки усталеного значення, то необхідний для цього час становитиме

$$t(m) = \frac{\pi}{\eta_0} + \frac{1}{\tilde{\beta}} \ln \left(\eta_0 \cdot \frac{10^3}{\sqrt{\eta_0^2 + \tilde{\beta}^2}} \right), \quad (20)$$

де η_0 – основна власна частота коливань мембрани.

Якісний характер залежності (20) подано на рис.5.

Висновки

Отримані аналітичні залежності є принциповими теоретичними засадами при створенні суміщених тензометричних перетворювачів тиску, котрі покликані здійснювати вимірювання в реальному масштабі часу, і є перспективним напрямком досліджень. Крім цього, залежності (16) і (20) визначають потенційні вимірювальні можливості перетворювача загалом. Тобто, значення власної частоти коливань мембрани визначатиме допустимий частотний діапазон вимірюваного тиску, якщо він матиме неперервний періодичний чи майже періодичний характер. Для ударного характеру тиску залежність (20) регламентуватиме його допустиму шпаруватість.

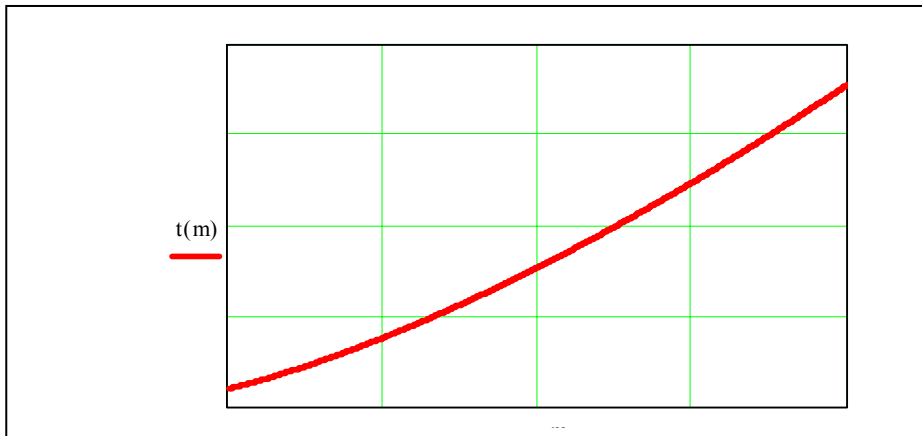


Рисунок 5 – Залежність тривалості погасання перехідних коливань мембрани від значення зосередженої маси

Література

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. НИИ физических измерений. 45 лет в космическом приборостроении// Датчики и системы. № 9.2005. - 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. № 6. - 2005. - С. 10-14.
4. Соколов Л.В. Анализ возрастающих потребностей в микромеханических сенсорах и МЭМС. Датчики и системы. № 6.2005. - С. 41-43.
5. Козин С.А., Федулов А.В. и др. Создание полупроводниковых интегральных датчиков механических параметров на основе технологии МЭМС. Датчики и системы. №9, 2005. - С. 48-49.
6. Лурье Г.И., Мартыненко В.Т. Новое поколение полупроводниковых датчиков теплоэнергетических параметров. Приборы и системы управления, 1996, № 4, с. 26 – 28.
7. Василенко Г. И. Теория восстановления сигналов: О редукации к идеальному прибору в физике и технике. - М.: Сов. радио, 1979. с.272.
8. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач // М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979. Издание 2-е.
9. M. Tykhan. Method for input signal restoration during dynamic pressure measurement and its sensor. 18th IMEKO WORLD CONGRESS . Rio de Janeiro, Brazil. September 17 – 22, 2006. V. IX A, p. 99-103.
10. Високоточні датчики тиску для систем автоматичного керування у теплоенергетиці, енергообліковуючій та аерокосмічній техніці. Звіт про науково-дослідну роботу № ДЗ /145-2005. Міністерство освіти та науки України, Національний університет "Львівська політехніка".
11. Азизов А. М., Гордов А. Н. Точность измерительных преобразователей. М.: Энергия, 1975р., с.256.

Тихан М.О. Теоретические аспекты совмещенных тензометрических преобразователей динамического давления.

Предложены главные теоретические основы нового типа микромеханических датчиков-совмещенных тензометрических преобразователей динамического давления, которые дают возможность измерения в реальном масштабе времени.

Tyhan M.O. The theoretical foundation of the sensors-combined dynamics pressure piezoresistive transducers

The principal theoretical foundation of new type mikromechanic sensors-combined dynamics pressure piezoresistive transducers, which give a possibility measurement in real time has been proposed.

Надійшла до редакції
9 січня 2007 року