

М. Г. Черняк, Ю. О. Литвинова, М. Ф. Жовнір

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ГАЗОВОГО ДЕМПФУВАННЯ КОЛИВАНЬ ЧУТЛИВИХ ЕЛЕМЕНТІВ МАЯТНИКОВИХ КОМПЕНСАЦІЙНИХ АКСЕЛЕРОМЕТРІВ З ЄМНІСНИМ ДАТЧИКОМ КУТА

Вступ

Маятникові компенсаційні акселерометри (МКА) з монокристалічним планарним чутливим елементом (ЧЕ), ємнісним датчиком кута (ДК) і магнітоелектричним зворотним компенсаційним перетворювачем (ЗКП) широко застосовуються як базові датчики первинної вимірювальної інформації в сучасних інерціальних системах навігації і управління рухомими об'єктами [1]. Відомо, що динамічні характеристики (смуга пропускання та відносний коефіцієнт демпфування) застосовуваних МКА в значній мірі визначають швидкодію і динамічні похибки цих систем [1, 2].

В МКА, що розглядаються, газове демпфування є основним типом демпфування власних коливань їх ЧЕ, як об'єктів керування слідкуючих систем акселерометрів [2]. Зазвичай, при моделюванні динаміки таких МКА коефіцієнти кутового і лінійного газового демпфування, що входять в лінеаризовані рівняння руху їх ЧЕ [2], визначаються експериментально [2], або розраховуються чисельно, наприклад, методом електромеханічних аналогій [3], для конкретної конфігурації планарного ЧЕ. Такий підхід не дозволяє при великій (до десяти) кількості конструктивних параметрів проектування вузлів ЧЕ досліджувати їх вплив на значення шуканих коефіцієнтів і розробити рекомендації щодо їх вибору.

Постановка задачі

Особливістю конструкцій планарних ЧЕ МКА з ємнісним датчиком кута, що розглядаються, є наявність великих поверхонь пластини ЧЕ і малих зазорів між рухомою і нерухомою частинами в вузлах ЧЕ. Саме тому газодинамічне демпфування є основним типом демпфувань коливань цих ЧЕ [2].

Метою статті є отримання в аналітичному вигляді математичної моделі такого типу демпфувань власних коливань ЧЕ. У подальшому під математичною моделлю газового демпфування власних коливань ЧЕ будемо розуміти аналітичні вирази для розрахунку коефіцієнтів лінійного (ЛД) та кутового (КД) демпфування цих коливань.

Шукані коефіцієнти ЛД b_l та КД b_k є коефіцієнтами зв'язку між відносними лінійною \dot{x}_3 (вздовж вимірювальної вісі ЧЕ) та кутовою $\dot{\alpha}$ (навколо вихідної вісі ЧЕ) швидкостями рухомої частини ЧЕ та силою F_D і моментом сили M_D демпфування, які входять в рівняння руху ЧЕ [2] і мають наступний вигляд

$$F_D \approx -b_l \dot{x}_3, \quad M_D \approx -b_k \dot{\alpha}. \quad (1)$$

Вузли ЧЕ сучасних МКА як об'єкти дослідження

Під вузлом ЧЕ МКА будемо розуміти ЧЕ, зафіксований між двома плоскими корпусними деталями, з можливістю лінійного x_3 та кутового α переміщення в малому зазорі, наповненому газовим середовищем.

На рис. 1 представлено дві базові конструкції ЧЕ сучасних МКА, які умовно позначимо «тип А1» (рис. 1, а) та «тип А2» (рис. 1, б). До конструкції типу А1 відносяться ЧЕ акселерометрів АК-6 (НВО «Авіаприбор», Росія), QA-2000 («Hanewvell», США). За конструктивною схемою А2 побудовані ЧЕ акселерометрів серії А (ВАТ РПКБ, Росія).

На рис. 2 зображено рух ЧЕ МКА у складі вузла ЧЕ по двох узагальнених відносних координатах α і x_3 , по яким складені рівняння руху ЧЕ [2], в системі координат $Ox_1x_2x_3$, зв'язаної з корпусом акселерометра. Вісь x_3 є вимірювальною віссю акселерометра, по якій направлено вимірюване прискорення W .

В подальшому, для отримання окремо розрахункових виразів для коефіцієнтів ЛД та КД введемо наступні системи координат: систему $Ox'_1x'_2x'_3$, що використовуватиметься при русі ЧЕ по відносній лінійній координаті x_3 та систему $O\tilde{x}_1\tilde{x}_2\tilde{x}_3$ – при русі по відносній кутовій координаті α .

Рух рухомої частини ЧЕ відбувається в малому зазорі z_0 вузла ЧЕ в обмеженій області, яку умовно будемо називати демпфуючою камерою вузла ЧЕ.

При такому русі рухомої частини ЧЕ в його демпфуючій камері, заповненій газовим середовищем, воно чинить цьому руху опір. Величини сили та моменту цього опору є демпфуючими силою та моментом (1). Даний опір виникає за рахунок утворення сил в'язкого тертя при русі пластини з певною швидкістю у середині в'язкого газу, і величина його пропорційна швидкості руху пластини. Конфігурація поверхонь рухомих частин вузла ЧЕ, які приймають участь у створенні сили та моменту демпфування, для типів ЧЕ МКА, що розглядаються, показана на рис. 3.

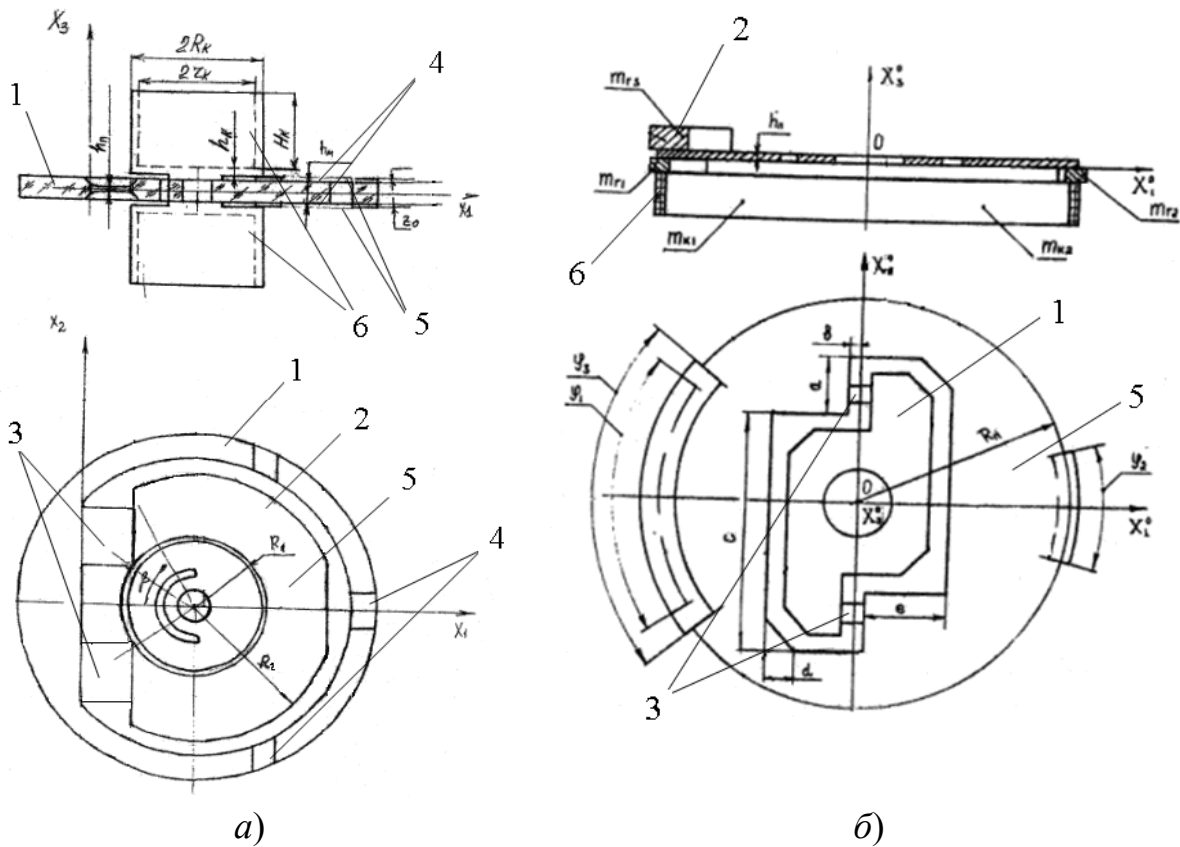


Рис. 1. Конструкції ЧЕ МКА типу А1 (а) і ЧЕ МКА типу А2 (б):

- 1 – нерухома основа ЧЕ; 2 – рухома частина ЧЕ–інерційна маса ЧЕ;
- 3 – двобалочний пружний підвіс ІМ в нерухомому кілці-основі;
- 4 – платики, що формують початковий зазор в демпфуючій камері;
- 5 – плоскі рухливі поверхні ІМ, що беруть участь у формуванні сили і моменту демпфування; 6 – котушка магнітоелектричного ЗКП

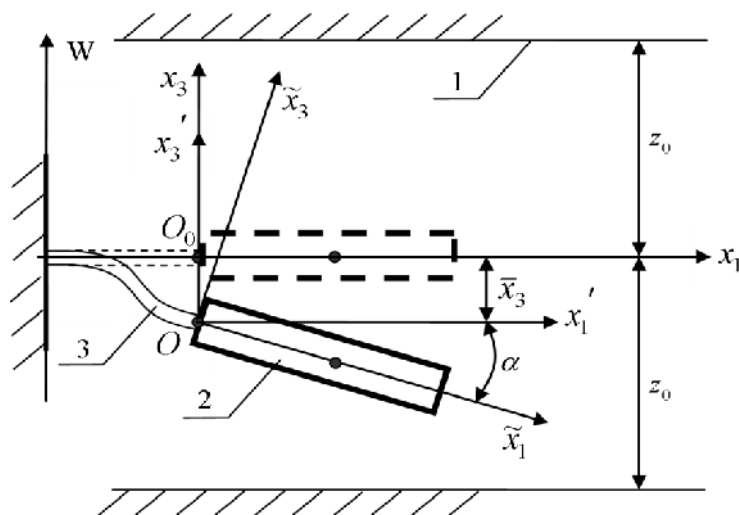


Рис. 2. Рух чутливого елемента МКА:

- 1 – нерухома частина приладу; 2 – рухома частина ЧЕ; 3 – пружний підвіс балочного типу

У гідродинаміці стан такої газодинамічної системи описується рівняннями Нав'є-Стокса та рівнянням нерозривності без врахування масових сил (маса газу, що знаходиться в зазорі, мала) та динамічних (процес виділення розглядається як квазістатичний) і вихрових складових [4]. Та аналітичне розв'язування цих рівнянь неможливе. Тому для аналітичного вирішення поставленої задачі використаємо додаткові припущення і граничні умови. Будемо вважати, що: при перетіканні в'язкого газу у вузькому зазорі сили тертя переважають над силами інерції; рух газу – сталий; тиски в напрямках, перпендикулярних до пластини – постійні; відносна швидкість руху газу на твердих границях стінок демпфуючої камери та поверхнях рухомої частини ЧЕ дорівнює нулю в силу молекулярного прилипання; переміщення рухомої частини α і x_3 – малі.

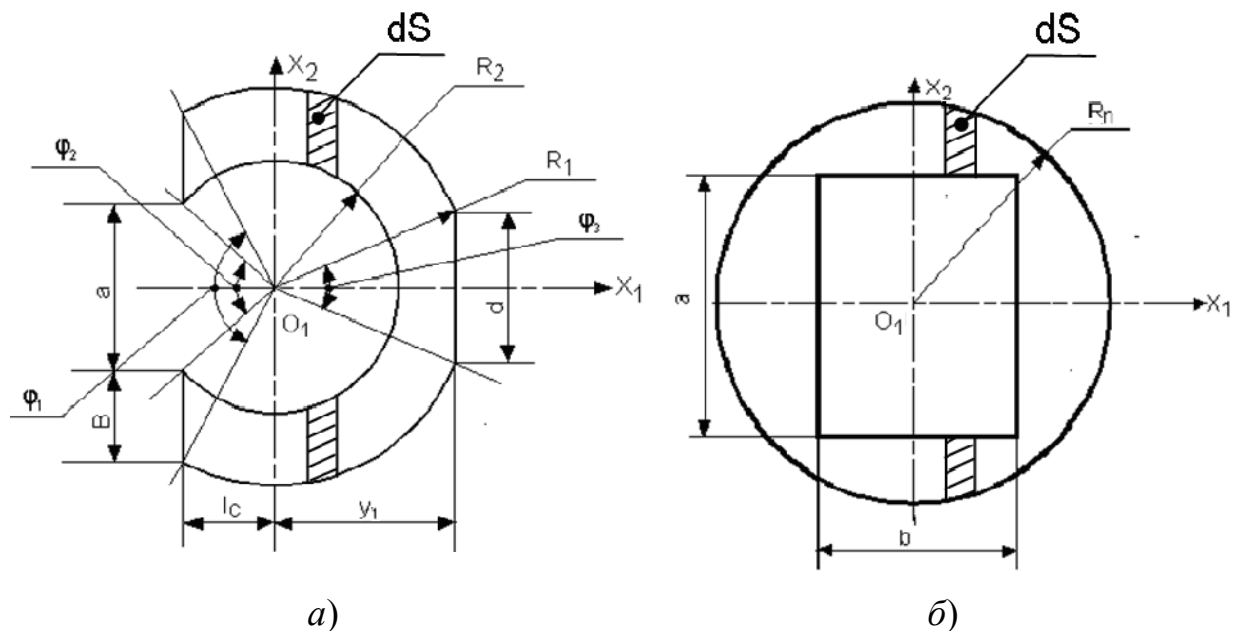


Рис. 3. Конфігурації поверхонь, що приймають участь у створенні сили та моменту демпфування для рухомих частин вузлів ЧЕ МКА типу А1 (а) і акселерометра типу А2 (б)

В такому випадку рівняння Нав'є-Стокса і рівняння нерозривності, що описують рух газу в демпфуючій камері мають наступний спрощений вигляд:

$$\frac{\partial P}{\partial r} = \mu \frac{\partial^2 V_r}{\partial x_3^2}, \quad \frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{\partial V_{x_3}}{\partial r} = 0. \quad (2)$$

Модель демпфування лінійних коливань ЧЕ

Загальний вигляд руху газу в демпфуючій камері при лінійному переміщенні ЧЕ МКА з постійною швидкістю \dot{x}_3 у напрямі осі x_3

показано на рис. 4. При такому русі ЧЕ у газі утворюється область тиску та розрідження, позначені на рис. 4 відповідними символами "⊕" і "⊖"

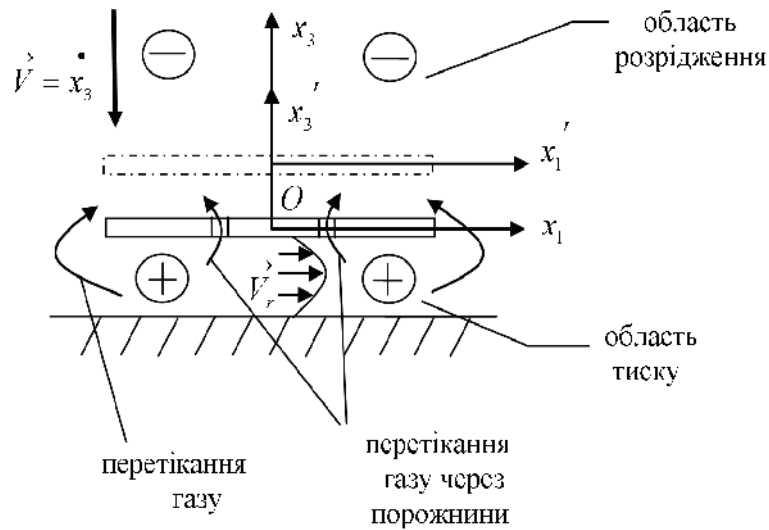


Рис. 4. Рух газу в демпфуючій камері при лінійному переміщенні рухомої частини ЧЕ МКА

Використовуючи рівняння (2), отримаємо аналітичні вирази для розрахунку коефіцієнта ЛД $b_{л}$ для МКА типу А1 і типу А2 з урахуванням конструктивних параметрів вузлів ЧЕ та параметрів газового середовища.

Спочатку визначимо середню радіальну швидкість витіснення газу із зазору, використовуючи умову збереження секундних витрат, яка має вигляд:

– для пластини типу А1:

$$V_{x_3} (S_1 - S_2) = V_r (z_0 - x_3) [L_1 + L_2], \quad (3)$$

де, згідно рис. 3, а, $S_1 = R_1^2 (\pi - \phi_1 - \phi_3)$, $S_2 = R_2^2 (\pi - \phi_2)$,

$$L_1 = 2\pi R_1 - R_1 \phi_1 - R_1 \phi_3 + 2B + C, \quad L_2 = 2\pi R_2 - R_2 \phi_2;$$

– для пластини типу А2:

$$V_{x_3} (S_1 - S_2) = V_r (z_0 - x_3) [L_1 + L_2], \quad (4)$$

де, згідно рис. 3, б, $S_1 = 2\pi R_n$, $S_2 = ab$, $L_1 = 2\pi R_n$, $L_2 = 2a + 2b$.

У виразах (3) і (4) введені такі позначення:

V_{x_3} – лінійна швидкість руху пластини ЧЕ; V_r – радіальна швидкість руху газу в зазорі.

Знайдемо вирази для середньої радіальної швидкості руху газу в зазорі

$$V_r = \frac{\dot{x}_3 A}{(z_0 - x_3)}, \quad (5)$$

де $\dot{x}_3 = V_{x_3}$; $A = \frac{(S_1 - S_2)}{[2\pi R_1 - R_1 \phi_1 - R_1 \phi_3 + 2B + d + 2\pi R_2 - R_2 \phi_2]}$ – для вузла ЧЕ типу А1; $A = \frac{(S_1 - S_2)}{[2\pi R_n + 2a + 2b]}$ – для вузла ЧЕ типу А2.

Знайдемо тиск на кожну з двох поверхонь пластини ЧЕ, для визначення сили опору (сили демпфування) F_D рухомому вузлу газовим середовищем, використовуючи рівняння (2):

– для пластини типу А1

$$P = \mu \int_0^r \frac{\partial^2 V_r}{\partial x_3^2} dr = 2\mu \frac{\dot{x}_3 A}{(z_0 - x_3)^3} r \approx 2\mu \frac{\dot{x}_3 A}{z_0^3} r; \quad (6)$$

– для пластини типу А2:

$$P = \mu \int_0^r \frac{\partial^2 V_r}{\partial x_3^2} dr = 2\mu \frac{\dot{x}_3 A}{(z_0 - x_3)^3} r \approx 2\mu \frac{\dot{x}_3 A}{z_0^3} \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + \left(\frac{b}{2}\right)^2}. \quad (7)$$

Знаючи тиск (6), (7) на дві поверхні рухомої пластини визначимо силу демпфування виразом $F_D = 2 \int_{(S)} P dS$, після інтегрування якого, з

урахуванням позначень рис. 3, отримуємо формули для її розрахунку:

– для вузла ЧЕ типу А1:

$$F = 4\mu \frac{\dot{x}_3 A}{3z_0^3} R_1^3 (2\pi - \phi_3 - \phi_1) - 4\mu \frac{\dot{x}_3 A}{3z_0^3} R_2^3 (2\pi - \phi_2); \quad (8)$$

– для вузла ЧЕ типу А2:

$$F = \frac{8}{3} \mu \frac{\dot{x}_3 A}{z_0^3} \pi R_n^3 - \mu \frac{\dot{x}_3 A}{6z_0^3} \left[a^3 \ln \left| \frac{b + \sqrt{a^2 + b^2}}{-b + \sqrt{a^2 + b^2}} \right| + b^3 \ln \left| \frac{a + \sqrt{a^2 + b^2}}{-a + \sqrt{a^2 + b^2}} \right| + 4ab\sqrt{a^2 + b^2} \right]. \quad (9)$$

На підставі (1) з (8) та (9) отримаємо знайдемо аналітичні вирази для розрахунку коефіцієнтів лінійного демпфування власних коливань ЧЕ з урахуванням конструктивних параметрів та параметрів газового середовища:

– для вузла ЧЕ типу А1

$$b_{\perp} = 4\mu \frac{A}{3z_0^3} \left[R_1^3 (2\pi - \phi_3 - \phi_1) - R_2^3 (2\pi - \phi_2) \right]; \quad (10)$$

– для вузла ЧЕ типу А2:

$$b_{\perp} = \frac{8}{3} \mu \frac{A}{z_0^3} \pi R_n^3 - \mu \frac{A}{6z_0^3} \left[a^3 \ln \left| \frac{b + \sqrt{a^2 + b^2}}{-b + \sqrt{a^2 + b^2}} \right| + b^3 \ln \left| \frac{a + \sqrt{a^2 + b^2}}{-a + \sqrt{a^2 + b^2}} \right| + \right. \\ \left. + 4ab\sqrt{a^2 + b^2} \right] \quad (11)$$

Модель демпфування кутових коливань ЧЕ

Загальний вигляд руху газу в демпфуючій камері при кутовому переміщенні рухомої частини ЧЕ по узагальненій координаті α показано на рис. 5.

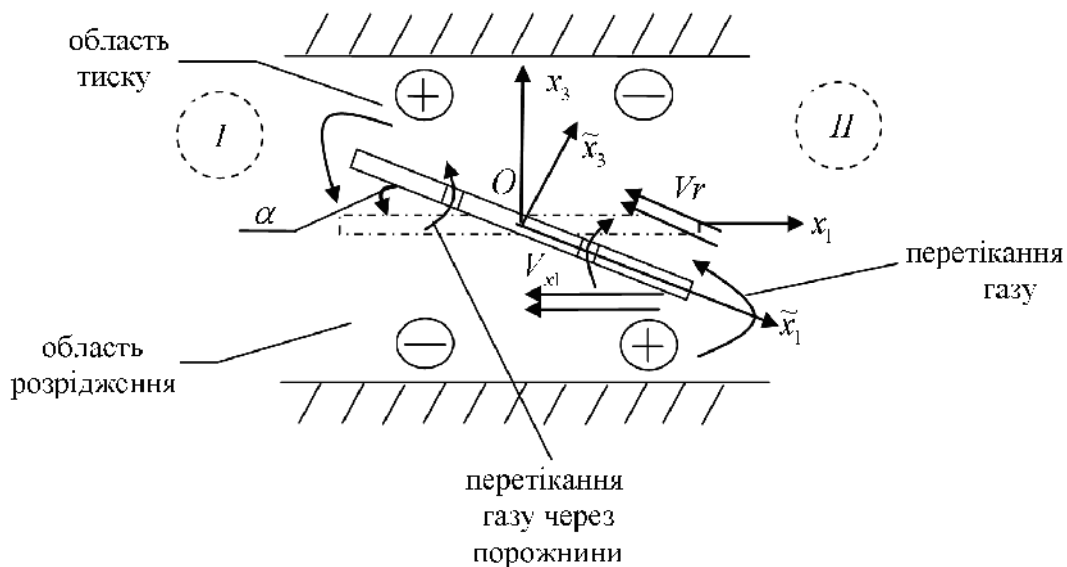


Рис. 5. Рух газу в демпфуючій камері при кутовому переміщенні рухомої частини ЧЕ МКА

Згідно рис. 3, а конфігурація рухомої пластини типу А1 є несиметричною відносно осі x_3 . Виходячи з цього, таку пластину ЧЕ умовно поділимо на дві частини I та II (позначені на рис. 5), для кожної з яких окремо знайдемо коефіцієнт кутового демпфування.

Порядок отримання формул для розрахунку коефіцієнту КД b_{κ} такий же як і для коефіцієнту ЛД b_{\perp} , тому, пропускаючи великі математичні перетворення, наведемо тільки основні проміжні результати.

Радіальна швидкість руху газу в зазорі:

– для частини I пластини ЧЕ типу А1:

$$V_r = \frac{A_1 \dot{\alpha}}{B_1 - C_1 \alpha}, \quad \text{де } A_1 = 0.5y(S_1 - S_2),$$

$$B_1 = R_1(\pi - \phi_3)z_0 + \pi R_2(z_0) + d(z_0) + 2z_0(R_1 - R_2),$$

$$C_1 = R_1(\pi - \phi_3)0.5y_1 + 0.5\pi R_2^2 + 0.5dy_1;$$

– для частини II пластини ЧЕ типу А1:

$$V_r = \frac{A_2 \dot{\alpha}}{B_2 + C_2 \alpha},$$

де $A_2 = 0.5l_c(S_1 - S_2)$, $B_2 = R_1(\pi - \phi_1)z_0 + R_2(\pi - \phi_2)z_0 + 2Bz_0$,

$$C_2 = 0.5R_1(\pi - \phi_1)l_c + 0.5R_2(\pi - \phi_2)l_c + Bl_c;$$

– для пластини ЧЕ типу А2:

$$V_r = \frac{A_1 \dot{\alpha}}{B_1 - C_1 \alpha}, \quad \text{де } A_1 = 0.5R_n(S_1 - S_2),$$

$$B_1 = (\pi R_n z_0 + 2(R_n - 0.5a)z_0 + bz_0 + 2az_0), \quad C_1 = 0.5\pi R_n^2 + \frac{b^2}{4} + \frac{ab}{2}.$$

Тиск газу на пластину при її кутовому русі описується наступними виразами:

– для частини I пластини ЧЕ типу А1:

$$P = \mu \int_0^r \frac{\partial^2 V_r}{\partial x_3^2} dr = -\mu \left[2 \frac{A_1 \dot{\alpha} C_1^2}{(B_1 - C_1 \alpha)^3} - \frac{1}{\alpha} \frac{A_1 \dot{\alpha} C_1}{(B_1 - C_1 \alpha)^2} \right] \frac{1}{r};$$

– для частини II пластини ЧЕ типу А1:

$$P = \mu \int_0^r \frac{\partial^2 V_r}{\partial x_3^2} dr = -\mu \left[2 \frac{A_2 \dot{\alpha} C_2^2}{(B_2 + C_2 \alpha)^3} - \frac{1}{\alpha} \frac{A_2 \dot{\alpha} C_2}{(B_2 + C_2 \alpha)^2} \right] \frac{1}{r};$$

– для пластини ЧЕ типу А2:

$$P = \mu \int_0^r \frac{\partial^2 V_r}{\partial x_3^2} dr = -\mu \left[2 \frac{A_1 \dot{\alpha} C_1^2}{(B_1 - C_1 \alpha)^3} - \frac{1}{\alpha} \frac{A_1 \dot{\alpha} C_1}{(B_1 - C_1 \alpha)^2} \right] \frac{1}{r}.$$

Відповідно сила та момент демпфування, які визначаються за виразами $F_D = 2 \int_{(S)} PdS$ та $M_D = F_D R$ для відповідних типів вузлів ЧЕ

МКА, набудуть вигляду:

– для вузла ЧЕ МКА типу А1:

$$F_D = F_{D1} + F_{D2}, \quad (12)$$

де $F_{D1} = -2\mu \left[2 \frac{A_1 \dot{\alpha} C_1^2}{(B_1 - C_1 \alpha)^3} - \frac{1}{\alpha} \frac{A_1 \dot{\alpha} C_1}{(B_1 - C_1 \alpha)^2} \right] [(\pi - \phi_3)R_1 - \pi R_2]$ – для частини I вузла ЧЕ типу А1,

$F_{D2} = -2\mu \left[2 \frac{A_2 \dot{\alpha} C_2^2}{(B_2 + C_2 \alpha)^3} - \frac{1}{\alpha} \frac{A_2 \dot{\alpha} C_2}{(B_2 + C_2 \alpha)^2} \right] [(\pi - \phi_1)R_1 - (\pi - \phi_2)R_2]$ – для частини II вузла ЧЕ типу А1,

$$M_D = F_{D1} y_1 + F_{D2} l_c; \quad (13)$$

– для ЧЕ МКА типу А2:

$$F_D = -2\mu \left[2 \frac{A_1 \dot{\alpha} C_1^2}{(B_1 - C_1 \alpha)^3} - \frac{1}{\alpha} \frac{A_1 \dot{\alpha} C_1}{(B_1 - C_1 \alpha)^2} \right] \left(\pi R_n - \frac{a}{4} \ln \left| \frac{b + \sqrt{a^2 + b^2}}{-b + \sqrt{a^2 + b^2}} \right| + \frac{b}{4} \ln \left| \frac{a + \sqrt{a^2 + b^2}}{-a + \sqrt{a^2 + b^2}} \right| \right),$$

$$M_D = F_D R_n. \quad (14)$$

З формул (1), (13) та (14) знайдемо розрахунковий вираз для коефіцієнту b_κ :

– для вузла ЧЕ МКА типу А1:

$$b_\kappa = -2\mu y_1 \left[2 \frac{A_1 C_1^2}{(B_1 - C_1 \alpha)^3} - \frac{1}{\alpha} \frac{A_1 C_1}{(B_1 - C_1 \alpha)^2} \right] [(\pi - \phi_3)R_1 - \pi R_2] - 2\mu l_c \left[2 \frac{A_2 C_2^2}{(B_2 + C_2 \alpha)^3} - \frac{1}{\alpha} \frac{A_2 C_2}{(B_2 + C_2 \alpha)^2} \right] [(\pi - \phi_1)R_1 - (\pi - \phi_2)R_2], \quad (15)$$

де, виходячи з рис. 2 та рис. 3,а, $\alpha = \frac{z \pm z_0}{l_c}$;

– для вузла ЧЕ МКА типу А2:

$$b_\kappa = -4R_n \mu \left[2 \frac{A_1 \dot{\alpha} C_1^2}{(B_1 - C_1 \alpha)^3} - \frac{1}{\alpha} \frac{A_1 \dot{\alpha} C_1}{(B_1 - C_1 \alpha)^2} \right] \left(\pi R_n + \frac{a}{4} \ln \left| \frac{b + \sqrt{a^2 + b^2}}{-b + \sqrt{a^2 + b^2}} \right| + \right.$$

$$+\frac{b}{4} \ln \left| \frac{a + \sqrt{a^2 + b^2}}{-a + \sqrt{a^2 + b^2}} \right| \quad (16)$$

При цьому, виходячи з рис. 1 та рис. 3, б, $\alpha = \frac{z \pm z_0}{R_n}$.

Як видно з отриманих аналітичних виразів для коефіцієнтів ЛД b_l (10), (11) та КД b_k (15) і (16) конструктивним параметром, що суттєво впливає на числову величину цих коефіцієнтів є початковий зазор z_0 .

Перевірка адекватності формул для розрахунку коефіцієнтів демпфування

Перевірку адекватності отриманих розрахункових формул виконаємо шляхом порівняння відносних розрахункових значень коефіцієнтів ЛД ξ_l та КД ξ_k вузлів ЧЕ МКА типу АК-6 та ЧЕ МКА А-12 (А-15) із, відомими з літератури [2], значеннями цих коефіцієнтів, визначених експериментально.

Відповідні відносні коефіцієнти демпфування лінійних ξ_l та кутових ξ_k власних коливань ЧЕ розрахуємо за формулами

$$\xi_l = \frac{b_l}{2m\omega_x}, \quad \xi_k = \frac{b_k}{2J_2^0\omega_\alpha},$$

до яких підставимо наступні конструктивні параметри, відомі з конструкторської документації відповідних МКА:

– для вузла ЧЕ МКА АК-6: $z = 0.02\text{мм}$, $J_2^0 = 7.25 \cdot 10^{-9} \text{кг} \cdot \text{м}^2$,
 $m = 0.414 \cdot 10^{-3} \text{кг}$, $\omega_x = 285\text{Гц}$, $\omega_\alpha = 16\text{Гц}$, $l_c = 2.9\text{мм}$, $R_1 = 6.15\text{мм}$,
 $R_2 = 3.9\text{мм}$, $y_1 = 5.8\text{мм}$, $a = 2.6\text{мм}$, $B = 8.247\text{мм}$, $d = 4.09\text{мм}$,
 $\phi_3 = 0.678 \text{рад}$, $\phi_2 = 1.465 \text{рад}$, $\phi_1 = 2.16 \text{рад}$;

– для вузла ЧЕ МКА А-12: $z = 0.03\text{мм}$, $J_2^0 = 5.25 \cdot 10^{-8} \text{кг} \cdot \text{м}^2$,
 $m = 0.8 \cdot 10^{-3} \text{кг}$, $\omega_x = 1534\text{Гц}$, $\omega_\alpha = 20\text{Гц}$, $a = 10\text{мм}$, $b = 8\text{мм}$, $R_n = 10\text{мм}$.

Згідно [2] відносні коефіцієнти демпфування ξ_l та ξ_k , отримані експериментальним шляхом мають наступні значення:

– для вузла ЧЕ МКА АК-6 $\xi_{ле} = 0.44$, $\xi_{ке} = 0.51$;

– для вузла ЧЕ МКА А-12 $\xi_{ле} = 0.38$, $\xi_{ке} = 0.6$.

Розрахунок виконаємо для трьох різних видів газового середовища: повітря з коефіцієнтом динамічної в'язкості $\mu = 1.7 \cdot 10^{-8} \frac{\text{КГ}}{\text{ММ} \cdot \text{С}}$; аргону з

$$\mu_{Ar} = 2.10 \cdot 10^{-8} \frac{\text{КГ}}{\text{ММ} \cdot \text{С}}; \text{ гелію з } \mu_{He} = 1.9 \cdot 10^{-8} \frac{\text{КГ}}{\text{ММ} \cdot \text{С}}.$$

На рис. 6 показана залежність розрахункових значень відносного коефіцієнта ξ_L від величини початкового зазору, а на рис. 7 відповідна залежність відносного коефіцієнта ξ_K для відповідних акселерометрів.

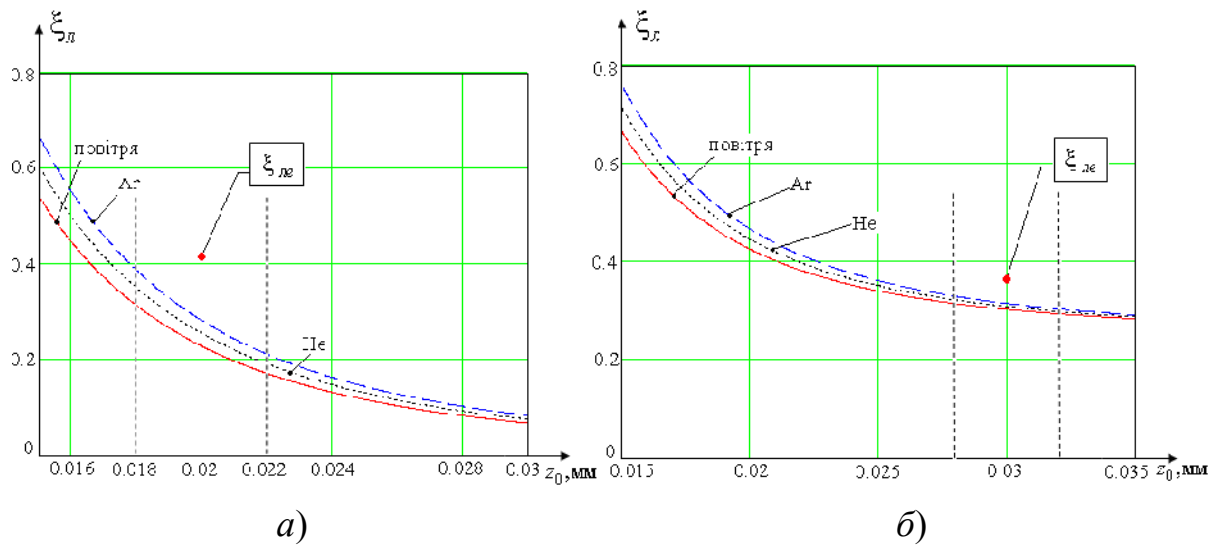


Рис. 6. Залежність розрахункових значень відносного коефіцієнта ξ_L від початкового зазору для МКА ЧЕ типу АК-6 (а) і МКА ЧЕ А-12 (б)

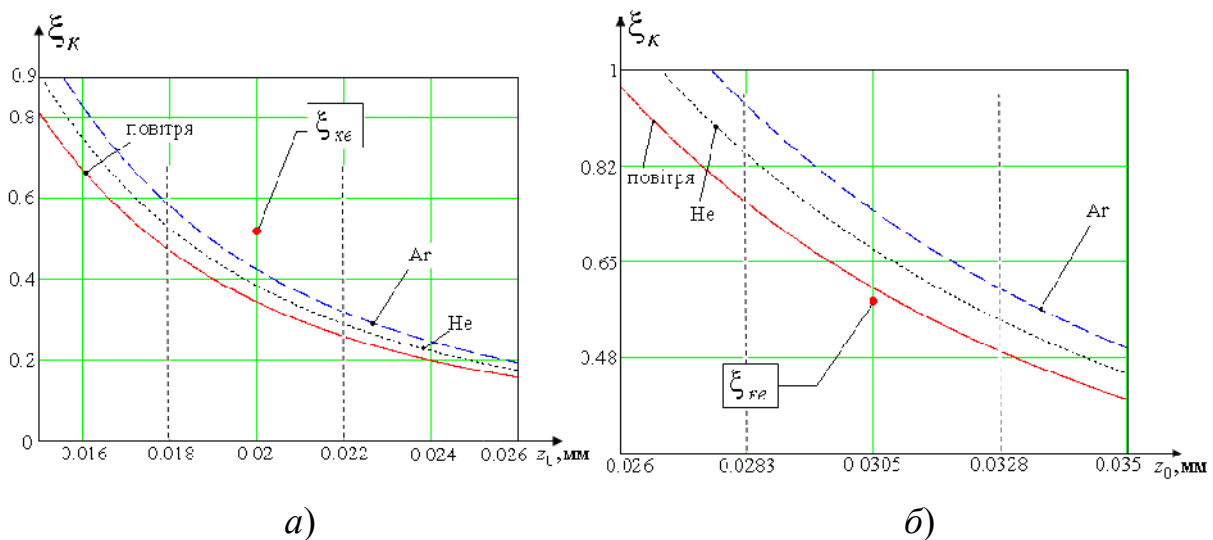


Рис. 7. Залежність розрахункових значень відносного коефіцієнта ξ_K від початкового зазору для ЧЕ МКА типу АК-6 (а) і ЧЕ МКА А-12 (б)

З рис. 6 та рис. 7 видно, що різниця між розрахунковими та експериментально визначеними значеннями відносних коефіцієнтів демпфування не перевищує 30%, що, з урахуванням великої залежності розрахункових значень від зазору, свідчить про адекватність отриманих розрахункових формул.

Слід також зазначити, що склад газового середовища не значно впливає на коефіцієнти демпфування власних коливань ЧЕ, що дозволяє не використовувати спеціальні інертні гази для заповнення демпфуючої камери.

Висновки

Отримані аналітичні розрахункові вирази для коефіцієнтів ЛД та КД коливань ЧЕ сучасних типів МКА, які дозволяють розраховувати ці коефіцієнти (пряма задача) та вибирати конструктивні параметри вузлів ЧЕ нових створюваних акселерометрів, виходячи із забезпечення необхідних динамічних характеристик їх ЧЕ (обернена задача).

Суттєва залежність коефіцієнтів демпфування від початкового зазору z_0 в вузлах ЧЕ накладає відповідні вимоги на величину допуску на висоту платиків, формуючих цей початковий зазор в демпфуючій камері. Величина цього допуску не повинна перевищувати $\Delta z = \pm 0.002 \text{ мм}$.

Список використаної літератури

1. *Lawrence A.* Modern Inertial Technology: Navigation, Guidance and Control Springer Verlag. New York. 2004. P. 280.
2. *Распопов. В. Я.* Микромеханические приборы – М.: Машиностроение. 2007.- 400с..
3. *Черняк Н. Г., Стеценко О. В.* Решение задачи газового демпфирования чувствительных элементов микрoeлектронных акселерометров // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2001. – № 6. – С. 42–46.
4. *Федяевский К. К., Войткунский Я. И., Фаддеев Ю. И.* Гидромеханика – Л.: Судостроение. 1968.– 568 с.