

УДК 531.768

М. Г. Черняк, О. М. Бондаренко, С. І. Петровський

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ

Проектування прецизійного вимірювального перетворювача тиску з пневмомеханічним резонатором

Надійшла до редакції 20.10.02

Описано методику та наведено основні розрахункові залежності для проектування первинного і вторинного перетворювальних елементів прецизійного вимірювального перетворювача тиску з пневмомеханічним резонатором для авіаційної і космічної ракетної техніки. За результатами числових розрахунків одного з варіантів конструкції приладу показані висока технологічність його виготовлення і можливості прецизійного вимірювання тиску.

Прецизійні вимірювальні перетворювачі тиску хоч і не є масовою продукцією, та саме вони визначають точність, надійність і собівартість високоточних систем повітряних сигналів і барометричних висотомірів, систем автоматичного регулювання і діагностики двигунів літальних апаратів і засобів їхньої атестації. Тому розробка такого вітчизняного приладу є актуальною.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Вимірювальні перетворювачі тиску (ВПТ) з пневмомеханічним резонатором (ПМР) мають високу чутливість до вимірюваної величини, стабільність метрологічних характеристик, доступну технологічність виготовлення. Це обумовлює їхнє широке виробництво в країнах з розвиненим приладобудуванням (США, Великобританія, Росія, Японія). Найперспективнішими [4] є ВПТ із ПМР з первинним перетворювальним елементом у вигляді розділювальної мембрани 1 із жорстким центром 2 (рис. 1). До жорсткого центра 2 прикріплено плоский газонепроникний екран 3, а до нерухомої частини приладу (корпусу 4) — плоский резонаторний елемент. Резонаторний елемент виконано у вигляді системи з зосередженими параметрами: жорсткої ефективної частини 5, закріпленої на

пружних елементах 6. Обернені одна до одної поверхні ефективної частини резонаторного елемента і газонепроникного екрану є стінками плоскої пневмокамери 7, настільки тонкої, що газ не встигає витікати з неї (чи натікати в неї) за півперіод коливань резонаторного елемента у вакуумі. В такому випадку газ у пневмокамері стискується (чи розширюється), вносячи додаток до жорсткості резонаторного елемента. Резонаторний елемент і газ у пневмокамері утворюють пневмоме-

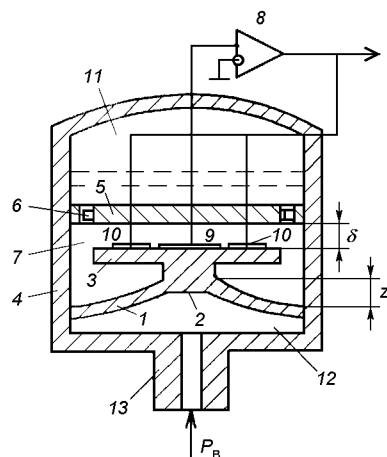


Рис. 1. Функціональна схема прецизійного вимірювального перетворювача тиску з пневмомеханічним резонатором

ханічний резонатор. Величина пружного додатку залежить від тиску P_0 газу в пневмокамері, її геометрії, форми прогину резонаторного елемента і впливає на власну частоту f коливань ПМР. Незначний вплив на власну частоту коливань ПМР дає приєднана маса резонаторного елемента. Це маса частини газу навколо резонаторного елемента, яка захоплюється ним під час коливань.

Вторинним перетворювальним елементом вимірювача є пневмомеханічна автоколивальна система, яка утворюється підключенням ПМР за допомогою системи реєстрації (електрод 9) і системи збудження (електрод 10) в контур додатного зворотного зв'язку ширококутового підсилювача δ . Вихідна частота автоколивальної системи близька до власної частоти коливань ПМР. Перебудова цієї частоти f відбувається внаслідок зміни зазору δ між ефективною частиною резонаторного елемента 5 і газонепроникного екрану 3 (рис. 1) на величину прогину жорсткого центра 2 мембрани 1. Мембрана прогинається внаслідок перепаду тиску на ній між незмінним тиском P_0 у герметичній підмембранній порожнині 11 і вимірюваним тиском P_B в надмембранній порожнині 12 ВПТ з ПМР. Підмембранна порожнина з'єднується через штуцер 13 з контрольним середовищем.

Маса газу в пневмокамері протягом півперіоду коливань резонаторного елемента залишається незмінною, якщо виконується умова роботоздатності:

$$\delta < \delta_{\text{гр}} = k^* L \sqrt{\frac{\eta \omega_0}{\gamma P_0}}, \quad (1)$$

де $\delta_{\text{гр}}$ — гранична товщина пневмокамери, k^* — числовий коефіцієнт (теоретичне значення $6^{0.5} \approx 2.45$ [4]), L — менший характерний розмір (ширина) ефективною частини резонаторного елемента, γ і η — коефіцієнти Пуассона і динамічної в'язкості газу, що заповнює пневмокамеру; ω_0 — кругова частота коливань резонаторного елемента у вакуумі.

Власна частота f коливань ПМР залежить від вимірюваного тиску P_B [4]:

$$f = \frac{f_0}{\sqrt{1 + \eta_m}} \times \left\{ 1 + \gamma P_0 / \left[2\pi f_0 \rho h \left(\delta - z_0 \frac{P_B - P_0}{P_{\text{ВМ}} - P_0} \right) \right] \right\}^{1/2}, \quad (2)$$

де $f_0 = \omega_0 / (2\pi)$, ρ і h — щільність матеріалу і товщина резонаторного елемента; η_m — коефіцієнт впливу приєднаної маси на частоту коливань ПМР, яким в інженерних розрахунках можна знехтувати [4], $P_{\text{ВМ}}$ і z_0 — верхня межа вимірювання тиску і прогин первинного перетворювального елемента

при ньому; δ_0 — зазор між газонепроникним екраном і резонаторним елементом, який слід дотримувати при складанні ВПТ [4]. Величини z_0 , δ_0 і $\delta_{\text{гр}}$ зв'язані між собою такими залежностями [4]:

$$\delta_0 = \delta_{\text{мін}} + z_0, \quad (3)$$

$$z_0 \leq (\delta_{\text{гр}} - \delta_{\text{мін}}) \frac{P_{\text{ВМ}} - P_0}{P_{\text{ВМ}}}, \quad (4)$$

де $\delta_{\text{мін}}$ — мінімальний зазор між резонаторним елементом і рухомим газонепроникним екраном, сумірний з амплітудою коливань резонаторного елемента і похибками складання ВПТ.

Згідно з виразом (1) величина допустимого зазору ПМР визначається підмембранним тиском P_0 , що не залежить від вимірюваного P_B . Верхня межа вимірювання ВПТ забезпечується необхідним прогином z_0 (див. (4)), що залежить від параметрів мембрани первинного перетворювального елемента [4].

Форма вихідної характеристики ВПТ із ПМР, побудованої згідно з виразом (2), показана на рис. 2. Вона показує однозначність залежності вихідної частоти f від вимірюваного тиску. Але поряд з такими позитивними якостями, як незалежність умови (1) роботоздатності ПМР від верхньої межі вимірювання $P_{\text{ВМ}}$, можливість вимірювання тиску не тільки газів, але і рідин, вимірювальний перетворювач тиску описаної конструкції має й істотні недоліки. Це температурна і довгострокова нестабільності підмембранного тиску, які є причиною нестабільності вихідної характеристики ВПТ. Температурна нестабільність зумовлена ізохорним термодинамічним процесом в герметичній підмембранній порожнині ВПТ. Довгострокова нестабільність пов'язана з дуже малим, але все-таки відчутним у часі натіканням газу в герметичну підмембранну порожнину крізь її стінки і з'єднання між обмежувачами її корпусними деталями.

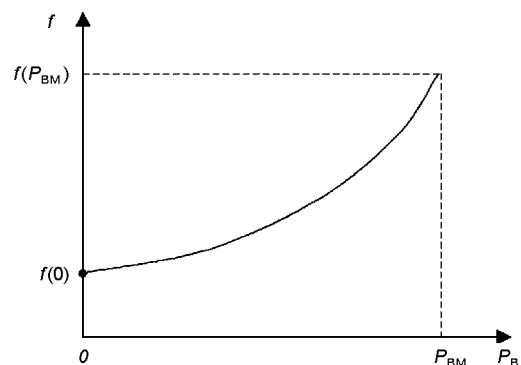


Рис. 2. Форма вихідної характеристики прецизійного вимірювального перетворювача тиску з пневмомеханічним резонатором

Ефективним способом усунення зазначених недоліків є побудова ПМР на резонаторному елементі спеціальної форми, що дозволяє по черзі чи одночасно збудовувати декілька видів коливань резонаторного елемента. Власні частоти цих коливань несуть інформацію про впливаючі фактори, які включають вимірюваний тиск P_b , тиск P_0 і зміну температури ΔT газу у підмембранній порожнині ВПТ. Ця інформація при подальшій обробці алгоритмічно чи структурно розділяється.

Цілями даної статті є:

- одержання залежностей, на основі яких можна вибрати основні параметри первинного і вторинного перетворювальних елементів ВПТ з ПМР;
- оцінка можливостей побудови ПМР із декількома власними частотами коливань резонаторного елемента спеціальної форми.

ВИХІДНІ ПОЛОЖЕННЯ

При розгляді елементів вимірювача скористаємося наступними вихідними положеннями.

1. Прогин мембрани і пружних елементів менший, ніж їхня товщина, тому їхня жорсткість не залежить від величин прогинів, напружень в матеріалі; прогини лінійно залежать від прикладених до них зовнішніх зусиль, рівномірні напруження розтягнення у серединній поверхні дуже малі.

2. Діапазон робочих температур невеликий: ± 55 °С. Температурні зміни модуля Юнга і лінійних розмірів елементів ВПТ у такому діапазоні вважаються лінійними, залежності динамічної в'язкості η і коефіцієнта Пуассона ν газу від температури не враховуються ($\nu = 1.4$, $\eta = 1.8 \cdot 10^{-5}$ кг/м²с).

3. Натікання газу в підмембранну порожнину відбувається дуже повільно (у межах 5—30 % від її обсягу за увесь час гарантійного терміну роботи ВПТ) і не позначається на його дієздатності.

ПРОЕКТУВАННЯ ПЕРВИННОГО ПЕРЕТВОРЮВАЛЬНОГО ЕЛЕМЕНТА

Параметри мембрани I первинного перетворювального елемента (рис. 1) повинні забезпечити необхідний прогин z_0 (5) і задовольнити умову міцності (6) при максимальному перепаді тиску $P_{\text{вм}} - P_0$ на ній [2]:

$$z_0 = \frac{3}{16} \frac{(1 - \nu^2) R_n^4}{E h_n^3} (1 - \xi^2)(1 - \xi)^3 (P_{\text{вм}} - P_0), \quad (5)$$

$$\sigma_{\text{max}} = \frac{3}{4} (1 - \xi^2) \left(\frac{R_n}{h_n} \right)^2 \sqrt{1 - \nu + \nu^2} (P_{\text{вм}} - P_0) < \sigma_{\text{гр}} \quad (6)$$

де E_n і ν — модуль Юнга і коефіцієнт Пуассона матеріалу мембрани, $\xi = r_n/R_n$, h_n , r_n і R_n — товщина, радіуси жорсткого центру і защемлення мембрани первинного перетворювального елемента, $\sigma_{\text{гр}} = \sigma_T/n$ — гранично допустимі напруження, σ_T і n — границя текучості і запас міцності матеріалу мембрани, σ_{max} — максимальне еквівалентне напруження в мембрані за критерієм питомої потенційної енергії формозміни [1].

Фізичними параметрами матеріалу мембрани (модулем Юнга, коефіцієнтом Пуассона, границею текучості) варіювати досить складно. Матеріал вибирається з міркувань необхідної міцності, безгістерезисності, пружності, корозійної стійкості, температурної стабільності. В Україні доступні технології обробки таких металів: сплави 36НХТЮ і 12Х18Н10Т, бронза БрБ-2.

Радіус жорсткого центру r_n вибирається малим, щоб зменшити його вплив на характеристики мембранного чутливого елемента, але реалізованим із застосуванням найменшої кількості технічних засобів, часу і зусиль фрезерувальника. Величина $r_n = 5 \dots 10$ мм задовольняє обидві вказані вище вимоги.

Залишаються два конструктивних параметри (h_n і R_n), для вибору яких достатньо виразів (5) і (6). Якщо піднести нерівність (6) до степеня 1.5 і підставити в неї відношення $(h_n/R_n)^3$ з рівності (5), одержимо область значень R_n :

$$R_n \geq 2\sqrt{3} \sqrt{\frac{1 + \xi}{(1 - \xi)^5} \frac{(1 - \nu + \nu^2)^{0.75}}{1 - \nu^2}} E \frac{z_0}{\sigma_{\text{max}}^{1.5}} \sqrt{P_{\text{вм}} - P_0}. \quad (7)$$

Обране з області (7) значення радіуса R_n підставляється до виразу (5), звідки знаходиться необхідне значення h_n :

$$h_n = \sqrt[3]{\frac{3}{16} \frac{(1 - \nu^2) R_n^4}{E_n} \frac{R_n^4}{Z_0} (1 - \xi^2)(1 - \xi)^3 (P_{\text{вм}} - P_0)}. \quad (8)$$

Вирази (7) і (8) доповнюють вирази (3) і (4), на основі яких вибираються конструктивні параметри первинного перетворювального елемента.

ПРОЕКТУВАННЯ ВТОРИННОГО ПЕРЕТВОРЮВАЛЬНОГО ЕЛЕМЕНТА

Розглянемо вторинний перетворювальний елемент з чотириохковим резонаторним елементом I , схема якого зображена на рис. 3. ПМАС збудує і підтримує наступні коливання резонаторного еле-

мента *I*: поступальне уздовж осі *OX*, перпендикулярної до середньої поверхні резонаторного елемента (рис. 4, *a*), і кутові коливання навколо осей *OY* і *OZ* резонаторного елемента, що поділяють круги навпіл (рис. 4, *b* і *в*). Круги, що лежать на різних осях симетрії, різні, а на одній осі симетрії — однакові.

Вводиться додатковий газонепроникний екран 2 (рис. 4), закріплений в нерухомій частині приладу. Система рівнянь, що описує власні частоти коливань ПМР, має вигляд

$$\begin{aligned}
 f_x^2 &= f_{0x}^2(1 + \alpha_E \Delta T) + k_{1x} \frac{\gamma P_0}{\rho h \delta_{01}} + \\
 &+ k_{2x} \frac{\gamma P_0}{\rho h \left[\delta_{02} - \frac{z_0(P_B - P_0)}{P_{BM} - P_0} \right]}, \\
 f_y^2 &= f_{0y}^2(1 + \alpha_E \Delta T) + k_{1y} \frac{\gamma P_0}{\rho h \delta_{01}} + \\
 &+ k_{2y} \frac{\gamma P_0}{\rho h \left[\delta_{02} - \frac{z_0(P_B - P_0)}{P_{BM} - P_0} \right]}, \\
 f_z^2 &= f_{0z}^2(1 + \alpha_E \Delta T) + k_{1z} \frac{\gamma P_0}{\rho h \delta_{01}} + \\
 &+ k_{2z} \frac{\gamma P_0}{\rho h \left[\delta_{02} - \frac{z_0(P_B - P_0)}{P_{BM} - P_0} \right]},
 \end{aligned} \tag{9}$$

де α_E — температурний коефіцієнт модуля пружності матеріалу резонаторного елемента; δ_{01} і δ_{02} — товщини пневмокамер під резонаторним елементом *I* з боку нерухомого 2 і рухомого 3 газонепроникного екрану; f_{0j} — власні частоти коливань резонаторного елемента у вакуумі ($j = x, y, z$); k_{ij} — числові коефіцієнти, що залежать від коефіцієнтів жорсткості і масових характеристик ПМР ($i = 1, 2$). Шуканими величинами в системі (9) є вимірюваний тиск P_B , підмембранний тиск P_0 і відхилення температури ΔT від нормального значення. Додатковий газонепроникний екран 2 вводить у рівняння системи (9) другий доданок. Спеціальним чином підібрані характерні розміри кругів резонаторного елемента L_1 і L_2 та величини зазорів δ_1 і δ_2 дозволяють створити необхідну відмінність у власних частотах f_{0j} і значеннях коефіцієнтів k_{ij} ($i = 1, 2$). Це дає лінійну незалежність системі рівнянь (9).

Розв'язок системи (9) доручається обчислювальному пристрою, на вхід якого безперервно чи з необхідною періодичністю подаються вихідні частото-

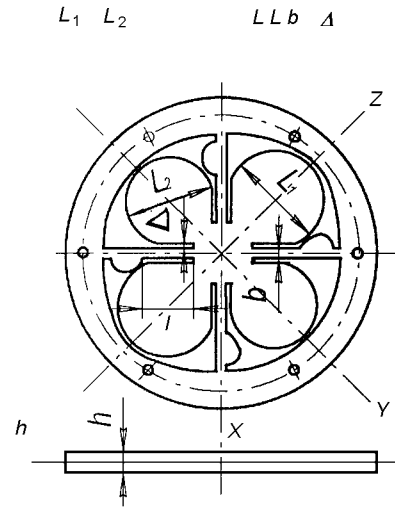


Рис. 3. Чотирьохкруговий резонаторний елемент

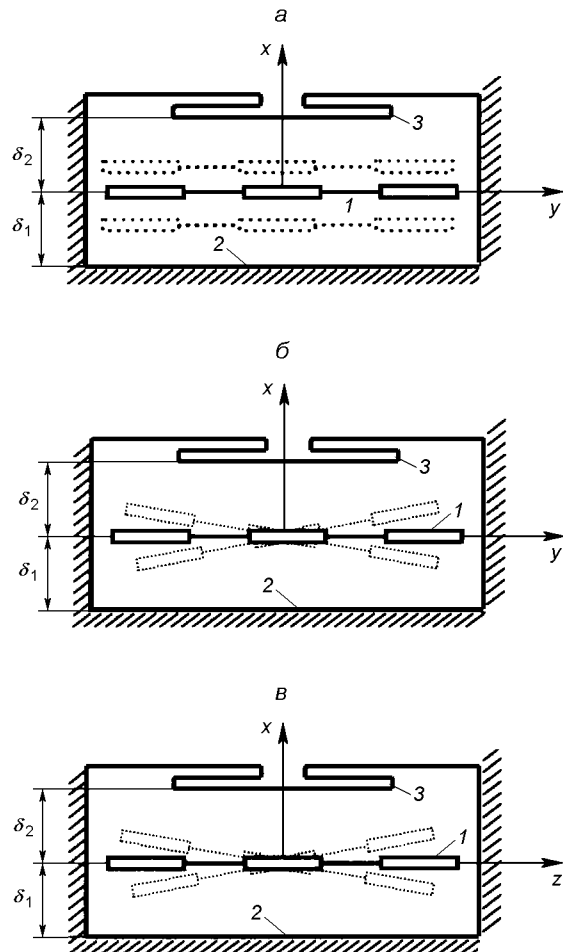


Рис. 4. Види коливань резонаторного елемента

ти ПМАС f_x , f_y і f_z , а з виходу знімаються сигнали, пропорційні до величин P_b , P_0 і ΔT .

Сформулюємо критерій підбору числових коефіцієнтів системи (9). Візьмемо попарно відношення між коефіцієнтами при однакових доданках довільних двох рівнянь і частотами f_{0j} . Одне зі відношень повинне суттєво відрізнятись від двох інших. Чим більша відмінність відношень, тим вища точність обчислення величин P_b , P_0 і ΔT за відомими f_x , f_y і f_z . Щоб правильно підібрати коефіцієнти системи (9), необхідно проводити числове моделювання конкретної конструкції вторинного перетворювального елемента.

Для розгляду конструкції вторинного перетворювального елемента, представленого на рис. 3, ввели деякі спрощення. Ефективні частини великого і меншого кругів і центральної ділянки резонаторного елемента (рис. 3) замінювалися геометричними кругами з діаметрами, рівними їхнім характерним розмірам (L_1 — більшого круга, L_2 — меншого круга, L_{11} — центра, $L_1 > L_2 > L_{11}$). З конструктивних міркувань пов'язувалися між собою розміри частин резонаторного елемента:

$$l = 0.5L_2, \quad b = 0.2l,$$

$$L_{11} = L_1 \left[\sqrt{2} \left(1 + \frac{2\Delta + b}{L_1} \right) - 1 \right],$$

$$Z_c = \frac{L_1 + 2\Delta + b}{\sqrt{2}}, \quad Y_c = \frac{L_2 + 2\Delta + b}{\sqrt{2}},$$

$$\frac{L_2}{L_1} = \lambda, \quad \lambda < 1,$$

$$k_{1j} \approx k_{2j}(1 + \Delta_j),$$

де l — довжина пружного елемента (рис. 3), b — ширина пружного елемента; Z_c і Y_c — центри мас більших і менших кіл відносно осей відповідно OY і OZ ; Δ — ширина прорізів у резонаторному елементі; λ — числовий коефіцієнт, що вводиться для зручності і наочності моделювання; Δ_j — відносні доданки від впливу приєднаної жорсткості під малими елементами резонаторного елемента, що вносять різницю в числові коефіцієнти останніх двох доданків кожного з рівнянь системи (9). Останнє означає, що вони фізично змінюють характер залежностей приєднаних жорсткостей у меншому зазорі в порівнянні з характером залежностей у більшому зазорі на якусь постійну величину. Пружні елементи лежать на взаємно ортогональних осях. Осі симетрії резонаторного елемента теж взаємно ортогональні (осі OY і OZ на рис. 3). Зазор δ_{01} між резонаторним елементом і нерухомим газо-

непроникним екраном формується більшим від допустимого зазору δ_2^{sup} доп між резонаторним елементом і рухомим газонепроникним екраном 4 (рис. 4).

Величини зазорів δ_1 і δ_2 , характерних розмірів L_1 і L_2 і підмембранного тиску P_0 підбиралися так, щоб забезпечити:

- для поступального коливання резонаторного елемента 1 (уздовж осі OX , рис. 4, а) виконання умови роботоздатності (1) в обох зазорах δ_1 і δ_2 під час довільних прогинів z мембрани первинного перетворювального елемента;
- для кутового коливання резонаторного елемента навколо осі, що ділить більші круги навпіл (вісь OZ , рис. 4, б) виконання умови роботоздатності (1) під усіма кругами в зазорі δ_2 і його невиконання під більшими кругами в зазорі δ_1 при довільних прогинах первинного перетворювального елемента.

Лише так ми зможемо задовольнити критерії підбору коефіцієнтів системи (9).

Бажано також для кутового коливання резонаторного елемента навколо осі OY (рис. 4, в), щоб виконувалась умова (1) під більшими кругами і не виконувалась під половинками менших кругів в обох зазорах. Велику роль у тім, що умова (1) під меншими кругами не виконується, відіграє те, що вісь цих коливань ділить менші круги навпіл, зменшуючи істотно (у два рази) їхній характерний розмір, який входить до формули (1).

Назвемо останні умови необхідними умовами проектування вторинного перетворювального елемента.

Розрахунок параметрів вторинного перетворювального елемента проводився в декілька етапів. Спочатку визначалися власні частоти коливань резонаторного елемента у вакуумі і по них вибирався зазор δ_2 між резонаторним елементом 1 і рухомим газонепроникним екраном 3. Далі з урахуванням збільшення частоти коливань резонаторного елемента від його взаємодії з газом у меншій пневмокамері (між резонаторним елементом 1 і рухомим газонепроникним екраном 3), обчислювався більший допустимий зазор δ_1 (між резонаторним елементом 1 і нерухомим газонепроникним екраном 2). Наприкінці перевірялося виконання умови роботоздатності під половинками кругів з врахуванням ще більшого збільшення частоти коливань ПМР від наявності жорсткості газу у пневмокамерах вже з двох сторін резонаторного елемента. Результатом останнього етапу може бути лише відповідність необхідним умовам проектування вторинного перетворювального елемента. В іншому випадку вхідні параметри проектування змінювалися, і проектування повторювалося.

РЕЗУЛЬТАТИ ЧИСЛОВОГО МОДЕЛЮВАННЯ КОНСТРУКЦІЇ ВПТ

Розрахунок декількох варіантів (числове моделювання) побудови вторинного перетворювального елемента провадився з використанням прикладного пакета MathCad. В одному з кращих варіантів обрані такі вхідні параметри проектування.

1. Параметри вторинного перетворювального елемента

- конструктивні: $L_1 = 2$ см, $\lambda = 0.8$, $\Delta = 0.2$ мм, $l = 5$ мм, $b = 2$ мм, $h = 0.3$ мм, $\delta_{\min} = 40$ мкм;
- фізичні: матеріал резонаторного елемента — бронза БрБ2, $E = 1.28 \cdot 10^{11}$ Па; $\nu = 0.28$; $\rho = 8260$ кг/м³, підмембранний тиск $P_0 = 10$ кПа.

2. Параметри первинного перетворювального елемента: $R_{\Pi} = 29$ мм, $r_{\Pi} = 5$ мм, $E_{\Pi} = 1.9 \cdot 10^{11}$ Па, $\nu = 0.29$, $\sigma_T = 1500$ МПа, $n = 3$ (сплав 36НХТЮ).

Обчислювалися наступні параметри ВПТ: частоти $f_{0x} = 507$ Гц, $f_{0y} = 298$ Гц, $f_{0z} = 420$ Гц, коефіцієнти $k_{y1} = 0.875$, $k_{z1} = 0.751$, доданки $\Delta_1 = 0.166$, $\Delta_2 = 0.029$, жорсткості резонаторного елемента кутова 1.56 Н·м і лінійна 27.6 кН/м, маса резонаторного елемента 2.7 гр, сила, необхідна для збудження коливань уздовж осі OX $F_x = 0.08$ Н, початкова амплітуда коливань 3 мкм, зазори $\delta_2 \approx 70$ мкм, $\delta_1^{\text{доп}} \approx 130$ мкм, $L_{\Pi} = 9$ мм, мінімальні частоти коливань ПМР ($P_b = 0$) $f_x^{\text{HM}} = 1.83$ кГц, $f_y^{\text{HM}} = 1.7$ кГц, $f_z^{\text{HM}} = 1.66$ кГц; максимальні девіації частоти $\Delta f_x = 390$ Гц, $\Delta f_y = \Delta f_z = 380$ Гц, $z_0 = 30$ мкм при $P_{\text{вм}} = 130$ кПа, $h_{\Pi} = 1.3$ мм, $\sigma_{\max} = 2 \cdot 10^7$ Па $< \sigma_{\text{гр}} = 6.5 \cdot 10^8$ Па.

ВИСНОВКИ

Наведені числа доводять можливість практичної реалізації прецизійного ВПТ із ПМР навіть для невеликого діапазону вимірювання (статичного тиску атмосфери). Фрезерування мембрани товщиною в 1.3 мм не буде складним, тоді як власна частота коливань жорсткої мембрани буде істотно перевищувати частоти коливань ПМР. Зазори $\delta_2 = 70$ мкм і $\delta_1 = 130$ мкм при діаметрах кругів $L_2 = 2$ см і $L_1 = 1.6$ см можна реалізувати за допомогою калібровочних шайб при досить невисоких допусках на складання (порядку ± 0.01 мкм).

Оцінимо похибкові можливості ВПТ з ПМР. При вимірюванні вихідної частоти ВПТ за періодом з

похибкою $\delta_f = 0.1$ Гц, характерною для бортових вимірювачів частоти, і девіації частоти порядку 400 Гц одержуємо чутливість приладу до вимірюваного тиску на рівні 0.025 % від верхньої межі вимірювання. Одночасне вимірювання підмембранного тиску і температури резонаторного елемента навіть при отриманій різниці відносних добавок Δ_z і Δ_y у 13 % дозволяє компенсувати температурну похибку до рівня порога чутливості ВПТ і дозволяє без втрати точності приладу збільшення тиску в підмембранній порожнині на 10 % від довгострокового просочування газу в неї. Традиційні технології герметизації приладу забезпечують таке натікання не раніше декількох (до 10) років.

Для досягнення максимальної різниці між числовими значеннями доданків Δ_y і Δ_z та між частотами коливань резонаторного елемента у вакуумі питання проектування ВПТ із ПМР вимагає подальшої доробки, у тому числі із застосуванням відомих методів оптимального проектування [3].

Отримані високі характеристики точності приладу разом з невисокою їхньою собівартістю, яка досягається простотою і високою технологічністю виготовлення, надає ВПТ з ПМР перспективності подальшої розробки та конкурентоспроможності на вітчизняному і зарубіжному ринках датчикової апаратури для авіаційної і ракетно-космічної техніки.

1. Справочник по сопротивлению материалов / Писаренко Г. С., Яковлев А. П., Матвеев В. В. — Киев: Наук. думка, 1988.—472 с.
2. Тимошенко С. П., Войновский-Кригер С. Пластинки и оболочки. — М.: Физматгиз, 1963.—472 с.
3. Хог Э., Арора Я. Прикладное оптимальное проектирование. — М.: Мир, 1983.—356 с.
4. Черняк М. Г., Бондаренко О. М., Коваленко Т. В. Фізико-математичне моделювання вимірювальних перетворювачів тиску з пневмомеханічним резонатором // Космічна наука і технологія.—1999.—5, № 5/6.—С. 92—102.

THE DESIGN OF PRECISION PRESSURE SENSOR WITH PNEUMOMECHANICAL RESONATOR

M. G. Chernyack, O. M. Bondarenko, S. I. Petrovs'kyi

We describe the procedure of the design of the primary and secondary transducers of the precision pressure sensor with pneumomechanical resonator. The main calculated relations for the design is presented. The pressure sensor is characterig by a design uncomplexity and high technological efficiency. A high manufacturability and the possibilities for precision pressure measurements of the device are showed on the basis of numerical estimates.