

них ситуаційних точок шкали, але, як і раніше, збільшення числа опорних ситуацій більше чотирьох недоцільне.

6. Комплексна оцінка метрологічних характеристик вимірювальної підсистеми АІВУС

У даному випадку об'єктом ситуаційного опису є вимірювальна підсистема АІВУС, яка вимірює значення технологічних параметрів. При наявності n вимірювальних каналів загальна ситуаційна картина буде складатися як логічне об'єднання ситуацій $(\tilde{S}_\ell, \ell \in L = \{1, 2, \dots, n\})$.

Якщо припустити, що $S = \{\tilde{S}_1, \tilde{S}_2, \dots, \tilde{S}_n\}$, то найпростішим метрологічним "образом" стану вимірювальної підсистеми може бути запропонована функція перетину нечітких множин \tilde{C}_j у базовій множині D єдиної для усіх ВК ознаки нечіткої ситуації Z_1 і заданого терму T_j^1 з множини термів:

$$\bigcap_{i=1}^n \tilde{C}_j^i = \left\{ \left\langle \mu_{\tilde{C}_j}(y_j) / y_j \right\rangle \right\}, \quad j \in J = \{1, 2, \dots, m_j\}$$

де $\mu_{\tilde{C}_j}(y_j) = \bigwedge_{i=1}^n \mu_{\tilde{C}_j^i}(d) = \min[\mu_{C^{(\alpha_1)}}(d), \mu_{C^{(\alpha_2)}}(d), \dots, \mu_{C^{(\alpha_n)}}(d)]$.

У такій формі функція належності однакових ознак (лінгвістичних змінних) ситуації, наприклад, ознаки $Z \rightarrow$ "похибка y_j ", для одного й того ж терму T_j^1 "мала - S" визначиться як перетин n значень ФН нечіткої змінної α_j для конкретного, одного й того ж для всіх ВК параметра, наприклад, при $j=1$. Тут $\tilde{C}^i(\alpha_1)$ - нечітка множина нечіткої змінної $\alpha_1 \rightarrow$ "мала - S" для 1-го ВК АІВУС.

Висновки

Запропонована модель МС у вигляді ССНІ на другому рівні АІВУС дозволяє вирішити задачу метрологічної координації для забезпечення метрологічної сумісності статистичних оцінок стану ВК на першому рівні з експертними оцінками загального метрологічного "образу".

Такий підхід дозволяє як аналізувати поточну метрологічну ситуацію у системі, так і визначати параметри процесів її зміни, що дозволяє визначити необхідну періодичність контролю і необхідність проведення корекції похибок ВК.

Така інформаційна метрологічна експертна система дозволить поліпшити технічні та споживчі характеристики систем АІВУС при управлінні технологічними об'єктами. Вона інваріантна до задання моделей похибок як статистичними методами, так і характеристиками невизначеності результатів вимірювань.

Список літератури

1. Кондрашов С.І. Методи підвищення точності систем тестових випробувань електричних вимірювальних перетворювачів у робочих режимах. -Харків: НТУ "ХПІ", 2004. -224 с.
2. Мелихов А.Н., Бернштейн Л.С., Коровин С.Я. Ситуационные советующие системы с нечеткой логикой. -М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1990. -272 с.
3. Диденко К.И., Кондрашов С.И. Метрологический наблюдатель в системах контроля и управления //Український метрологічний журнал. - 1997. -Вип. 2. -С. 44-47.
4. Кофман А. Введение в теорию нечетких множеств. -М.: Радио и связь, 1982. -432 с.
5. Кондрашов С.И. Метрологическая и ситуационная модели погрешностей измерительного канала в точке шкалы //Сб. науч. тр. ХГПИУ. Вып. 13. -Харьков: ХГПИУ, 1998. -С. 6-8.
6. Ціделко В, Хандоняк В. Інформаційні технології на базі нечіткої логіки (FUZZY LOGIC) //Вимірювальна техніка та метрологія: Зб. наук. праць НУ "Львівська політехніка". № 58. -Львів, 2001. -С. 3-15.
7. Чинков В.М. Основи метрології та вимірювальної техніки: Навч. посібн. -2-ге вид., перероб. і доп. -Харків: НТУ "ХПІ", 2005. -С. 149.

УДК 621.313

ОЦІНКА СТАТИЧНИХ МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИМІРЮВАЛЬНОГО КАНАЛУ ВІБРАЦІЇ

В.О.Поджаренко, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри Вінницького національного технічного університету (ВНТУ)

О.М.Васілевський, здобувач ВНТУ, м. Вінниця

В.М.Севастьянов, аспірант ВНТУ, м. Вінниця

Розглядається методика оцінки основних статичних метрологічних характеристик вимірювального каналу вібрації, яка дозволяє отримати їх аналітичні залежності та синтезувати вимірювальний канал вібрації з нормованими метрологічними характеристиками.

The methods of estimation of the main statical metrological characteristics of the measurement channel of vibration, which permits to obtain their analytical dependences and synthesize the measurement channel of vibration with normalized metrological characteristics, are considered.

Вступ

Інформаційно-вимірювальна техніка має великий арсенал різноманітних технічних засобів з нормованими метрологічними характеристиками. Тому актуальною є проблема вибору необхідних технічних засобів для вимірювання вібрації електромеханічних систем (ЕМС). До основних статичних метрологічних характеристик відносять такі: функцію перетворення, чутливість, адитивну та мультиплікативну похибки, похибку нелінійності [1]. Цих характеристик достатньо, щоб здійснити нормування точності вимірювальних каналів (ВК) вібрації ЕМС у статичному режимі роботи. Також необхідно, щоб і математичний апарат досліджень ВК вібрації в статичному режимі роботи дозволяв просто отримувати виділені нормативними документами метрологічні характеристики. Для дослідження статичних метрологічних характеристик використовується математичний апарат розкладу функції перетворення в ряд Тейлора [2].

Аналіз стану досліджень та публікацій. Статичні метрологічні характеристики ВК вібрації ще малодосліджені. Відомі робота [3], в якій було описано п'єзоелектричний акселерометр та попередній підсилювач без аналізу їх статичних метрологічних характеристик, та робота [4], в якій описується математичний апарат для дослідження метрологічних характеристик, але такий підхід не дозволяє оцінити основні статичні метрологічні характеристики. Тому в даній публікації розклад рівняння перетворення ВК вібрації в ряд Тейлора спрямований на отримання аналітичних та графічних залежностей для статичних метрологічних характеристик при опосередкованих вимірюваннях.

Формування цілей статті. З огляду на вищесказане, метою публікації є розробка електричної схеми ВК вібрації, отримання та моделювання аналітичних залежностей для рівняння перетворення, чутливості, абсолютної та відносної похибок нелінійності, мультиплікативної та адитивної похибок ВК вібрації опосередкованих вимірювань, їх аналіз.

Оцінка статичних метрологічних характеристик

У складних умовах проведення вимірювань, коли акселерометри, з'єднувальні кабелі і штепсельні з'єднання піддаються дії механічних навантажень, вологи, пилу та агресивних середовищ, на якість роботи ВК і на похибки вимірювання можуть суттєво впливати неконтрольовані зміни параметрів елементів на його вході. Всі ці фактори можуть бути причинами значного збільшення похибки вимірювання. В якості вхідних перетворювачів ВК використовують, як правило, підсилювач заряду (рис. 1) [3], який перетворює вихідний сигнал п'єзоелектричного акселерометра в електричну напругу. На рис. 1 позначено: Q_a – електричний заряд; R_a – опір акселерометра; C_a – ємність акселерометра; R_c – опір з'єднувального кабелю і відповідних з'єднань; C_c – ємність з'єднувального кабелю і відповідних з'єднань; R_p – опір вхідного кола підсилювача заряду; C_p – ємність вхідного кола підсилювача заряду; R_f – опір кола зворотного зв'язку; C_f – ємність кола зворотного зв'язку; K – коефіцієнт підсилення підсилювача заряду; U_1 – вихідна напруга підсилювача заряду; ПФ – полосовий фільтр; НЕ – нелінійний елемент операційного підсилювача (ОП) ПФ; K_{10} – коефіцієнт передачі ланцюга каскадів підсилювача ПФ; K_{33} – коефіцієнт зворотного зв'язку ПФ; МП – масштабний перетворювач; K_n – коефіцієнт підсилення МП; N_x – бінарний код аналого-цифрового перетворювача (АЦП).

ВК вібрації являє собою сукупність вимірювальних пристроїв та засобів вимірювань, які вибрані згідно з [3, 4]. Подана на рис. 1 еквівалентна електрична схема ВК є основою для побудови апаратних засобів вимірювань сигналів вібрації. Тип сенсора вібрації (п'єзоелектричний, ємнісний, потенціометричний і т. ін.) та попереднього підсилювача (по заряду чи по напрузі) визначає підходи до аналізу метрологічних характеристик.

П'єзоелектричний акселерометр на сьогодні є найкращим вібродатчиком для абсолютних вимірювань механічних коливань та ударів. Активні

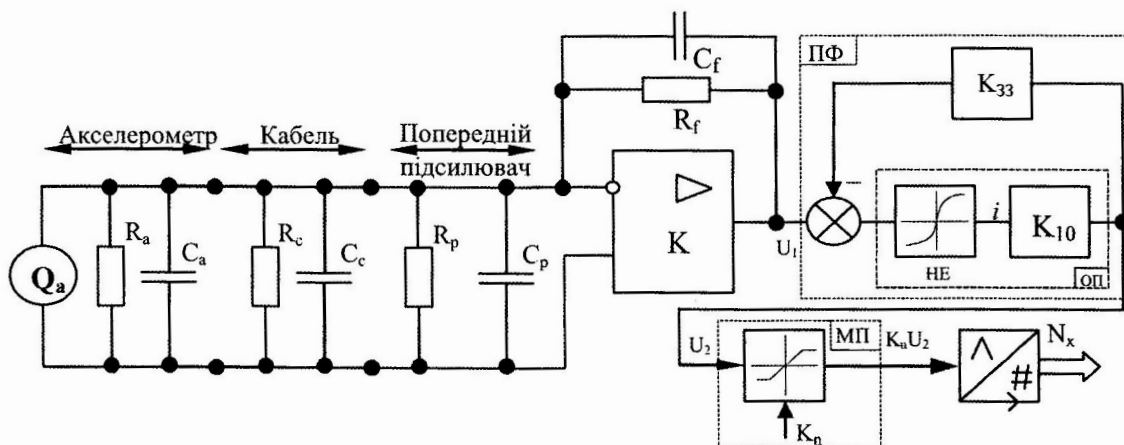


Рис. 1. Еквівалентна електрична схема ВК вібрації

елементи даного акселерометра, виготовлені з п'єзоелектричного матеріалу, виконують роль пружин, які забезпечують механічний зв'язок між джерелом вібрації і сейсмичними (інерційними) масами акселерометра [3]. Діючі на основу акселерометра механічні коливання приводять до того, що на п'єзоелементи діє динамічна сила, яка дорівнює добутку прискорення сейсмичної маси на відповідну масу. А п'єзоелементи генерують електричний заряд Q_a , пропорційний діючій на них динамічній силі:

$$Q_a = X_s \cdot k / m_s, \quad (1)$$

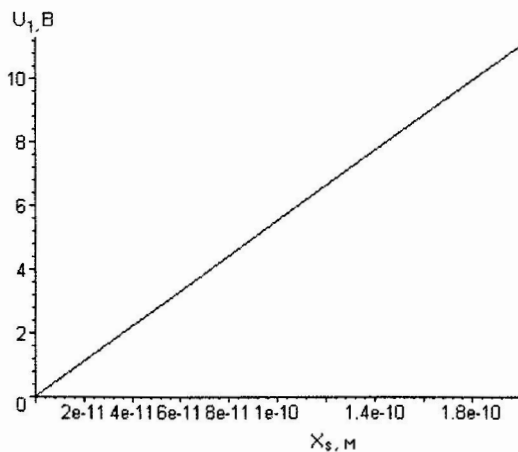
де X_s – механічні переміщення акселерометра; k – еквівалентна жорсткість п'єзоелементів; m_s – маса акселерометра.

Вихідна напруга підсилювача заряду U_1 пропорційна вхідному заряду Q_a і, відповідно, прискоренню механічних коливань, які сприймає з'єднаний з підсилювачем заряду акселерометр. Загальний коефіцієнт підсилення підсилювача заряду визначається ємністю кола зворотного зв'язку C_f , яка міститься в останньому операційного підсилювача. На вході підсилювача заряду є тільки струми від акселерометра і від конденсатора в колі зворотного зв'язку операційного підсилювача. Ці струми мають однакову амплітуду, але протилежні знаки. Таким чином, весь електричний заряд Q_a , що віддає акселерометр, передається конденсатору C_f в колі зворотного зв'язку, який передбачений в підсилювачі заряду (рис. 1). Тоді вихідна напруга підсилювача заряду U_1 визначається за формулою

$$U_1 = Q_a / ((1 + 1/K \cdot (1 + C_f/C_i)) \cdot C_f), \quad (2)$$

де $C_i = C_a + C_c + C_p$ – загальна вхідна ємність підсилювача заряду.

Отже, під дією інформативного параметра (механічного переміщення X_s) на виході акселерометра виникає електричний заряд Q_a , який прямо пропорційний напрузі підсилювача заряду U_1 , що наглядно видно з рис. 2а.



а

Для достовірної оцінки параметрів вібрації необхідно ефективно виділити інформативну полосу частот за допомогою ПФ (рис. 1). Схема ПФ містить один зворотний зв'язок, який охоплює ОП [4]. Реакція ланки ПФ на появу вхідної напруги U_1 (напруги підсилювача заряду) описується таким рівнянням:

$$U_2 = k_n^3 \cdot K_{10} \cdot I_0 \cdot U_1^3 / 6 \cdot (1 + K_{33} \cdot K_{10} \cdot k_n \cdot I_0)^4, \quad (3)$$

де U_1, U_2 – напруга на вході і виході ПФ відповідно; K_{33} – коефіцієнт передачі кола зворотного зв'язку; K_{10} – коефіцієнт передачі кола каскадів підсилювача ОП, які йдуть за його диференційним каскадом; I_0 – струм спокою диференційного каскаду; k_n – параметр нелінійності, який визначається властивостями вольт-амперних характеристик транзисторів.

Коефіцієнт k_n визначається параметрами елементів, які формують нелінійність та їх режими роботи. У даному випадку для нелінійності диференційного каскаду на польових транзисторах з керуючим $n-p$ -переходом, які працюють у режимі сильної інверсії та забезпечують найкращу лінійність підсилювача, відомо, що

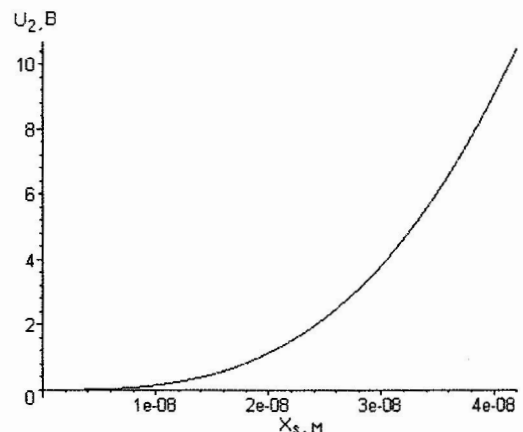
$$k_n = \pi / [2 \cdot U_p \cdot (0,2 + 1,04 \cdot I_0 / I_{DSS} - 0,26 \cdot (I_0 / I_{DSS})^3)], \quad (4)$$

де U_p, I_{DSS} – напруга відсічки і струм насичення польового транзистора відповідно.

Як видно з рис. 2б, вхідне механічне переміщення X_s , після виділення інформативної полоси частот за допомогою ПФ, пов'язане з вихідною напругою ПФ U_2 нелінійною залежністю.

Після виділення інформативної полоси частот, сигнал U_2 з виходу ПФ масштабується за допомогою МП відповідно до вибраного АЦП, після чого перетворюється у відповідний код на виході АЦП N_x [5]:

$$N_x = K_n \sum_{i=1}^m U_{2i} \cdot B^{i-1}, \quad (5)$$



б

Рис. 2. Залежність вихідної напруги: а – підсилювача заряду; б – полосового фільтра від механічних переміщень акселерометра

де m – кількість розрядів АЦП; B – основа системи числення.

Згідно з експлуатаційними характеристиками, номінальна ємність кола зворотного зв'язку стандартних підсилювачів заряду фірми "Брюль і К'єр" становить $C_f = 1$ нФ, тобто значення, яке відповідає коефіцієнту підсилення, рівному 1 мВ/пКл, а загальна вхідна ємність, як правило, становить $C_f = 10$ пФ [3].

Струм спокою диференційного каскаду $n-p$ польових транзисторів складає $I_0 = 5$ мА, напруга відсічки $U_p = 2,5$ В, а струм насичення польового транзистора $I_{DSS} = 50$ мА.

Отже, з урахуванням вищевказаних параметрів та рівнянь (1) – (5) остаточне рівняння перетворення ВК вібрації в статичному режимі матиме вигляд

$$N_x = (k_n^3 \cdot K_{10} \cdot I_0 \cdot K_n \cdot X_s^3 \cdot k^3 \cdot B^{m-1}) \times [6 \cdot (1 + K_{33} \cdot K_{10} \cdot k_n \cdot I_0)^4]^{-1} \times [m_s^3 \cdot ((1 + 1/K \cdot (1 + C_f/C_i)) \cdot C_f)^3]^{-1}, \quad (6)$$

а його графічне представлення зображено на рис. 3.

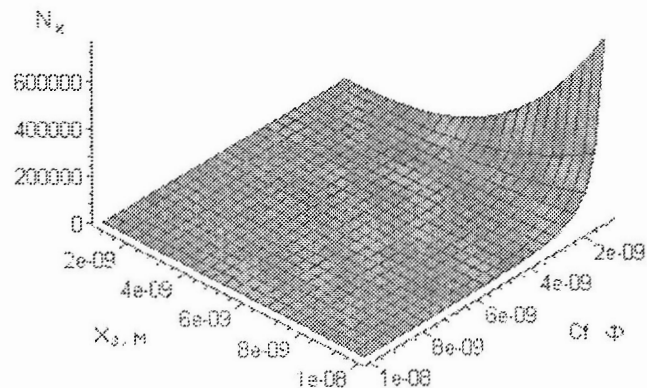


Рис. 3. Просторова функція ВК вібрації

Отримана статична характеристика нелінійна, а рівняння перетворення ВК вібрації є вихідним при отриманні аналітичних залежностей для оцінки таких статичних метрологічних характеристик, як: номінальна функція перетворення, чутливість, похибка нелінійності, адитивна і мультиплікативні складові похибок.

У робочих умовах ВК вібрації здійснює функціональне перетворення інформативного параметра X_s у вихідний код N_x . Крім інформативного сигналу, на нього діють впливаючі величини, до яких відносяться всі інші параметри, що мають безпосередній зв'язок з вихідною величиною N_x і спричиняють виникнення неінформативної складової перетворення. Аналіз отриманого рівняння перетворення ВК (6) показує, що на процес перетворення інформативного параметра у вихідний сигнал впливає велика кількість впливаючих величин. У результаті дослідження впливу кожної з них можна зробити висновок, що на процес перетворення інформативного параметра найбільше впливає ємність зворотного зв'язку C_f , тому оцінимо функцію

впливу на результат вимірювання параметрів вібрації від ємності C_f .

Знайдемо аналітичні залежності для оцінювання статичних метрологічних характеристик ВК вібрації.

Номінальний коефіцієнт перетворення (чутливість) ВК має вигляд

$$S_{X_s} = \frac{\partial N_x}{\partial X_s} = (k_n^3 \cdot K_{10} \cdot I_0 \cdot K_n \cdot B^{m-1} \cdot k^3 \cdot X_s^2) \times [2 \cdot (1 + K_{33} \cdot K_{10} \cdot k_n \cdot I_0)^4]^{-1} \times [m_s^3 \cdot ((1 + 1/K \cdot (1 + C_f/C_i)) \cdot C_f)^3]^{-1}, \quad (7)$$

а його характеристику зображено на рис. 4.

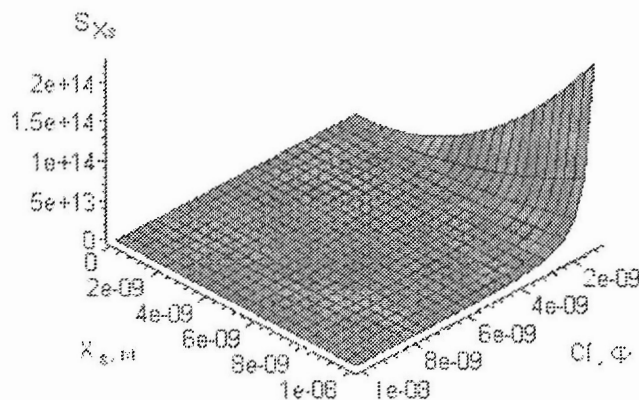


Рис. 4. Зміна чутливості в діапазоні зміни інформативного параметра

Зміна чутливості в діапазоні перетворення інформативного параметра X_s визначається першою та другою похідними від (7): $S_{X_s}' = \partial^2 N_x / (2 \partial X_s^2)$, $S_{X_s}'' = \partial^3 N_x / (6 \partial X_s^3)$, а їх графічні представлення подано на рис. 5 та 6. Коефіцієнти впливу впливаючої величини C_f на вихідний параметр вимірювального перетворення N_x визначаються за формулами: $\beta_{OCf} = \partial N_x / \partial C_f$ та $\beta'_{OCf} = \partial^2 N_x / (2 \partial C_f^2)$, а їх характеристики подано на рис. 7 та 8. Коефіцієнт сумісного впливу інформативного параметру X_s та впливаючої величини C_f на номінальну чутливість S_{X_s} визначимо так: $\alpha_{OCf} = \partial^2 N_x / (\partial X_s \partial C_f)$ (рис. 9). Номінальну функцію перетворення вимірювального перетворення визначимо за формулою

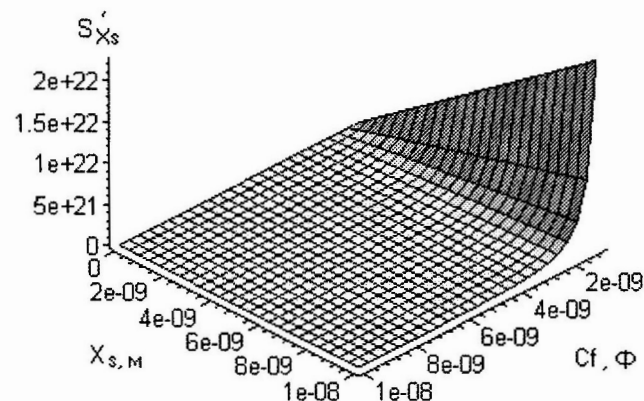


Рис. 5. Швидкість зміни чутливості в діапазоні перетворення

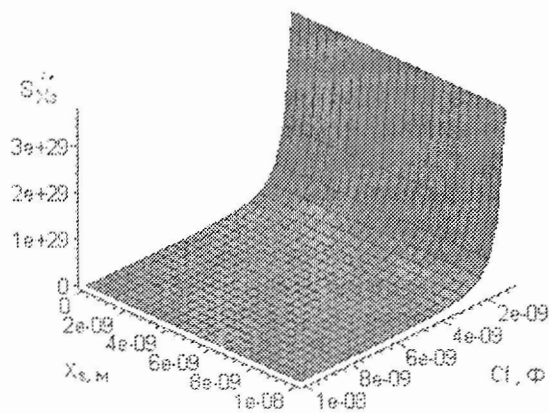


Рис. 6. Прискорення зміни чутливості в діапазоні перетворення

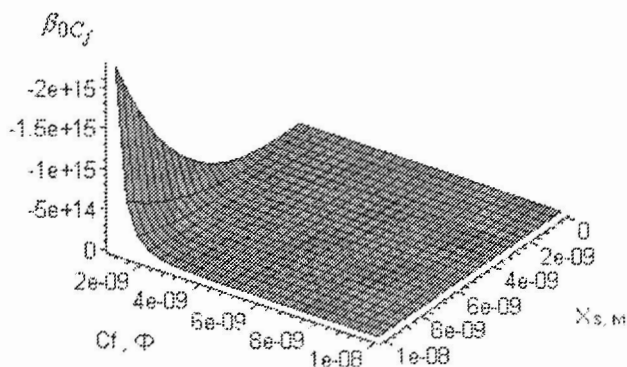


Рис. 7. Коефіцієнт впливу впливаючої величини

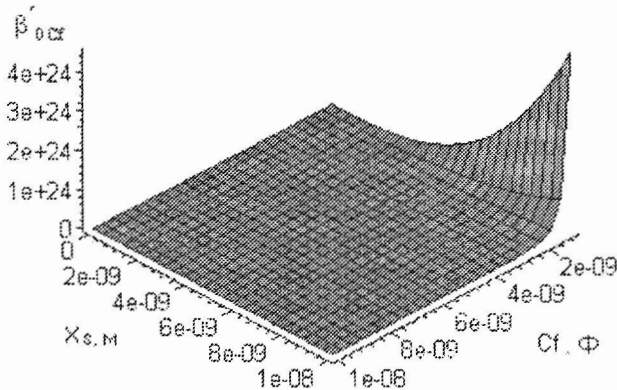


Рис. 8. Швидкість зміни коефіцієнта впливаючої величини за вихідним параметром вимірювального перетворення

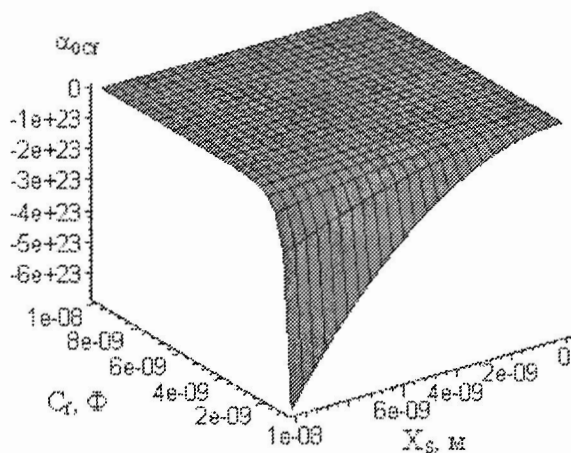


Рис. 9. Коефіцієнт сумісного впливу механічних переміщень і впливаючої величини на номінальну чутливість

$$N_n = S_{X_s} \cdot X_s + S'_{X_s} \cdot X_s^2 + S''_{X_s} \cdot X_s^3. \quad (8)$$

Абсолютна похибка ΔN_n нелінійності номінальної функції перетворення (6) дорівнює

$$\Delta N_n = S'_{X_s} \cdot (X_s - X_{sn})^2 + S''_{X_s} \cdot (X_s - X_{sn})^3, \quad (9)$$

де X_{sn} – номінальне значення механічних переміщень.

Відносну похибку δ_n нелінійності номінальної функції перетворення визначимо як

$$\delta_n = \Delta N_n / [S_{X_s} \cdot (X_s - X_{sn})]. \quad (10)$$

Абсолютну мультиплікативну похибку перетворення ΔN_m в умовах зміни ємності зворотного зв'язку C_f на величину $\Delta C_f = C_f - C_{fn}$ визначимо з рівняння

$$\begin{aligned} \Delta N_m = & (3k_n^3 K_{10} I_0 K_n B^{m-1} k^3 X_s^3 \times \\ & \times (C_f C_f^4 [1 + (1 + C_f / C_f) / K]^3 - \\ & - K C_f^5 [1 + (1 + C_f / C_f) / K]^4) (C_f - C_{fn})) \times \\ & \times (2(1 + K_{33} K_{10} k_n I_0)^4 m_s^3)^{-1} \times \\ & \times (K C_f^9 (1 + (1 + C_f / C_f) / K)^7)^{-1}. \end{aligned} \quad (11)$$

Абсолютна адитивна похибка перетворення ΔN_a в умовах зміни ємності зворотного зв'язку C_f на величину ΔC_f дорівнює

$$\Delta N_a = \beta_{OC_f} \cdot (C_f - C_{fn}) + \beta'_{OC_f} \cdot (C_f - C_{fn})^2. \quad (12)$$

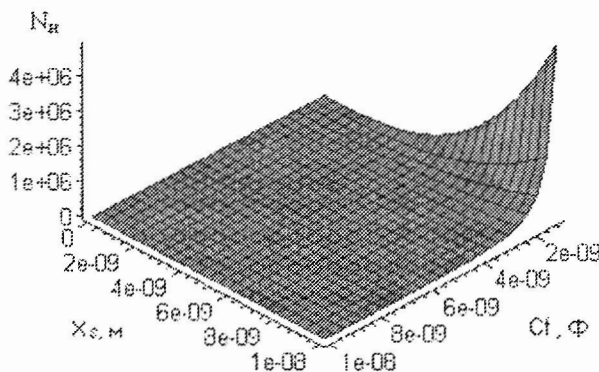


Рис. 10. Номінальна функція перетворення вимірювального каналу вібрації

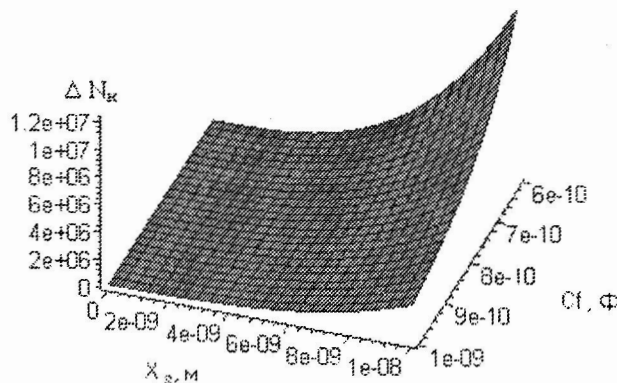


Рис. 11. Абсолютна похибка нелінійності номінальної функції перетворення

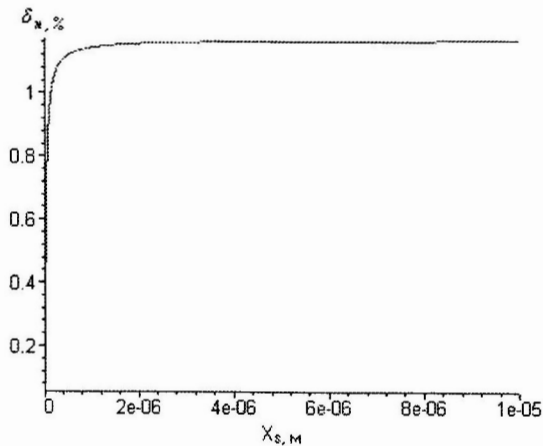


Рис. 12. Відносна похибка нелінійності номінальної функції перетворення

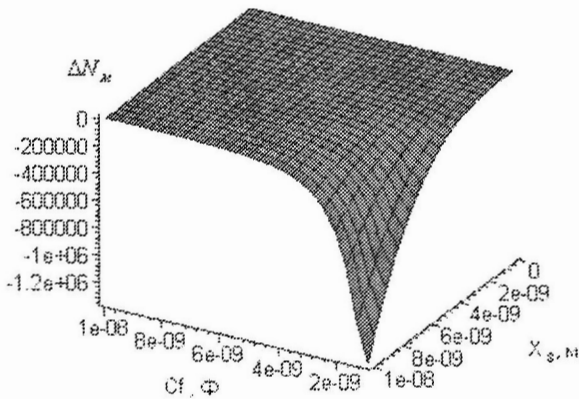


Рис. 13. Абсолютна мультиплікативна похибка перетворення

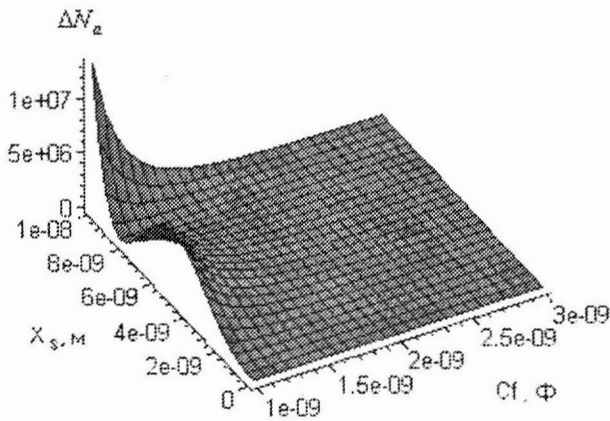


Рис. 14. Абсолютна адитивна похибка перетворення

Результати математичного моделювання аналітичних залежностей (7)–(12) основних статичних метрологічних характеристик ВК вібрації ЕМС наведено на рис. 4–14.

Аналіз результатів оцінки статичних метрологічних характеристик ВК вібрації показує, що

відносна похибка нелінійності, адитивна і мультиплікативна складові похибок зменшуються при зменшенні механічних переміщень. У статичному режимі роботи відносна похибка нелінійності не перевищує 1,2 %. Моделювання похибки нелінійності, адитивної та мультиплікативної похибок дає змогу синтезувати мікропроцесорні засоби вимірювання з нормованими метрологічними характеристиками.

Висновки

1. Вперше оцінено основні статичні метрологічні характеристики опосередкованих вимірювань вібрації, що дозволило узагальнити методику отримання аналітичних залежностей ВК вібрації. Наведено еквівалентну електричну схему ВК вібрації. Вперше отримано рівняння перетворення та оцінено функції впливу кутової швидкості на результати вимірювання.

2. Отримано аналітичні залежності для номінальної функції перетворення, чутливості, похибки нелінійності, відносної, мультиплікативної та адитивної похибок засобу вимірювання вібрації ЕМС. Показано, що статична характеристика вимірювального перетворення є нелінійною. За допомогою програмного середовища Maple V 7.0 здійснено математичне моделювання відносної похибки нелінійності, адитивної та мультиплікативної похибок, що дозволяє синтезувати мікропроцесорні засоби вимірювань вібро сигналів із нормованими метрологічними характеристиками.

Список літератури

1. Володарський Є.Т., Кухарчук В.В., Поджаренко В.О., Сердюк Г.Б. Метрологічне забезпечення вимірювань і контролю. -Вінниця: Велес, 2001. -219 с.
2. Кухарчук В.В., Кучерук В.Ю., Поджаренко В.О. Оцінка статичних метрологічних характеристик опосередкованих вимірювань //Автоматика, вимірювання та керування: Вісник державного університету "Львівська політехніка", 2001. -№ 420. -С. 37–45.
3. Серрджидж М., Лихт Т. Справочник по пьезоэлектрическим акселерометрам и преусилителям. -Глоуструп, Дания: Ларсен и сын, 1987. -186 с.
4. Воронцов А.Г. Элементы теории высокочастотной вибродиагностики роторных машин. -Донецк: РИА ДонНТУ, 2002. -137 с.
5. Орнатский П.П. Теоретические основы информационно-измерительной техники. -Киев: Вища школа. Головное изд-во, 1983. -455 с.