

СИСТЕМА ВИЗНАЧЕННЯ ТОЧНОГО ПОЛОЖЕННЯ РЕГУЛЬОВАНОЇ ГІДРОСТАТИЧНОЇ СФЕРИЧНОЇ ОПОРИ

Приведена схемная и конструктивная реализация системы определения точного положения регулируемой гидростатической сферической опоры пространственного механизма. Определены статические характеристики измерителей положения опоры и влияние параметров системы на эти характеристики. Даны предложения по расширению диапазона измерения положения опоры.

Scheme and structural realization of the system of determination of exact position of the managed hydrostatic spherical support of spatial mechanism is resulted. Static descriptions of measuring devices of position of support and influence of parameters of the system are certain on these descriptions. Of suggestion on expansion of range of measuring of position of support is given.

Вступ

Технологічні машини на основі просторових механізмів одержали значний розвиток в сучасному машинобудуванні. Їх основним елементом є точні опорні вузли із двома ступенями вільності. Прогресивним видом опорних вузлів є сферичні аеростатичні або гідростатичні опори. Тому розробка і дослідження сферичних опор є актуальною.

Створення сферичних гідростатичних опор є загальною науково-технічною проблемою яка має кілька різнопланових аспектів [1]. Зокрема це забезпечення необхідної точності та несучої здатності опори, раціональних параметрів динамічних характеристик, надійності роботи опори та інші.

Розв'язок даної проблеми дозволяє вирішити важливі наукові та практичні завдання створення ефективного технологічного обладнання: промислових роботів, верстатів паралельної кінематики, вимірювальних комплексів, тощо [2].

В літературних джерелах і в інших інформаційних матеріалах наявна значна кількість даних по розробці та дослідженню сферичних опорних вузлів [1]. Як правило вони реалізовані на підшипниках кочення [2]. Окремі публікації присвячені розробці сферичних опор аеростатичного та гідростатичного типу [3, 4].

Дані розробки є основою для вдосконалення гідростатичних опор в напрямку підвищення їх точності та жорсткості.

Дана стаття присвячена вдосконаленню гідростатичної опори шляхом побудови ефективної системи вимірів точного просторового положення опори для побудови на цій основі зворотного зв'язку в системі керування опори. Метою досліджень є визначення статичних характеристик вимірювачів та встановлення впливу окремих параметрів опори на вказані характеристики та розробки пропозицій по розширенню діапазону вимірів положення опори.

Конструктивна реалізація та схемне рішення системи визначення точного положення регульованої гідростатичної сферичної опори

Гідростатична сферична опора має сферичну вставку 1 по периферії якої встановлено гідростатичні опорні вузли (на рисунку не показані), що забезпечують

безконтактну силову взаємодію вставки із охоплюючою сферичною поверхнею 2 виконаною в корпусі 3 опори (рис. 1).

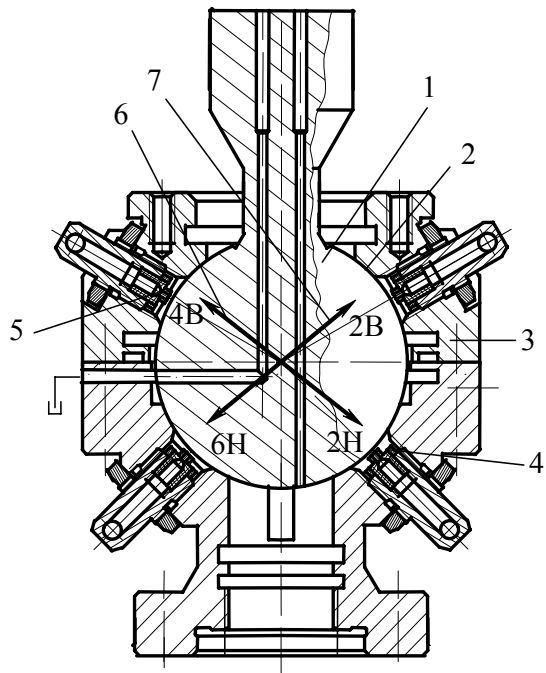


Рис. 1. Конструктивна схема розташування двох пар вимірювачів сопло-заслонка в гідростатичній сферичній опорі

Кожна пара сопл являє собою вимірювач який визначає реальне положення сферичної вставки в напрямку осі сопл.

Три наближено взаємно-ортогональних напрямки дають можливість встановити реальне просторове положення сферичної вставки відносно корпусу опори. Відстань від торця кожного сопла до рухомої сфери встановлюється в межах діаметрального зазору (-0.05..+0.05мм).

При зміщенні сфери в напрямку осі сопл змінюється тиск в камерах вимірювача, і відповідно, перепади тисків на діафрагмах. Перепади тисків та переміщення діафрагм Δ_1 , Δ_2 , Δ_3 будуть визначатись статичними і динамічними характеристиками системи вимірювачів «сопло-заслонка»

Додатково (на рисунку не показано) в опорі є пристрої регулювання її положення в межах діаметрального зазору між сферичними поверхнями вставки і корпусу.

Для визначення точного положення сферичної вставки в гідростатичній опорі наявні три пари вимірювачів типу «сопло-заслонка». Сопла 4, 5 кожної пари розташовані діаметрально протилежно відносно поверхні сферичної вставки, а напрямки 6 і 7 розташування пар сопл близькі до взаємно-ортогональних.

Три пари сопл об'єднані в одну гідросистему із спільним живленням рідиною від магістралі високого тиску. Кожна пара сопл підключена до гідросистеми по диференціальній схемі з постійними дроселями і гідромеханічними перетворювачами мембранного типу (рис. 2).

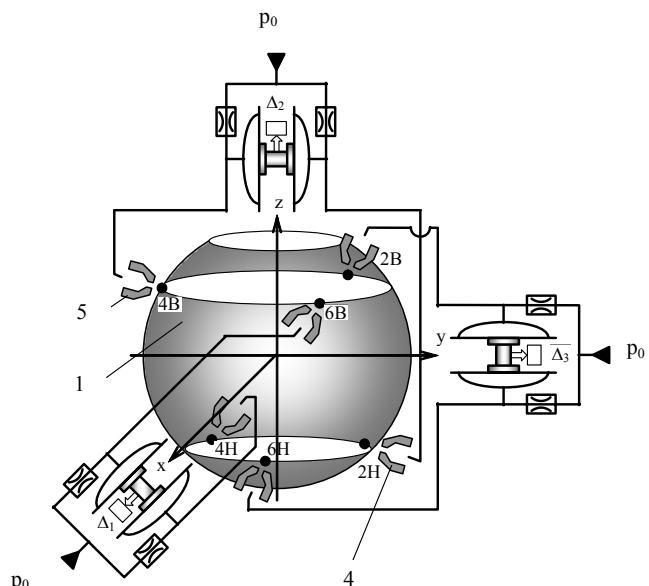


Рис. 2. Розташування всіх трьох пар вимірювальних сопл по периметру сфери та гідросхема їх підключення до гідромеханічних перетворювачів мембранного типу..

Характеристика окремого вимірювача «сопло-заслонка»

Розглянемо закономірності роботи вимірювача в статичному режимі. Торець сопла взаємодіє із поверхнею сфери із утворенням зазору δ (рис. 3).

При центральному розміщенні сфери в корпусі щілина буде концентричною і витрата через кожне сопло буде визначатись залежністю [5], справедливою для ламінарної течії рідини в зазорі. Витрата рідини для першого сопла

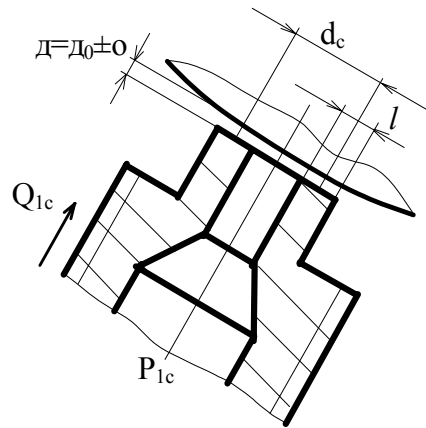


Рис. 3. Конструктивна схема окремого вимірювача «сопло-заслонка»

$$Q_{1c} = \frac{p_{1c} \delta^3 \pi d_c}{12 \mu l} \quad (1)$$

де: p_{1c} - тиск рідини в камері першого сопла; δ - зазор між соплом і сферою; d_c - середній діаметр торця сопла; l - довжина щілини, по радіусу сопла; μ - динамічна в'язкість рідини.

Гідравлічна провідність щілини при центральному розміщенні сфери складає

$$G_{co} = \frac{\delta_0^3 \pi d_c}{12 \mu l},$$

де δ_0 - номінальний зазор між торцем сопла і сферою.

При зміщенні сфери в напрямку вісі сопла на величину ξ зазор між сферою і торцем сопла буде змінюватись і складе

$$\delta = \delta_0 \pm \xi,$$

де знаки "плюс" і "мінус" будуть відповідати першому і другому соплам, пари сопл (рис. 4).

Відповідно формули (1) витрата рідини залежить від кубу зазору. При змінах зазору витрата рідини буде нелінійною функцією від переміщення сфери. Виконаємо лінеаризацію залежності витрати від переміщення сфери. Для цього розкладемо кубічну параболу δ^3 в ряд Тейлора. Обмежуючись лінійними складовими, одержимо:

$$\delta^3 \approx \delta_0^3 + \left. \frac{\partial \delta^3}{\partial \delta} \right|_{\delta=\delta_0} \cdot \Delta \delta = \delta_0^3 + 3\delta_0^2 \cdot \xi = \delta_0^3 \left(1 + 3 \frac{\xi}{\delta_0} \right). \quad (2)$$

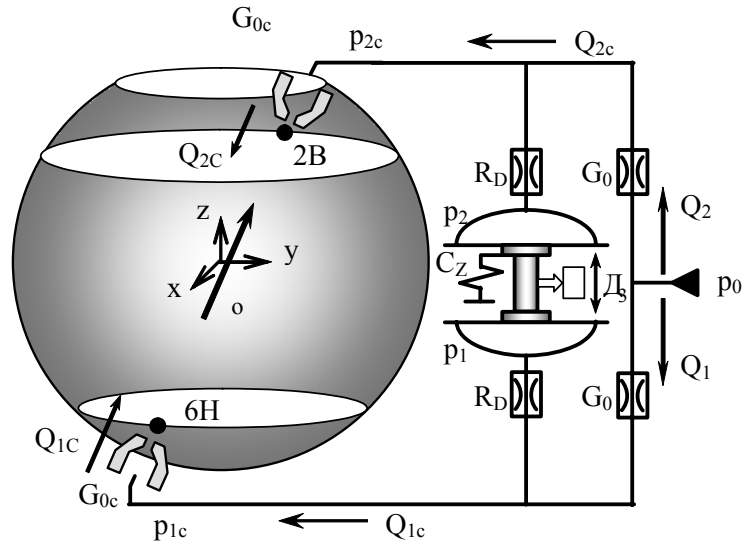


Рис.4. Розрахункова схема гідросистеми пари сопел для вимірів переміщення сферичної вставки в напрямку ξ

Підставивши значення зазору (2) в формулу (1), знайдемо витрату рідини через перше та друге сопла у вигляді

$$Q_c = \frac{P_c \delta_0^3 \pi d_c}{12 \mu l} \left(1 \pm 3 \frac{\xi}{\delta_0} \right) = P_c G_{oc} (1 \pm q \xi) \quad (3)$$

де p_c – тиск в каналі першого або другого сопла; $q_w = 3/\delta_0$, знак «плюс» відповідає першому, а «мінус» другому соплам.

Витрати окремо для першого Q_{1c} і другого Q_{2c} сопел відповідно дорівнюють

$$Q_{1c} = p_{1c} G_{oc} (1 + q_w \xi) \quad (4)$$

$$Q_{2c} = p_{2c} G_{oc} (1 - q_w \xi) \quad (5)$$

В статичному режимі роботи вимірювача витрата рідини, що підводиться від гідросистеми до сопла дорівнює витраті рідини, що витікає з канала сопла через щілину, тобто

$$Q_1 = Q_{1c}, \quad Q_2 = Q_{2c}.$$

Рівняння перепаду тиску на дроселі в гідролінії підводу рідини до першого сопла запишемо у вигляді

$$p_0 - p_{1c} = Q_{1c}^2 / G_0^2 \quad (6)$$

де: p_0 - тиск в гідросистемі живлення, G_0 - гідравлічна провідність дроселя в гідролінії підводу рідини до сопла.

Об'єднавши співвідношення (4) і (6), отримаємо рівняння зв'язку статичного тиску в каналі першого сопла p_{1c} і переміщення сфери ξ

$$p_{1c}^2 \frac{G_{0c}^2}{G_0^2} (1 + q_w \xi)^2 + p_{1c} - p_0 = 0. \quad (7)$$

Розв'язок даного квадратного рівняння має вигляд(знак плюс перед коренем вибрано з фізичного змісту задачі)

$$p_{1c} = \frac{G_0^2}{2G_{0c}^2 (1 + q_w \xi)^2} \left[\sqrt{1 + \frac{4p_0 G_{0c}^2}{G_0^2} (1 + q_w \xi)^2} - 1 \right] \quad (8)$$

Значення тиску для другого сопла буде також визначатись даною залежністю в якій переміщення ξ береться із знаком мінус.

Отримана залежність(8) є суттєво нелінійною. Аналіз графіка даної залежності (рис.5) дозволяє зробити висновок про наявність в ній лінійних ділянок незначної протяжності.

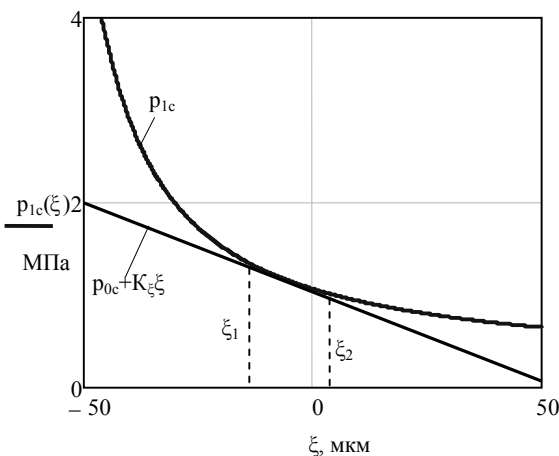


Рис.5. Нелінійна залежність тиску в каналі сопла від переміщення сфери.

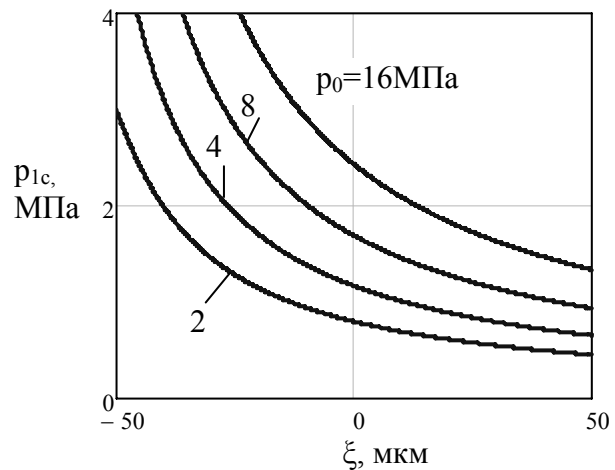


Рис.6. Вплив тиску p_0 в гідросистемі на статичну характеристику окремого вимірювача «сопло-заслонка».

Для околиці нульових значень переміщення ($\xi=0$) протяжність лінійної ділянки знаходиться в межах $\xi_2 - \xi_1 \approx 20$ мкм.

Тиск в каналі сопла залежить від ряду параметрів. Зокрема, це тиск живлення p_0 , відношення гідравлічних провідностей сопла і дроселя G_{0c}/G_0 та значення номінального зазору δ_0 .

Розраховані за формулою (8) залежності тиску від вказаних параметрів наведені на рис. 6-8.

Підвищення тиску живлення мало змінює вигляд характеристики (рис.6). Як впливає із аналізу графіків підвищення тиску дещо знижує нелінійність характеристики.

Зменшення відношення гідравлічних провідностей сопла і дроселя приводить до підвищення загального рівня тиску в каналі сопла. При цьому суттєвим чином зменшується лінійна ділянка характеристики (рис. 7).

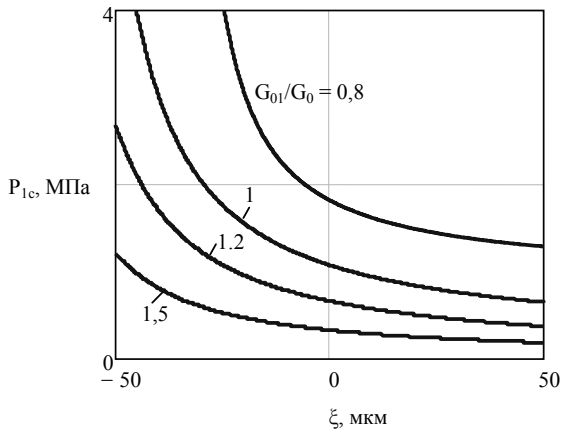


Рис.7. Вплив відношення гідравлічних провідностей сопла і дроселя на статичну характеристику вимірювача «сопло-заслонка»

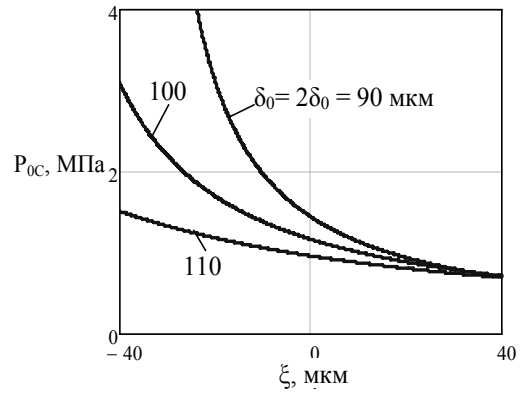


Рис.8. Вплив діаметрального зазору між торцем сопла і поверхнею сфери на статичну характеристику вимірювача

Збільшення загального діаметрального зазору між рухомою сферою і торцями сопел $\delta_D = 2\delta_0$ суттєвим чином впливає на вид і характер статичної характеристики вимірювача «сопло-заслонка» (рис. 8). Рациональним у відношенні лінійності характеристики слід вважати значення діаметрального зазору 100..110 мкм.

Виконаємо аналітичний аналіз нелінійної залежності (8). Для нього здійснимо розклад залежності (8) в ряд Тейлора по степеням переміщення сфери. Обмежившись першою складовою розкладу одержимо

$$p_{1c} = p_{0c} + \left. \frac{\partial p_{1c}}{\partial \xi} \right|_0 \xi, \quad (9)$$

де значення статичного тиску в каналі сопла p_{0c} та частинна похідна $\frac{\partial p_{1c}}{\partial \xi}$ обчислюються в середньому положенні сфери при $\xi = 0$.

Значення статичного тиску в каналі сопла визначається із залежності (8) підстановкою $\xi = 0$ і матиме вигляд:

$$p_{0c} = \frac{G_0^2}{2G_{0c}^2} \left[\sqrt{1 + \frac{4p_0 G_{0c}^2}{G_0^2}} - 1 \right] \quad (10)$$

Частинну похідну знайдемо диференціюванням залежності (8)

$$\frac{\partial p_{1c}}{\partial \xi} = \frac{G_0^2}{2G_{0c}^2} q_w (1 + q_w \xi) \left\{ \frac{2p_0 G_{0c}^2}{G_0^2 (1 + q_w \xi)^2 \sqrt{1 + \frac{4p_0 G_{0c}^2}{G_0^2} (1 + q_w \xi)^2}} - \frac{\sqrt{1 + \frac{4p_0 G_{0c}^2}{G_0^2} (1 + q_w \xi)^2} - 1}{(1 + q_w \xi)^4} \right\} \quad (11)$$

Підставивши в (11) величину зазору $\xi = 0$ визначимо

$$\left. \frac{\partial p_{1c}}{\partial \xi} \right|_0 = -\frac{G_{0c}^2 q_w}{G_{0c}^2} \left[\frac{1 + 2p_0 G_{0c}^2 / G_\delta^{-2}}{\sqrt{1 + 4p_0 G_{0c}^2 / G_\delta^{-2}}} - 1 \right] = K_\xi \quad (12)$$

Провівши аналогічні викладки, для другого сопла визначимо

$$\left. \frac{\partial p_{2c}}{\partial \xi} \right|_0 = \left. \frac{\partial p_{1c}}{\partial \xi} \right|_0 = K_\xi, \quad K_\xi < 0 \quad (13)$$

З врахуванням залежності (13) на підставі формули (9) отримаємо значення тиску для обох сопл

$$p_{1c}, p_{2c} = p_{0c} \pm K_\xi \xi \quad (14)$$

де знак «плюс» відноситься до першого сопла, а знак «мінус» до другого сопла.

Визначимо різницю тисків в соплах, яка дорівнює різниці тисків на виході вимірювача. Використовуючи лінійну залежність (14) знайдемо:

$$p_{1c} - p_{2c} = -2K_\xi \xi \quad (15)$$

Після підстановки значень частинної похідної з (12) в формулу (15) отримаємо залежність перепаду тиску від переміщення сфери у вигляді:

$$p_{1c} - p_{2c} = K_{xw} \xi \quad (16)$$

де коефіцієнт підсилення вимірювача у вигляді пари сопл

$$K_{xw} = 2K_\xi \quad (17)$$

Визначимо абсолютні значення тиску в соплах. Із залежності (14) з врахуванням (16)

$$p_{1c} = p_{0c} - \frac{K_{xw}}{2} \xi, \quad p_{2c} = p_{0c} + \frac{K_{xw}}{2} \xi \quad (18)$$

Підставляючи значення тисків з (18) в залежність (3) знайдемо значення витрати рідини через зазори між сферою і торцями сопл:

$$Q_{1c}, Q_{2c} = \left(p_{0c} \mp \frac{K_{xw}}{2} \xi \right) G_{0c} (1 \pm q_w \xi) \quad (19)$$

Після перетворень в правій частині рівняння (19), нехтуючи складовими, що включають ξ^2 , як нескінченно малими, отримаємо

$$Q_c = G_{0c} p_{0c} + K_{qw} \xi \quad (20)$$

де коефіцієнт підсилення по витраті

$$K_{qw} = p_{0c}G_{0c}q_w - K_{xw}G_{0c}/2 \quad (21)$$

Визначимо переміщення мембрани z , яке є вихідним сигналом вимірювача.

Переміщення мембрани в статиці визначається перепадом тиску і еквівалентною жорсткістю мембрани. Відповідно

$$z = (p_{2c} - p_{1c})f / c_z \quad (22)$$

де: f - еквівалентна площа мембрани; c_z - еквівалентна жорсткість мембрани.

Підставляючи значення перепаду тиску із (16) в залежність (22) визначимо залежність лінеризованого прогину мембрани від переміщення сфери

$$z_c = \frac{K_{xw}f}{c_z} \xi \quad (23)$$

Дана формула визначає лінійну статичну залежність переміщення мембрани від переміщення сфери (рис.9).

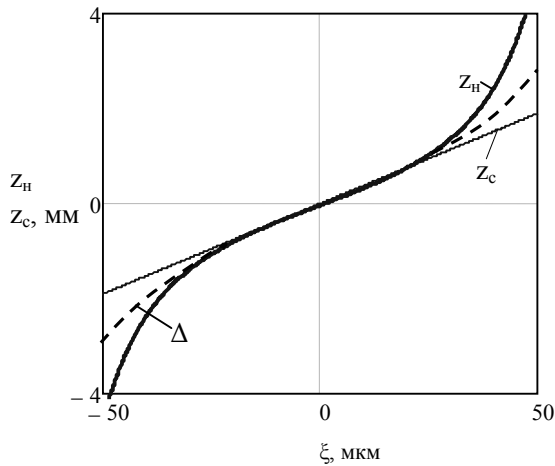


Рис. 9. Відмінність лінеризованої і фактичної залежності переміщення мембрани від зміни положення сфери.

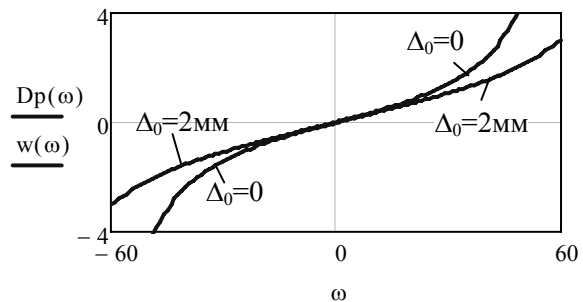


Рис. 10. Вплив нелінійних характеристики пружності мембранного привода на статичну характеристику вимірювача

Нелінійна залежність прогину буде одержана підстановкою значень тиску із формули (8) в формулу (22) і складе

$$z_H = \frac{f}{2C_z} \frac{G_0^2}{G_{0c}^2} \left\{ \frac{1}{(1+q_w\xi)^2} \left[\sqrt{1 + \frac{4p_0G_{0c}^2}{G_0^2} (1+q_w\xi)^2} - 1 \right] - \frac{1}{(1-q_w\xi)^2} \left[\sqrt{1 + \frac{4p_0G_{0c}^2}{G_0^2} (1-q_w\xi)^2} - 1 \right] \right\} \quad (24)$$

Нелінійна залежність відповідає лінійній (23) в діапазоні зміни положення сфери ± 20 мкм (рис.9).

Розрахунки згідно залежностей (22), (24) здійснено на основі припущення про лінійний зв'язок прогину мембрани і перепаду тиску. В дійсності при значних прогинах зв'язок прогину мембрани і перепаду тиску становиться нелінійним і фактичний прогин мембрани Δ буде відрізнятися від розрахункового за формулою (24). Фактичний прогин мембрани буде мати середнє значення між залежностями z_n і z_c (див.рис. 9). Це приведе до розширення лінійної ділянки, збільшивши лінійний діапазон вимірів до значення близького ± 35 мкм, при загальному діаметральному зазорі 100 мкм.

З метою збільшення протяжності лінійної ділянки характеристики в мембранних перетворювачах встановлені додаткові пружини, які взаємодіють з мембранами з утворенням деякого зазору Δ_0 . Величина зазору регулюється початковим стиском пружини. При відповідному виборі жорсткості пружини та значення зазору між пружиною і діафрагмою Δ_0 лінійна частина характеристики вимірювача збільшується (рис. 10). При цьому протяжність лінійної ділянки характеристики може перевищувати ± 50 мкм при діаметральному зазорі 120 мкм.

Висновки

1. Для визначення точного положення регульованої гідростатичної сферичної опори доцільно використовувати систему вимірювачів типу «сопло-заслонка», що включає три пари сопл розташованих діаметрально відносно сфери в трьох близьких до взаємно-ортогональних напрямках.

2. При переміщенні сфери тиск в каналі кожного сопла змінюється за нелінійним законом при наявності незначної (до 20%) ділянки близької до лінійної.

3. Включення вимірюваних сопл по диференціальній схемі суттєвим чином збільшує протяжність лінійної ділянки характеристики вимірювача яка сягає 70% від загального діаметрального зазору між рухомою сферою і корпусом.

4. Встановлення додаткових пружин у мембранному перетворювачі збільшує протяжність лінійної ділянки характеристики до значень 85% і вище.

5. Як напрямок подальших досліджень рекомендується провести аналіз динамічних характеристик вимірювача положення сфери із визначенням резонансних частот та полоси пропускання частот вимірювача.

Список літератури

1. Крайнев А.Ф. Идеология конструирования. – М.: Машиностроение, 2003. – 384с.
2. Бушуев В.В. Практика конструирования машин. – М.: Машиностроение, 2006. – 448с.
3. Струтинський С.В., Яхно О.М. Визначення статичних і динамічних характеристик гідростатичного сферичного опорного вузла // Промислова гідравліка і пневматика. – 2007. – №2 (16). – С.85-90.
4. Яхно О.М., Струтинський С.В. Математичне моделювання адаптивної системи автоматичного керування гідростатичного сферичного опорного вузла // Вестник Національного технічного університету України «Киевский политехнический институт», серія Машиностроение. – 2007, №51. – С.70-81.
5. Башта Т.М. Машиностроительная гидравлика. – М.: Машиностроение, 1971. – 672с.