

Визначення силових характеристик безконтактної регульованої сферичної опори

В статті розглянута конструкція безконтактної регульованої сферичної опори рідинного тертя. Розроблено методику розрахунку робочих процесів, які мають місце в опорі. Визначено параметри жорсткості та силові характеристики опори.

сферична опора, регулювання положення, гідродинамічні процеси, математична модель, силові характеристики

Прецизійні безконтактні опори рідинного тертя (аеростатичні або гідростатичні) дають можливість суттєво підвищити точність просторових механізмів, які застосовуються в технологічних машинах [1,2].

Опори даного типу мають високі точність і жорсткість, забезпечують ефективне демпфування високочастотних коливань механізмів, значно знижують рівень шуму і вібрації. Тому розробка сферичних опор рідинного тертя являє собою актуальну науково-технічну проблему [3].

В літературних джерелах наявний ряд оригінальних опор рідинного тертя та результати дослідження їх характеристик [4,5]. Вказано, що наявність шару рідини або газу між деталями опори забезпечує на кілька порядків вищу точність опори ($\sim 0,1\text{мкм}$) в порівнянні з точністю виготовлення робочих поверхонь опори (допуски порядку $10..20\text{мкм}$). Забезпечення даних жорстких допусків при виготовленні зовнішніх і внутрішніх сферичних робочих поверхонь являє собою складну технологічну проблему.

Знизити вимоги до точності виготовлення можна, застосувавши сферичні опори змінної (регульованої) геометрії. При цьому одночасно виникає можливість керованої зміни стійкого (центрального) положення опори. Регулювання центрального положення опори суттєво підвищує точність просторових механізмів технологічних машин. Використання регульованих сферичних опор змінної геометрії в якості елементів мехатронних систем позиціонування технологічних машин дозволяє на новому якісному рівні розробити алгоритмічне та програмне забезпечення систем керування і підвищити якісні показники технологічних машин.

В літературних джерелах не виявлено конструкцій регульованих сферичних опор змінної геометрії та методів їх розрахунку. Цій науково-технічній проблемі і присвячена дана стаття, в якій наведено основні параметри розробленого дослідного зразка регульованої сферичної опори рідинного тертя та результати досліджень її силових характеристик.

Розроблена регульована сферична опора має корпус 1, розміщений на платформі просторового механізму (рис. 1).

З корпусом з'єднана кришка 2, яка має приводи 3,4 для її відносного просторового переміщення відносно корпусу. Корпус і кришка мають порожнину у вигляді ділянок точних сферичних поверхонь, які охоплюють рухому сферу 5.

Рухома сфера з'єднана із штангою 6, в якій розміщені приводи зміни довжини штанги 7. Застосовуються приводи дискретної дії (цифрові приводи), що мають ряд

поршнів з упорами 8, а також привод мікропереміщень 9. Точні розміри довжини штанги визначаються вимірювачем 10.

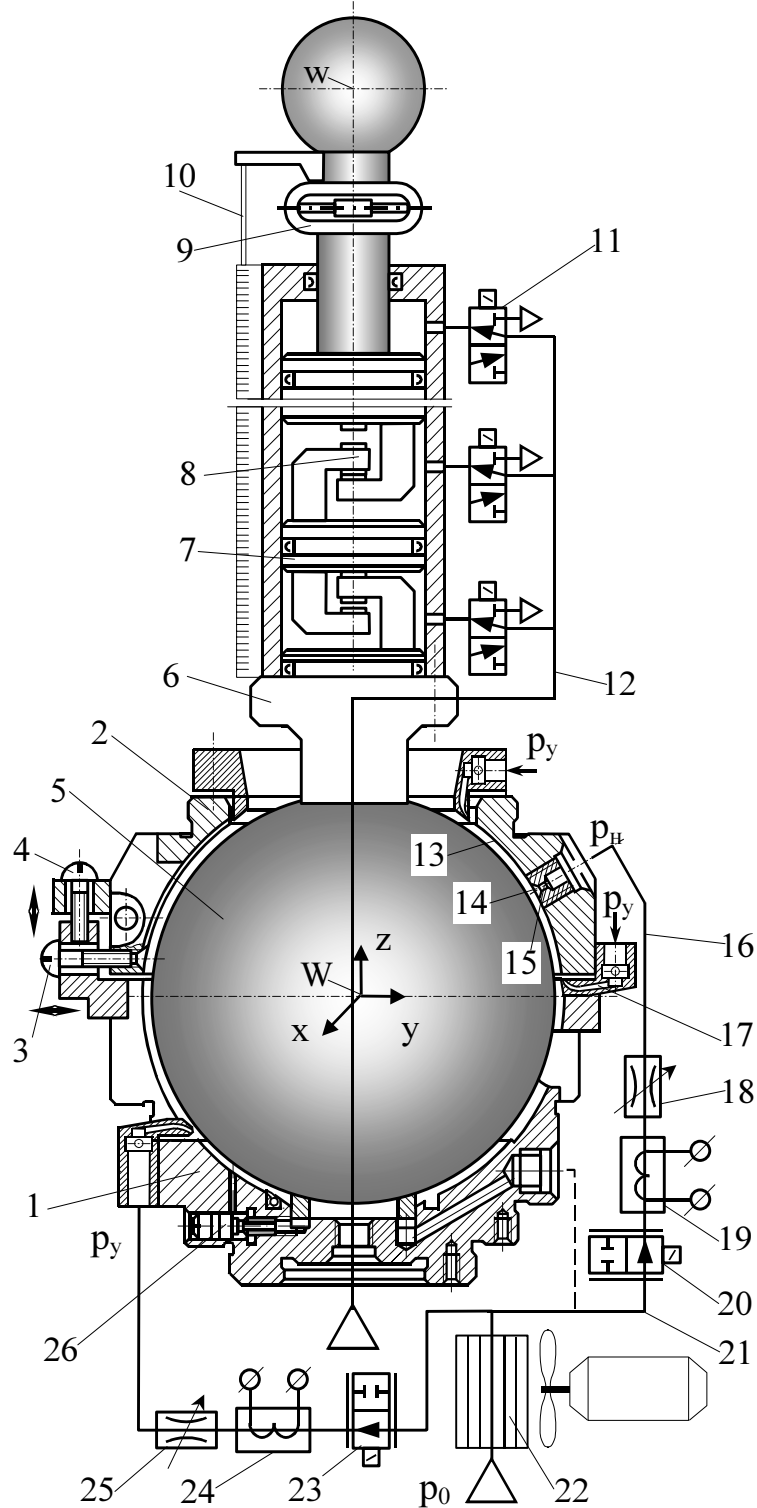


Рисунок 1 – Конструктивна схема безконтактної регульованої сферичної опори з приводом зміни довжини штанги

Приводи дискретної дії керуються спеціальною системою, яка включає ряд розподільників 11, що подають робоче середовище в порожнини циліндрів. Підвід робочого середовища до розподільників здійснюється від магістралі 12 через отвори у рухомій сфері та штанзі.

Рухома сфера встановлена в корпусі і кришці на статичних опорах рідинного тертя (аеростатичних або гідростатичних). Опорні вузли 13 розташовані регулярним чином по периферії сферичної поверхні. Опорні вузли мають кармани 14, в які через нерегульовані дроселі 15 подається робоче середовище від магістралі 16.

Опорні вузли мають по своїй периферії систему соплових пристроїв 17, які служать для гідродинамічного запирання щілини на виході гідростатичного або аеростатичного опорного вузла.

Кожний опорний вузол має автономну регульовальну систему живлення і керування. Регулювання потоку середовища до кармана статичної опори здійснюється системою регульованих дроселів 18, 20 і нагрівача 19. Підвід робочого середовища до системи дроселів здійснюється від магістралі 21, в яку подається робоче середовище охолоджене в радіаторі 22. Регулювання параметрів потоків у соплових пристроях здійснюється аналогічними системами керування, що включають регульовані дроселі 23, 25 та нагрівачі 24. Конструктивне виконання регульованих дроселів 18 дозволяє виконати ручне регулювання опору дроселя і забезпечити регулювання початкового положення рухомої сфери. Регульовані дроселі мають запірний елемент 26, який змінює площу прохідного перерізу каналу, по якому робоче середовище подається в карман статичного опорного вузла.

Регулювання положення рухомої сфери здійснюється різними способами: зміною взаємного положення корпусу і кришки спеціальними приводами мікропереміщень; деформуванням деталей опори спеціальними пристроями; нагріванням окремих ділянок деталей опори з метою зміни їх геометрії шляхом термодформацій; зміною положення окремих робочих ділянок опори переміщенням спеціальних вставок; введенням або відключенням додаткових аеростатичних опор, зміною величини потоків робочого середовища (рідини або газу) на окремих ділянках опори; зміною термодинамічних параметрів (зокрема температури) окремих потоків робочого середовища (газу); гідродинамічним запиранням вихідних щілин опорних вузлів.

Найбільш гнучким і ефективним є регулювання положення опори зміною параметрів потоку на виході із опорних вузлів. Це досягається динамічним запиранням щілини підведеними до її торця струменями робочого середовища. Струмені формуються у малорозмірних соплових пристроях, виготовлених методом лазерної стереолітографії. Соплові пристрої встановлено по периферії опорного вузла (рис. 2).

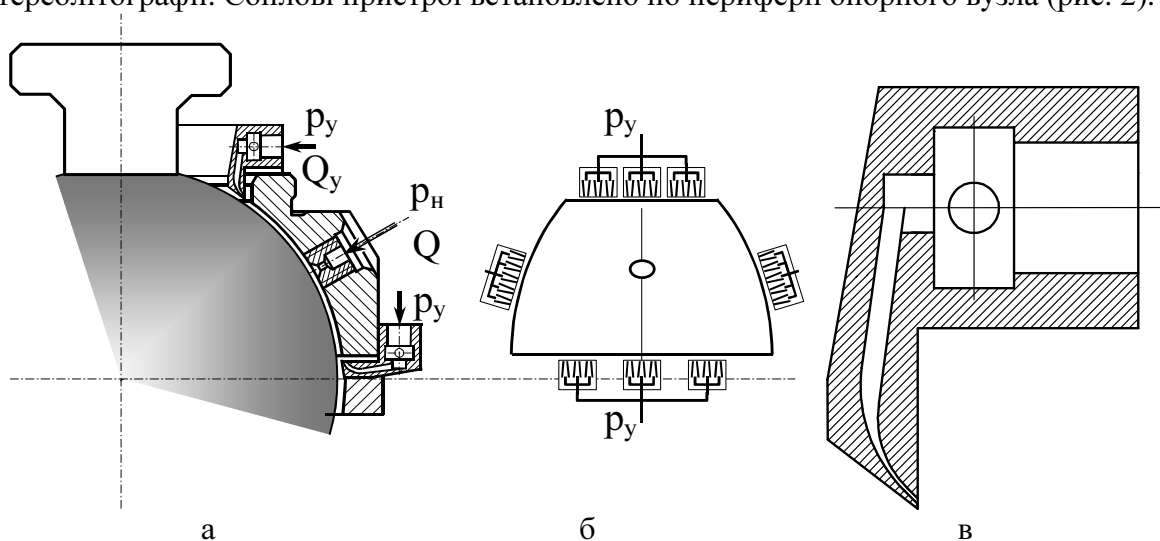
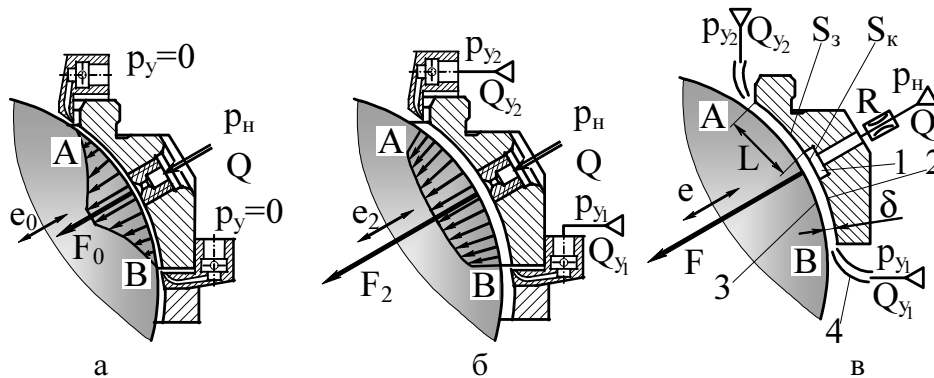


Рисунок 2 – Схема встановлення соплових пристроїв по периферії опорного вузла (а, б) та сопловий пристрій для формування струменя робочого середовища (в)

При подачі робочого середовища під тиском p_{y1} , p_{y2} в соплові пристрої в перерізі щілини (точки А, В) формується область підвищеного тиску.

При цьому еюра тисків в щілині буде залежати від тиску на виході (рис. 3).



а – еюра тиску при відсутності керуючих струменів; б – еюра тиску при гідродинамічному запиранні щілин; в – розрахункова схема опорного вузла.

Рисунок 3 –Зміна еюр тиску в перерізі опорного вузла при гідродинамічному запиранні виходу щілини струменями робочого середовища

Регулюванням тиску на виході щілини можна в широких межах змінювати силу тиску в опорному вузлі.

Визначимо основні закономірності роботи опорного вузла із запиранням потоку на виході щілини. Опорний вузол (див. рис. 3в) має карман 1, щілину, утворену робочими поверхнями 2 і 3, та систему соплових пристроїв 4, розміщених по периферії опорного вузла.

При відсутності керуючих потоків ($p_y=0$, див. рис. 3а) характеристики вузла визначаються параметрами руху рідини в щілині та підвідних каналах.

Перепад тиску на всій довжині щілині описується залежністю

$$p = \frac{12\mu L}{b\delta^3} Q + p_c, \quad (1)$$

де p – тиск в кармані;

μ - динамічна в'язкість робочого середовища;

L – середня довжина щілини;

b – довжина периметру опорного вузла;

δ - зазор між рухомими деталями;

Q – загальна витрата робочого середовища;

$p_c=0$ – тиск на виході щілини.

Характеристика течії рідини через дросель прийнята лінійною

$$p_H - p = RQ, \quad (2)$$

де p_H - тиск рідини на вході в дросель;

R - гідравлічний опір дроселя.

Об'єднуючи (1) і (2), визначимо тиск в кармані опорного вузла

$$p = p_H / \left(1 + \frac{b\delta^3 R}{12\mu L} \right). \quad (3)$$

Рівняння рівноваги сил в опорному вузлі запишемо у вигляді

$$F = p \cdot S_k + S_s / 2 \cdot p, \quad (4)$$

де S_k - площа кармана;

S_s - площа поверхонь, які утворюють зазор.

Підставивши в дану формулу значення тиску (3), одержимо силову характеристику опорного вузла без керуючих струменів у вигляді

$$F = p_H \left(S_k + \frac{1}{2} S_3 \right) / \left(1 + \frac{b\delta^3 R}{12\mu L} \right).$$

Розрахована по даній формулі силова характеристика дає залежність зусилля від величини зазору (рис. 4).

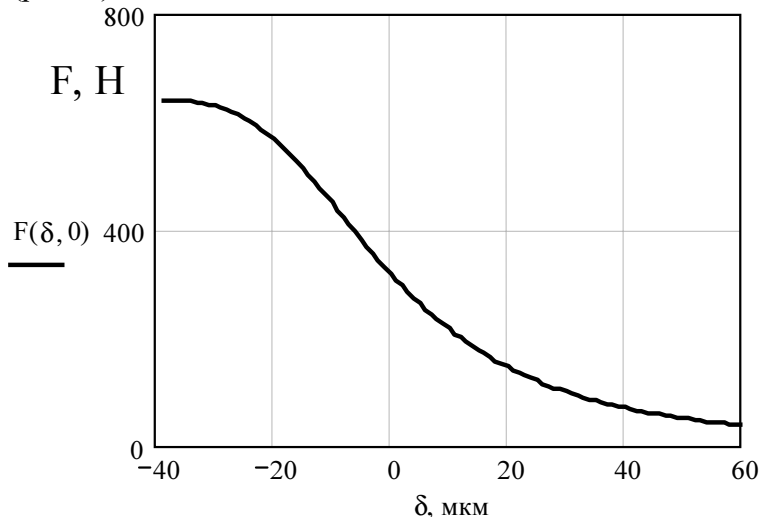


Рисунок 4 – Залежність зусилля, яке сприймає опорний вузол (при $p_y=0$) від зміни зазору між опорними поверхнями

Силовa характеристика є нелінійною. Вона побудована при значеннях зазору, визначених відносно деякої середньої величини δ_0 ($\delta_0=40$ мкм).

При наявності керуючих струменів течія рідини в зазорі зазнає суттєвих змін (рис. 5).

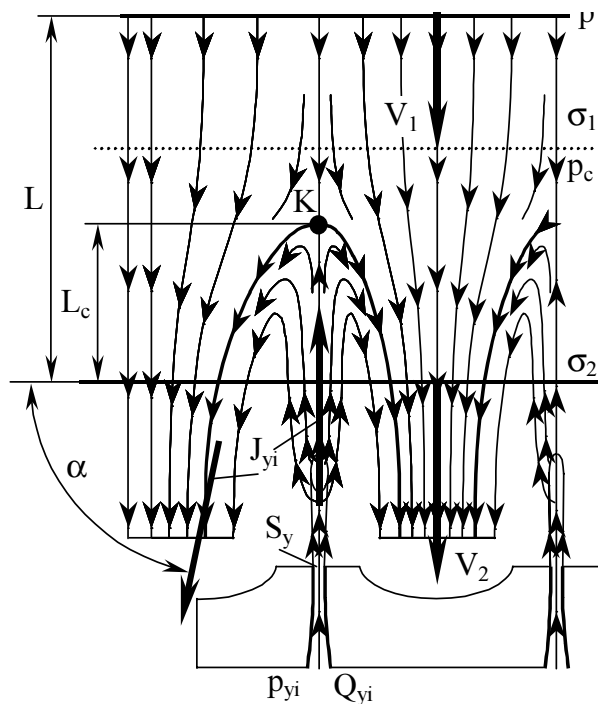


Рисунок 5 – Картина ліній течії в щілині опорного вузла при наявності гідродинамічного запирання щілини керуючими струменями

Коли керуючий струмінь рідини проникає в щілину, в ній формується течія рідини із критичною точкою K . Положення критичної точки залежить від співвідношення тисків p і p_y та кількості керуючих струменів, розташованих по периферії опори.

Враховуючи, що розмір щілини (δ) набагато менший довжини (L) щілини, можна припустити, що глибина проникнення струменя в зазор L_c є малою у порівнянні з довжиною (L) зазору.

Визначимо підвищення тиску p_c на виході із щілини, яке обумовлене дією струменів. Рівняння імпульсів для контрольного об'єму, обмеженого поверхнями σ_1 та σ_2 в проекціях на вісь струменя має вигляд

$$p_c \cdot \sigma_1 + \rho V_1^2 \sigma_1 = \sum_{i=1}^n (J_{yi} + J_{yi} \sin \alpha_i) + \rho V_2^2 \sigma_2 + 2\tau \cdot S_p, \quad (5)$$

де p_c - середній тиск в першому перерізі;

σ_1 - площа перерізу щілини;

ρ - густина робочого середовища;

V_1 - швидкість в першому перерізі;

J_{yi} - імпульс i -го струменя;

n - число струменів, які потрапляють в щілину;

α - кут зворотнього потоку струменя;

V_2 - швидкість в другому перерізі;

σ_2 - площа другого перерізу;

τ - дотичне напруження на стінках щілини;

S_p - площа твердих поверхонь щілини в межах контрольного об'єму.

Враховуючи, що поперечні розміри струменів набагато менші довжини периметра щілини, можна в першому наближенні прийняти

$$V_1^2 \sigma_1 \approx V_2^2 \sigma_2.$$

Зворотня течія, що формується при розповсюдженні струменя в зустрічному потоці, як правило, має кут розповсюдження $\alpha \approx \pi/2$. Не враховуючи дії сил тертя по причині їх малості, із рівняння імпульсів (5) одержимо

$$p_c = 2 \sum_{i=1}^n J_{yi} / \sigma_1.$$

Імпульс струменя визначиться через значення тиску на вході в сопло

$$J_{yi} = \rho S_y V_{yi}^2 \cos \gamma = \rho \frac{Q_{yi}^2 \cos \gamma}{S_y} = \rho \frac{\mu_c^2}{S_y} \cdot \frac{2}{\rho} \cdot S_y^2 p_{yi} \cos \gamma = 2\mu_c^2 S_y p_{yi} \cos \gamma, \quad (6)$$

де μ_c - коефіцієнт витрати сопла;

S_y - площа перерізу сопла;

p_{yi} - тиск на вході в сопло з номером i ;

γ - кут між площиною опори і віссю сопла.

Враховуючи, що площа перерізу щілини $\sigma_1 = b \cdot \delta$, із (5) і (6) держимо значення тиску у вихідному перерізі щілини у вигляді

$$p_c = \frac{4 \sum_{i=1}^n \mu_c^2 S_y p_{yi} \cos \gamma}{b\delta}. \quad (7)$$

Відповідно тиск в кармані опорного вузла визначиться із формули (1) після підстановки значення тиску на виході щілини із формули (7)

$$p = \frac{12\mu L Q}{b\delta^3} + \frac{4\sum_{i=1}^n \mu_c^2 S_y p_{yi} \cos \gamma}{b\delta}.$$

Об'єднуючи дану залежність із характеристикою дроселя (2) та рівнянням рівноваги сил (4), знайдемо силову характеристику опорного вузла із гідродинамічним запиранням потоку на виході щілини

$$F = \left(S_k + \frac{1}{2} S_3 \right) \left(p_H + 4\sum_{i=1}^n \mu_c^2 S_y p_{yi} \cos \gamma \cdot \frac{\delta^2 R}{12\mu L} \right) / \left(1 + \frac{b\delta^3 R}{12\mu L} \right). \quad (8)$$

Силову характеристику опорного вузла визначається зазором та величиною тиску керування. Вона є функцією двох змінних (рис. 6).

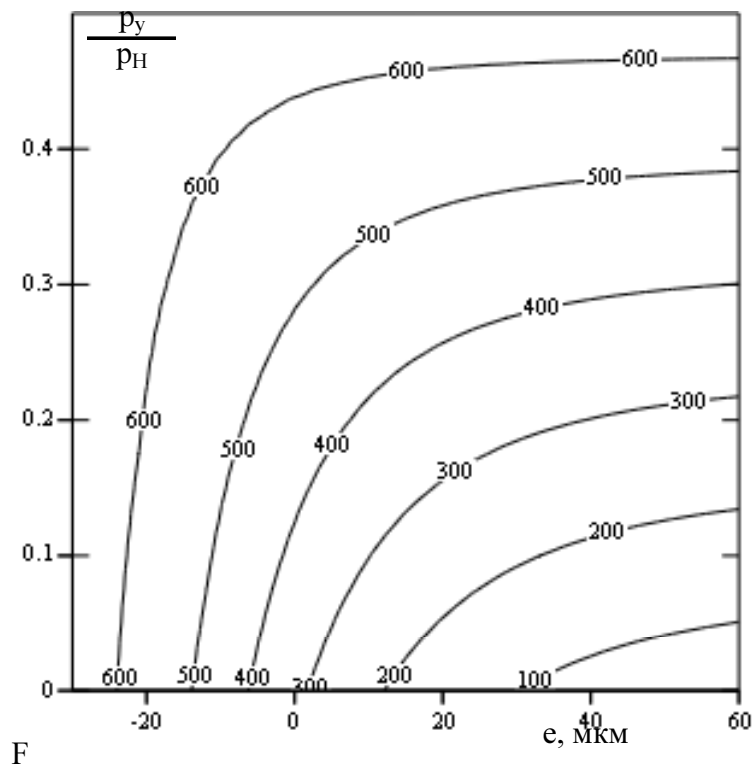


Рисунок 6 – Силову характеристику окремого опорного вузла при наявності регулювання тиску в зазорі струменями

Загальна несуча здатність (реакція) регульованої сферичної опори є результатом спільної дії окремих опорних вузлів (рис. 7).

Всього сферична опора має шість регульованих і один нерегульований (1П) опорний вузол. Три вузли 1В, 2В, 3В утворюють верхній несучий пояс сферичної опори, а три вузли 1Н, 2Н і 3Н – нижній несучий пояс.

Для малих зміщень сфери зміна зазору в кожній точці сфери в радіальному напрямку залежить лише від одного параметра (кута θ_e) і визначається залежністю

$$\delta = \delta_0 - |\vec{E}| \cdot \cos \theta_e, \quad (9)$$

де δ_0 - початковий зазор;

\vec{E} - вектор переміщення сфери.

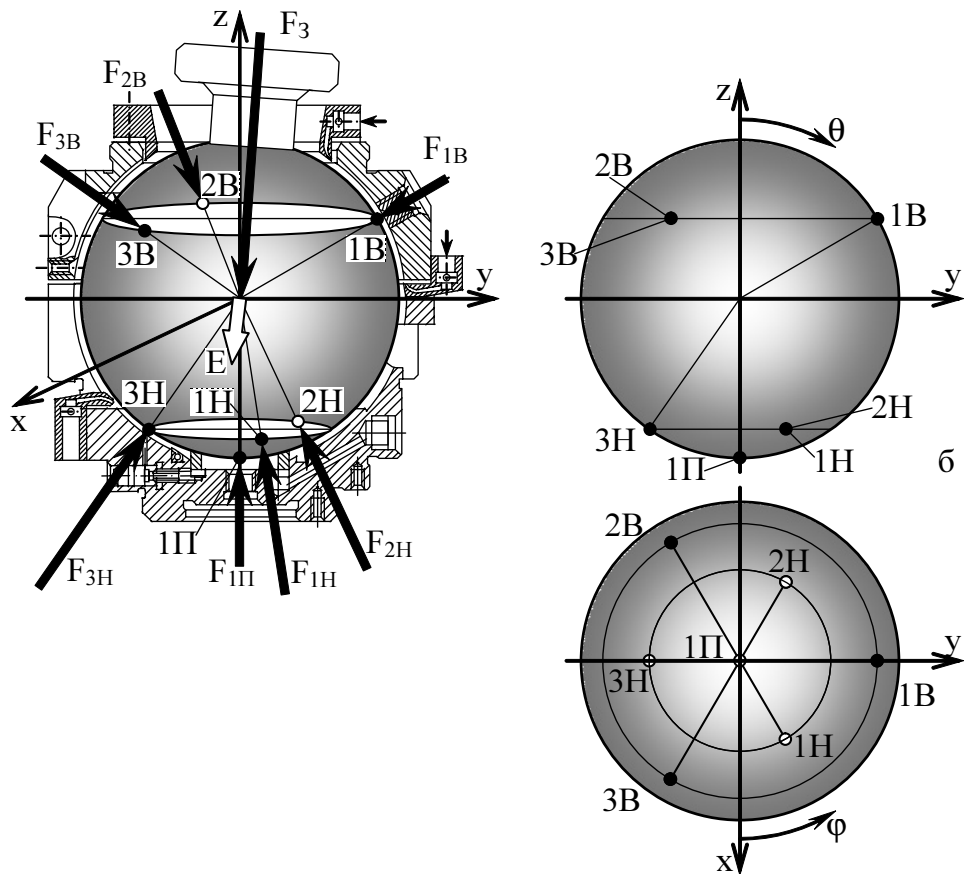


Рисунок 7 – Схема розташування окремих опорних вузлів у сферичній опорі

В проєкціях на осі координат x, y, z одержимо систему трьох рівнянь рівноваги, які зв'язують навантаження і переміщення рухомої сфери

$$F_{3x} + \sum_{i=1}^N F_{ix} = 0, F_{3y} + \sum_{i=1}^N F_{iy} = 0, F_{3z} + \sum_{i=1}^N F_{iz} = 0. \quad (10)$$

де F_{ix}, F_{iy}, F_{iz} - проєкції зусиль i -го опорного вузла;

$N=7$ – загальна кількість опорних вузлів.

Для розв'язку нелінійної системи (10) запропонована спеціальна методика.

Зусилля в кожному опорному вузлі відповідно формули (8) залежить від зазору, який в свою чергу визначається через вектор переміщень згідно формули (9). Відповідно зусилля в кожному опорному вузлі

$$\vec{F}_i = \vec{F}_i(\delta_i), \quad \delta_i = \delta_i(e_x, e_y, e_z), \quad (11)$$

де e_x, e_y, e_z - проєкції вектора переміщень \vec{E} .

Підставляючи в систему рівнянь (10) значення силових характеристик кожного опорного вузла згідно формули (8) для зазору (9) одержимо розрахункові залежності для визначення вектора зусилля в сферичній опорі \vec{F}_3 , яке відповідає заданому вектору переміщення сфери \vec{E} .

Результати розрахунків модуля вектора зусилля для різних значень напрямку переміщення сфери в залежності від модуля вектора переміщень є нелінійним (рис. 8).

У всьому діапазоні можливих змін напрямку вектора переміщення відхилення поліноміальної залежності від розрахункової є незначним і не перевищує 5%.

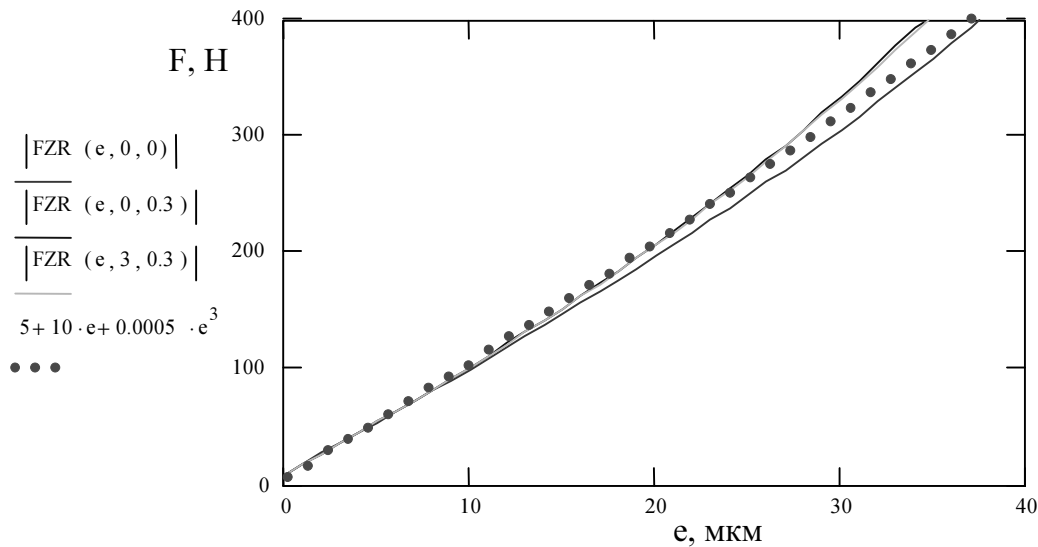


Рисунок 8 – Залежність модуля опорної реакції модуля вектора переміщення сфери розрахована для різних напрямків вектора переміщень

З метою спрощення результати розрахунків апроксимовані поліноміальною функцією (пунктирна крива на рис. 8).

Дана функція встановлена у вигляді:

$$F_3 = \alpha_0 + ae + be^3.$$

Наведений вище розрахунок визначає навантаження в опорі як функцію від вектора переміщень рухомої сфери. Для розв'язку оберненої задачі тобто знаходження вектора переміщень рухомої сфери по вектору навантаження розроблена спеціальна методика. Вона базується на застосуванні стохастичних ітераційних методів, причому на кожній ітерації взаємний зв'язок параметрів встановлюється на основі методів Монте-Карло.

Відповідно методики розглядається деяка область зміни кутових координат вектора переміщень \vec{E} . Область зміни кутів θ_e є двозв'язною і охоплює два сферичні пояси

$$0 \leq \theta_e \leq \theta_{\max}, \quad \frac{\pi}{2} - \theta_{\max} \leq \theta_e \leq \frac{\pi}{2}, \quad 0 < \varphi_e \leq 2\pi$$

де θ_{\max} - максимальний кут відхилення осі рухомої сфери ($\theta_{\max} \cong 0.3$).

В околиці розглянутої області зміни кутових координат вектора переміщень задається стохастичний масив точок.

Стохастичний масив формується у вигляді випадкового вектора, кутові координати якого розподілені по рівномірному закону (координати φ_e) та нормальному закону (координати θ_e) для кожного сферичного пояса окремо (рис. 9).

Стохастичний масив точок обробляється з метою його впорядкування. Масив точок являє собою нечітко визначену множину, частина якої (при умові $\theta_e < 0$) виключається із розгляду, а частина $\theta_e > \theta_{\max}$ є несуттєвою. Масив приводиться до вигляду стохастичної матриці.

Стохастичні матриці, визначені для кожного сферичного пояса, утворюють систему матриць, яка визначає аргументи системи вектор-функцій, які пов'язують вектори переміщень і відповідні їм вектори навантажень у сферичній опорі.

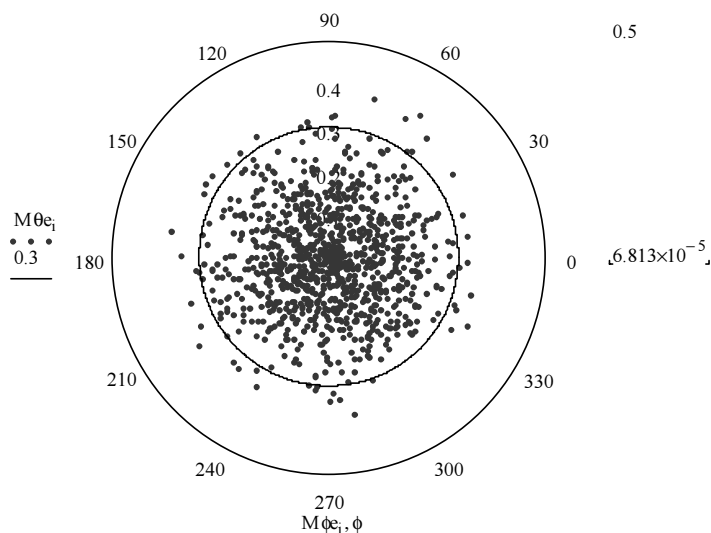


Рисунок 9 – Розташування точок, які відповідають випадковому масиву із напрямків переміщень сфери для одного із сферичних поясів зміни кутів θ

Таким чином для i -го по порядку набору координат вектора переміщень $(\varphi_{ei}, \theta_{ei})$ поставлено у відповідність координати вектора зусилля $(\varphi_{Ri}, \theta_{Ri})$. Для даної бінарної системи куткових координат визначено просторові матриці проєкцій переміщень та навантажень у сферичних опорах. Обидві просторові матриці є функціями стохастичної матриці куткових координат вектора переміщень $(\varphi_{ei}, \theta_{ei})$. Елементи бінарної системи відповідають парам точок на поверхні сфери, через які проходять лінії дії стохастичного вектора

переміщень і відповідного даному переміщенню вектора зусиль (рис. 10).

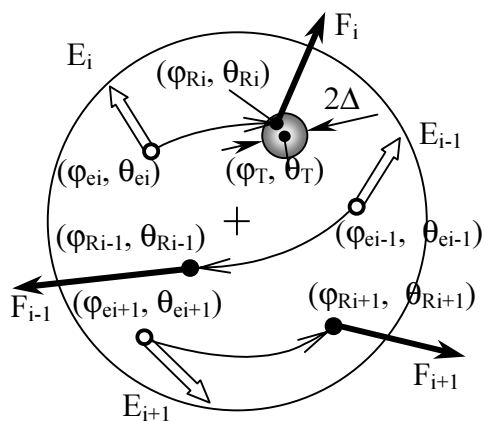


Рисунок 10 – Розташування точок на сфері, які відповідають парам куткових координат вектора переміщень і вектора зусилля.

Знаходження вектора переміщень по заданому вектору навантаження полягає у виборі елемента просторової матриці, яка визначає проєкції випадкового вектора навантажень по заданим координатам вектора зусилля, що діє на сферичну опору.

Вибір здійснюється послідовним перебором всіх компонент просторової матриці. Для напрямку дії зусилля, який задається координатами $\varphi T, \theta T$ (див. рис.10), знаходиться найближчий напрямок із матриці реалізацій координат вектора навантажень. Умова наявності найближчого напрямку встановлюється у вигляді

$$(\varphi_{Ri} - \varphi T)^2 + (\theta_{Ri} - \theta T)^2 \leq \Delta^2,$$

де Δ - деяка невелика кутова величина ($\Delta=0,02..0,05$).

Найближчий напрямок знаходиться шляхом перебору стохастичних матриць координат. Для цього застосовується логічна процедура наступного виду

$$ITR := \begin{cases} IT \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 1..10000 \\ ITR \leftarrow i \text{ if } (MR\varphi_{ei} - \varphi T)^2 + 1 \cdot (MR\theta_{ei} - \theta T)^2 \leq 0.001 \end{cases}$$

В результаті обчислень за даною схемою визначається ряд точок, які є найближчими до заданих значень φT і θT . Остання точка ($i=ITR$) приймається в якості найбільш близькою до заданих координат.

Одержаний індекс точки ITR визначає стовпець просторової матриці навантажень і відповідного йому стовпця просторової матриці, що описує проєкції вектора переміщень (рис. 11).

$\theta T=0,25$ $\phi T=1$	F, Н	➔	E, мкм
	-1,205		0,22
	-1,848		0,335
	-17,822		0,916

Рисунок 11 – Приклад розрахунків стовпця просторової матриці вектора переміщень сфери E по вектору стовпцю просторової матриці вектора навантажень F в сферичній опорі

Розроблена процедура дозволяє знайти силові характеристики регульованої сферичної опори у всьому можливому діапазоні куткових положень рухомої сфери.

Висновки:

1. Розроблена безконтактна регульована сферична опора забезпечує гнучке регулювання її центрального положення із забезпеченням високої точності та стабільності положення рухомих частин опори.

2. Найбільш доцільно здійснювати регулювання положення опори гідродинамічним запиранням потоків на виході щілини аеростатичних чи гідростатичних підшипників, що є опорними вузлами сферичної опори.

3. Силова характеристика кожного опорного вузла є суттєво нелінійною і описана набором кубічних парабол, що описують несучу здатність опорного вузла в залежності від зміщення сфери та тиску в соплових пристроях, які формують запираючі потоки.

4. Загальні характеристики жорсткості допускають аналітичний опис у вигляді залежності вектора опорної реакції від вектора переміщень рухомої сфери.

5. Для розв'язку оберненої задачі доцільно застосувати ітераційну схему розрахунків на основі формування масиву випадкових просторових переміщень сфери та відповідних їм векторів опорних реакцій і вибору відповідної реалізації випадкового вектора.

6. Як напрямок подальших досліджень рекомендується визначення динамічних властивостей опори із визначенням параметрів її вібруємісткості.

Список літератури

1. Крижанівський В.А., Кузнецов Ю.М., Валявський І.В., Скляр Р.А. Технологічне обладнання з паралельною кінематикою. Кіровоград, 2004. – 449 с.
2. Валявський І.А., Крижанівський В.А. Тенденції розвитку верстатів паралельної структури// Вісник Сумського державного університету. – 2003 - №2(48). – С. 18-22.
3. Самі (Мох'д Амін) Мох'д Іхміш. Підвищення статичної та динамічної точності просторових механізмів паралельної кінематики із сферичними опорами. Дис. Канд. техн. наук. – Київ, НТУУ “КПІ”, 2005. – 224 с.
4. Решетов Д.Н. Детали и механизмы металлорежущих станков. Т. 2. – М.: Машиностроение, 1972. – 520 с.
5. Шиманович М.А. Безконтактные опоры с внешним источником давления смазочной среды. – Станки и инструменты № 6, 1987.– С. 16-18.

В статье рассмотрена конструкция бесконтактной регулируемой сферической опоры жидкостного трения. Разработана методика расчета рабочих процессов, которые происходят в опоре. Определены параметры жесткости и силовые характеристики опоры

Construction of the beskontaktnoy managed spherical support of liquid friction is considered in the article. The method of calculation of working processes which take place in support is developed. Parameters are certain inflexibilities and power descriptions of support

Одержано 15.11.06