

ГІДРОСТАТИЧНИЙ СФЕРИЧНИЙ ОПОРНИЙ ВУЗОЛ ПОВОРОТНОГО СТОЛА ІЗ СТРУМЕНЕВИМ ПРИВОДОМ МІКРОПЕРЕМІЩЕНЬ

Розроблено схемне і конструктивне рішення опорного вузла поворотного стола, обґрунтовано метод струменевого регулювання положення сфери, проведені дослідження гідродинамічних процесів у гідростатичних опорах із струменевим регулюванням. Визначено силові характеристики регульованого сферичного опорного вузла в цілому. Підтверджена можливість конструктивної реалізації регульованого сферичного гідростатичного опорного вузла, який забезпечує сприйняття статичних зусиль до 5кН при стабільності положення сфери в межах 0,1...0,4 мкм та регулювання положення сфери в межах $\pm 0,1$ мкм.

Ключові слова: сфера, вузол, гідростатика, регулювання, струмінь, характеристика

Вступ. Розробка систем приводів високої точності є актуальною науковою проблемою. Проблема в загальному вигляді полягає у розробці конструктивних заходів по підвищенню точності просторової системи приводів. Проблема пов'язана із важливими науковими і практичними завданнями створення прогресивного технологічного обладнання.

В останніх дослідженнях і публікаціях наведено результати розробки прогресивного обладнання на основі просторових систем приводів з паралельними кінематичними зв'язками [1]. В публікаціях наведені схемні рішення та описана елементна база просторових систем приводів [2]. Вказано, що основним вузлом просторових систем приводів є сферичні шарніри [3]. Наведені в літературних джерелах дані [4,5] підтверджують ефективність використання гідростатичних опор в просторових системах приводів.

Із аналізу літературних джерел випливає, що невирішеною раніше частиною загальної проблеми є розробка регульованого сферичного гідростатичного опорного вузла.

Мета роботи. Метою досліджень викладених в даній статті є розробка регульованого сферичного гідростатичного опорного вузла на якому встановлено стіл технологічного обладнання

Виклад основного матеріалу досліджень. Гідростатичний сферичний опорний вузол поворотного стола використано у верстаті з паралельними кінематичними зв'язками. Верстат має високо обертовий шпindel 1 встановлений на платформі 2, яка має шість штанг 3 змінної довжини (рис. 1).

Поворотний стіл 4 встановлений на сферичному опорному вузлі 5 і має просторову систему приводів 6.

Сферичний опорний вузол призначено для повороту стола в просторі в кутовому діапазоні $\pm 22,5^\circ$. Конструкція регульованого опорного вузла забезпечує мікропереміщення стола в діапазоні $\pm 0,1$ мм. Це дозволяє суттєвим чином підвищити точність позиціонування інструменту відносно стола.

Розроблений регульований сферичний опорний вузол має нерухомий корпус 1 (рис. 2). З корпусом з'єднана кришка 2, яка має гвинтові приводи 3,4 для її установочного просторового переміщення відносно корпусу Корпус і кришка

мають порожнину у вигляді ділянок точних сферичних поверхонь, які охоплюють рухома сферу 5.

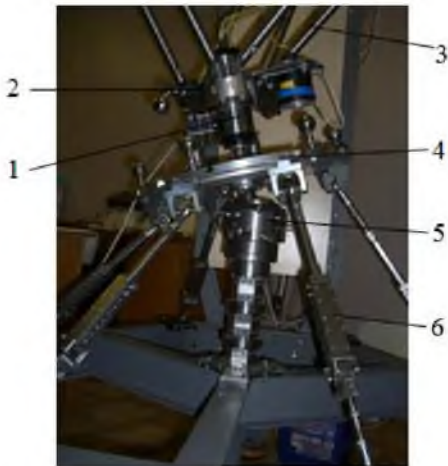


Рис. 1 – Верстат паралельної кінематики з поворотним столом встановленим на сферичному гідростатичному опорному вузлі

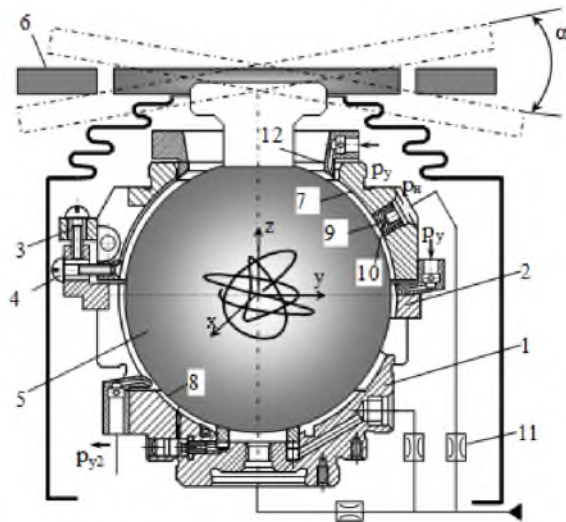


Рис. 2 – Принципова схема сферичного гідростатичного опорного вузла, який забезпечує додаткові мікропереміщення стола

Рухома сфера з'єднана із столом 6, який має зовнішні приводи для зміни його просторового положення. Рухома сфера встановлена в корпусі і кришці на гідростатичних опорах. Опори 7, 8 розташовані регулярним чином навколо рухомої сфери. Опори мають кармани 9, в які через дроселі 10, 11 подається робоче середовище.

Опори мають по своїй периферії систему соплових пристроїв, які виконані в колекторі 12, які служать для гідродинамічного запирання щілини на виході гідростатичної опори [7]. Сферичний опорний вузол реалізовано з використанням сучасних методів технології машинобудування. Корпус 1 і кришка 2 мають ділянки сферичних поверхонь у вигляді сферичного пояса 3 та трьох сферичних секторів 4 (рис. 3).

Рухома сфера 5 опорного вузла виконана збірною. Вона має дві окремі деталі із точними сферичними поверхнями 6 і 7. Дані сферичні поверхні виконані на верхній і нижній половинах рухомої сфери та узгоджені між собою при збиранні, утворюючи одну точну сферичну поверхню. Забезпечення точності даної поверхні здійснюється підгонкою базуючих і центруючих поверхонь в з'єднанні верхньої і нижньої половин рухомої сфери.



Рис. 3 – Основні деталі виготовленого опорного вузла та ділянки точних сферичних поверхонь деталей

Сопла для струменевого регулювання положення сфери та комунікації виконані в спеціальному колекторі виготовленому методом лазерної стереолітографії (рис. 4, а, б, в).

Сопла мають криволінійні канали, а вісі вихідних отворів розташовані під гострим кутом γ до поверхні сфери (рис. 4, б).

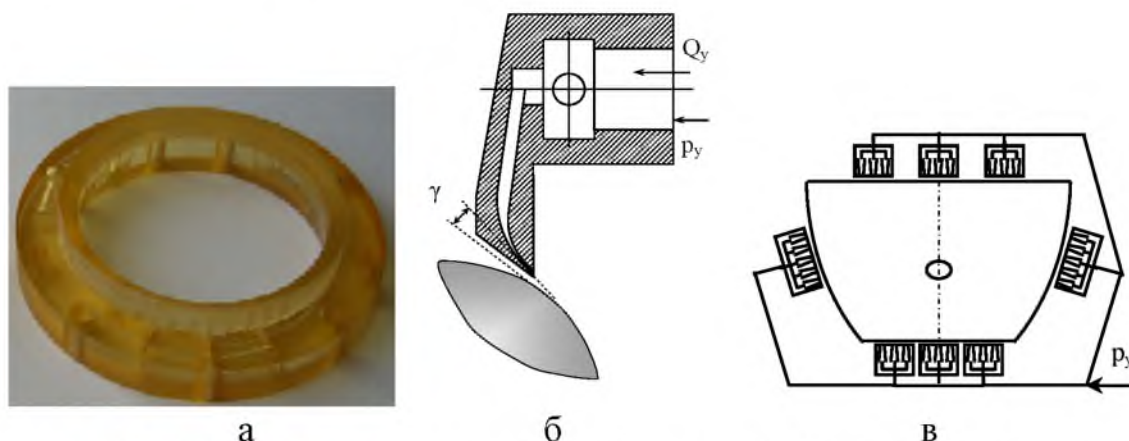


Рис. 4 – Струменева система регулювання реакції гідростатичної опори: а – колектор, в якому виконана система комунікацій, б - конфігурація соплового пристрою; в - схема розташування сопел по периферії сферичного сектора

При підводі рідини під тиском p_H з витратою Q до опори в щілині утвореній сферичним сектором та сферою на ділянці АВ формується трапецієвидна [6] епюра тиску p_{S0} (рис. 5, а).

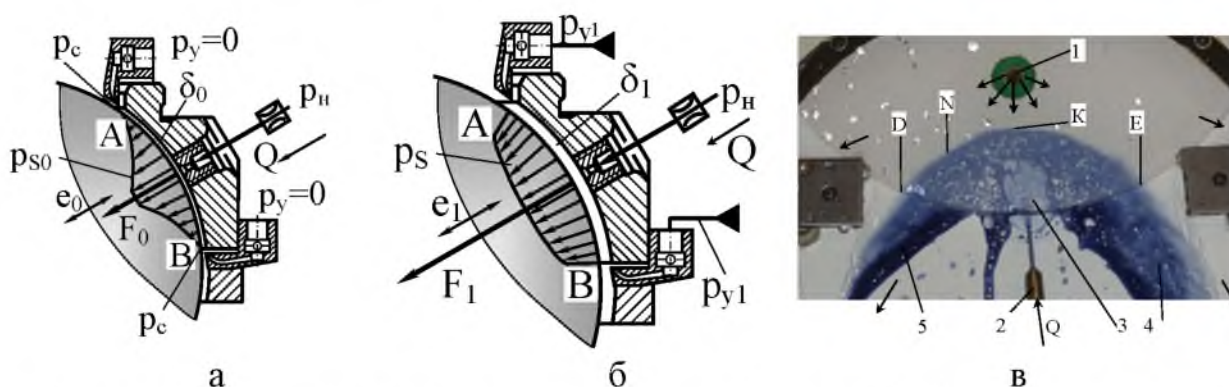


Рис. 5 – Зміна епюр тиску та навантаження в перетині щілини опори при попаданні в щілину струменів робочого середовища: а – епюра тиску при відсутності керуючих струменів; б – епюра тиску при гідродинамічному запиранні щілини; в - фото візуалізованої течії в щілині макета гідростатичної опори

При цьому встановлюється деякий рівноважний зазор δ_0 та сумарне зусилля тиску в опорі F_0 . При подачі робочого середовища під тиском p_{y1} в сопловій пристрої в перерізі щілини (точки А, В) формується область підвищеного тиску (рис. 5, б). Епюра тиску в щілині буде залежати від тиску на виході щілини. Гідродинамічне запирання виходу щілини підвищує тиск p_c на ділянках А і В та робить епюру тиску p_s більш опуклою. При цьому збільшується опорна реакція F_1 та величина зазору δ_1 .

Для встановлення особливостей гідродинамічних процесів у щілині гідростатичної опори проведені спеціальні теоретичні та експериментальні дослідження. Експериментальні дослідження проведені на прозорому макеті гідростатичної опори виконаному в масштабі 10:1. При цьому рідина, яка витікає із сопла і попадає в щілину була підфарбована. В результаті досліджена форма і глибина проникнення струменя в щілину (рис. 5, в).

Рідина до щілини в макеті опори підводиться через отвір 1. Керуючий струмінь формується в соплі 2 і натікає на поверхню опори утворюючи вхідний потік 3. Рідина, що підводиться до сопла підфарбована тому вхідний потік 3 і вихідні потоки 4, 5 мають інший колір ніж прозора рідина, що витікає із отвору 1. Форма області яку займає керуючий струмінь (лінія ДКЕ) в щілині опори відповідає параболі, форма якої залежить від витрати рідини Q в сопловому пристрої.

Теоретичні дослідження течії рідини в щілині, в яку втікає пристінний струмінь рідини, проведені методом ламінарної аналогії [8]. Згідно даного методу лінії течії повільного руху в'язкої течії в щілині співпадають із лініями течії плоскої потенціальної течії ідеальної рідини.

Рідина до щілини гідростатичної опори підводиться через отвір. В опорі наявний ряд керуючих струменів розташованих по периферії щілини. Тому течія рідини в щілині визначена як суперпозиція n+1 джерел з витратами Q_k , де n – загальне число керуючих струменів. При цьому функція течії буде визначена залежністю [9]:

$$\psi_3 = \sum_{k=0}^n \frac{Q_k}{2\pi} \operatorname{arctg} \left(\frac{y - y_k}{x - x_k} \right). \quad (1)$$

Контур L периферії щілини обмежує область W. Координати отвору підводу рідини x_0, y_0 знаходиться в центральній частині області W, а точки розташування джерел (x_k, y_k) $k=1,2,..,n$ знаходяться на контурі L.

Проекції середніх швидкостей частинок рідини визначені шляхом диференціювання функції течії [9] визначеній формулою (1) і складають:

$$V_x = \sum_{k=0}^n \frac{Q_k}{2\pi} \cdot \frac{(x - x_k)}{[(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2]}, \quad V_y = \sum_{k=0}^n \frac{Q_k}{2\pi} \cdot \frac{(y - y_k)}{[(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2]}. \quad (2)$$

Одержані залежності (2) визначають поле середніх швидкостей в щілині гідростатичної опори. Характерною областю течії в щілині є критична точка взаємодії струменя із основним потоком. Розрахункові профілі проекцій швидкостей в околиці критичної точки мають особливість (рис. 6, а, б).

Струмені формуються в соплах М. На виході сопл формуються круглі струмені, які під гострим кутом попадають на рухому поверхню s сфери (рис. 6). При взаємодії круглого струменя із плоскою поверхнею утворюється струмінь С прямокутного перетину (перетини П1, П2). В прямокутному перетині профіль швидкостей струменя близький до рівномірного із утворенням граничного шару на стінці s. При розповсюдженні прямокутного струменя вздовж стінки сфери він деформується і товщина граничного шару біля стінки збільшується. Тому в перетині П2 прямокутний струмінь має згладжений профіль швидкостей.

Взаємодія пристінного струменя із входом в щілину супроводжується

утворенням витікаючого потоку V . Звичайно він розповсюджується вздовж торця щілини T . Якщо розмір щілини δ більше розміру струменя C в 1.5 і більше разів, витікаючий потік буде направлений протилежно пристінному струменю [6].

На деякій відстані від торця (перетин Π_3) у щілині встановлюється течія рідини з асиметричним розподілом швидкостей. При подальшому розповсюдженні струменя в щілині профіль швидкостей вирівнюється і в деякому перетині (перетин Π_4) профіль швидкостей становиться близьким до параболічного. Далі вниз по течії параболічний профіль зберігається, але значення швидкостей зменшуються і в деякому перетині набувають значень, близьких до нуля (перетин Π_5). Лінія розмежування течії (перетин Π_5) може набувати криволінійної форми або пульсувати.

В щілині регульованої опори формується течія рідини із прямими і зворотніми потоками. Прямі потоки B_1, B_2 (рис. 6, б) виникають при витіканні робочої рідини із щілини опори. Керуючий струмінь формує зворотній потік B_0 . Лінія течії N розмежує прямі і зворотні потоки. Фактично зворотній потік B_0 закриває вихідний перетин частини щілини.

При відсутності струменевого керування опори (рис. 5, а) характеристики опори визначаються параметрами руху рідини в щілині та підвідних каналах. Перепад тиску по довжині щілини описується залежністю [10]:

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

де p – тиск в кармані; μ – динамічна в'язкість робочого середовища; L – середня довжина щілини; b – довжина периметра опорного елемента; δ – зазор між рухомими деталями опори; Q – загальна витрата робочого середовища; p_c – тиск на виході щілини. При відсутності керування $p_c=0$.

Характеристика течії рідини через дросель прийнята лінійною

$$p_H - p = RQ, \quad (4)$$

де p_H – тиск рідини на вході в дросель; R – гідравлічний опір дроселя.

Об'єднуючи (3) і (4), визначимо тиск в кармані опори:

$$p = p_H / \left(1 + \frac{b\delta^3 R}{12\mu L} \right). \quad (5)$$

Рівняння рівноваги сил в гідростатичній опорі запишемо у вигляді:

$$F = p \cdot S_k + S_3 / 2 \cdot p, \quad (6)$$

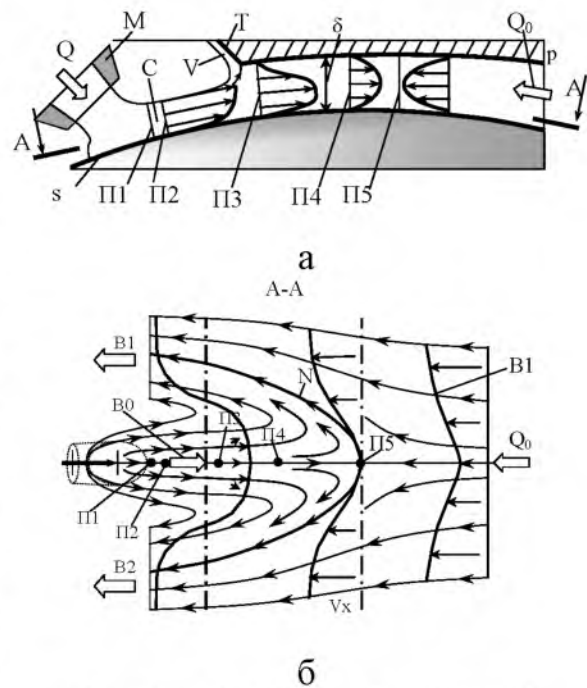


Рис. 6 – Схема течії в щілині гідростатичної опори: а – схема течії в повздовжньому перетині щілини; б – схема течії в середині щілини

де S_k - площа кармана; S_s - площа поверхонь, які утворюють щілину.

Підставивши в формулу (6) значення тиску (5), одержимо силову характеристику гідростатичної опори без керування у вигляді:

$$F = p_H \left(S_k + \frac{1}{2} S_s \right) / \left(1 + \frac{b\delta^3 R}{12\mu L} \right). \quad (7)$$

Коли керуючий струмінь рідини проникає в щілину, в ній формується течія рідини із критичною точкою К (рис. 7). Положення критичної точки залежить від співвідношення тисків p і p_y . Введено припущення, що глибина проникнення струменя в щілину L_c є малою у порівнянні з довжиною (L) щілини.

Рівняння імпульсів для контрольного об'єму, обмеженого поверхнями σ_1 та σ_2 в проекціях на вісь струменя має вигляд [9]:

$$p_c \cdot \sigma_1 + \rho V_1^2 \sigma_1 = \sum_{i=1}^n (J_{yi} + J_{yi} \sin \alpha_i) + \rho V_2^2 \sigma_2 + 2\tau \cdot S_p, \quad (8)$$

де p_c - тиск в першому перетині; σ_1, σ_2 - площі першого та другого перетинів; ρ - густина середовища; V_1, V_2 - швидкості в перетинах; J_{yi} - імпульс i -го струменя; n - число струменів; α - кут зворотнього потоку; τ - дотичне напруження на стінках щілини; S_p - площа поверхонь щілини

Із рівняння нерозривності в першому наближенні випливає:

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

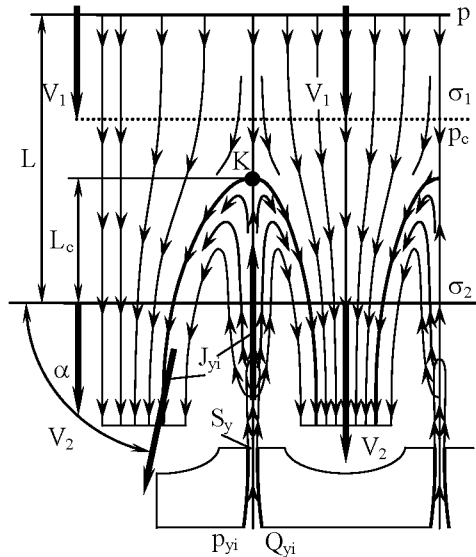


Рис. 7 – Схема течії рідини в щілині при струменевому регулюванні

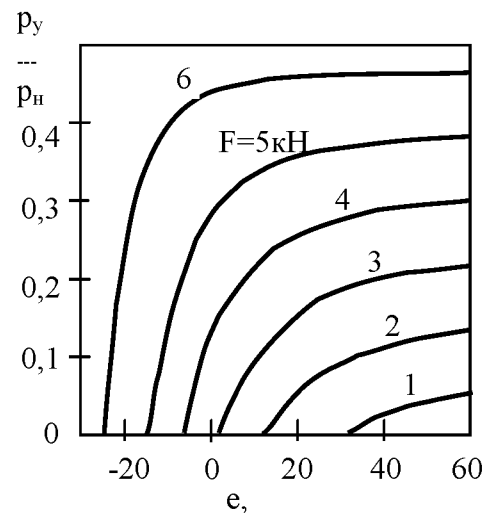


Рис. 8 – Регульовальна характеристика опори

Зворотня течія, що формується при розповсюдженні струменя в зустрічному потоці, як правило, має кут розповсюдження $\alpha \approx \pi/2$. Не враховуючи дії сил тертя, із рівняння імпульсів (8) одержимо

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

Імпульс струменя визначиться через значення тиску на вході в сопло:

$$J_{yi} = \rho S_y V_{yi}^2 \cos \gamma = \rho \frac{Q_{yi}^2 \cos \gamma}{S_y} = \rho \frac{\mu_c^2}{S_y} \cdot \frac{2}{\rho} \cdot S_y^2 p_{yi} \cos \gamma = 2 \mu_c^2 S_y p_{yi} \cos \gamma, \quad (9)$$

де μ_c - коефіцієнт витрати сопла; S_y - площа перетину сопла; p_{yi} - тиск на вході в сопло з номером i ; γ - кут між площиною опори і віссю сопла.

Враховуючи, що площа перетину щілини $\sigma_1 = b \cdot \delta$, із (8) і (9) держимо значення тиску у вихідному перерізі щілини у вигляді:

$$p_c = \frac{4 \sum_{i=1}^n \mu_c^2 S_y p_{yi} \cos \gamma}{b \delta}. \quad (10)$$

Відповідно тиск в кармані гідростатичної опори визначиться із формули (3) при підстановці значення тиску p_c на виході щілини із формули (10). Остаточний тиск:

$$p = \frac{12 \mu L Q}{b \delta^3} + \frac{4 \sum_{i=1}^n \mu_c^2 S_y p_{yi} \cos \gamma}{b \delta}. \quad (11)$$

Об'єднуючи дану залежність із характеристикою дроселя (4) та рівнянням рівноваги сил (8), знайдемо силову характеристику опори:

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

Характеристика (12) є суттєво нелінійною (рис. 8). Рациональні значення тиску керування складають $p_y \approx 0.2 \dots 0.4 p_H$. Одержана характеристика є основою для визначення характеристик регульованого сферичного опорного вузла в цілому (рис. 9).

Всього гідростатичний сферичний опорний вузол має шість регульованих і одну нерегульовану (1П) гідростатичну опору. Три з регульованих опори 1В, 2В, 3В утворюють верхній несучий пояс, а три регульовані опори 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_c) і визначається залежністю:

$$\delta = \delta_0 - |\vec{E}| \cdot \cos \theta_c, \quad (13)$$

де δ_0 - початковий зазор; \vec{E} - вектор переміщення сфери; θ_c - кут між віссю z і точками на сфері, де визначається зазор.

В проєкціях на осі координат x, y, z рівняння рівноваги

$$F_{3x} + \sum_{i=1}^N F_{ix} = 0, F_{3y} + \sum_{i=1}^N F_{iy} = 0, F_{3z} + \sum_{i=1}^N F_{iz} = 0. \quad (14)$$

де F_{ix}, F_{iy}, F_{iz} - проєкції зусиль i -ї гідростатичної опори; $N=7$ - число опор.

Зусилля в кожній опорі відповідно формули (12) залежить від величини зазору, який в свою чергу визначається через вектор переміщень згідно формули (13). Відповідно зусилля в кожній гідростатичній опорі:

$$\vec{F}_i = \vec{F}_i(\delta_i), \quad \delta_i = \delta_i(e_x, e_y, e_z), \quad (15)$$

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

Підставляючи в систему рівнянь (14) значення силових характеристик кожної опоривідповідних формулі (12) для зазору (13) визначимо зусилля \vec{F}_3 , яке відповідає вектору переміщення сфери \vec{E} (рис.10).

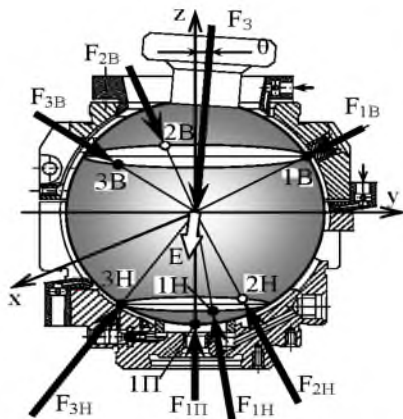


Рис. 9 – Схема дії реакції окремих гідростатичних опор у сферичному опорному вузлі

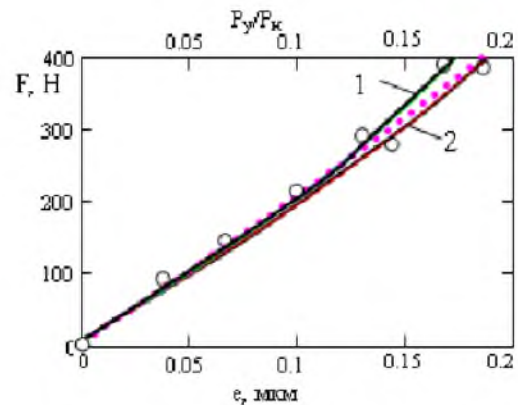


Рис. 10 – Залежність опорної реакції від переміщення сфери: крива 1 - $\theta=10^\circ$, крива 2 - $\theta=20^\circ$; точки експеримент

Висновки. Підтверджена можливість конструктивної реалізації регульованого сферичного гідростатичного опорного вузла, який забезпечує сприйняття статичних зусиль до 5кН при стабільності положення сфери в межах 0,1...0,4 мкм та регулювання положення сфери в межах $\pm 0,1$ мкм.

Як напрямок подальших досліджень рекомендується дослідити динамічні характеристики регульованого сферичного гідростатичного опорного вузла та розробити спеціальну мехатронну систему його керування.

Список літератури: 1. Рыбак, Л. А. Эффективные методы решения задач кинематики и динамики робота-станка параллельной структуры [Текст] / Рыбак, Л. А., Ержуков, В. В., Чичварин, А. В. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011. – 148 с. 2. Merlet, J. P. Parallel Robots. Solid Mechanics and Applications [Text] / J. P. Merlet. – Berlin: Springer, 2006. – 394 p. 3. Крижанівський, В. А. Технологічне обладнання з паралельною кінематикою: навчальний посібник для ВНЗ [Текст] / Крижанівський, В. А., Кузнєцов, Ю. М., Валявський, І. А., Склярів, Р. А. – Кіровоград, 2004. – 449 с. 4. Струтинський, В. Б. Математичне моделювання стохастичних процесів у системах приводів: Монографія [Текст] / Струтинський, В. Б., Колот, О. В. – Краматорськ: ЗАТ “Тираж-51”, 2005. – 530 с. 5. Яхно, О. М. Система визначення точного положення регульованої гідростатичної сферичної опори [Текст] / Яхно, О. М., Струтинський, С. В. – К.: Вістник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут», серія Машинобудування. – №52. – Київ, 2008. – С. 26-34. 6. Струтинський, С. В. Просторові системи приводів: монографія [Текст] / Струтинський, С. В., Гуржій, А. А. – К.: Педагогічна думка, 2013. – 492 с. 7. Патент України на корисну модель. МПК №31194 (2006) F16C32 / Гідростатично-аеростатичний опорний вузол [Текст] / Яхно, О. М., Струтинський, С. В. – №u200714415; заявл.20.12.2007; опубл. 25.03.2008, Бюл. №6. – 3 с. 8. Повх, И. Л. Техническая гидромеханика [Текст] / И. Л. Повх. – Л.: Машиностроение, 1969. – 524 с. 9. Лойцянский, Л. Г. Механика жидкости и газа [Текст] / Л. Г. Лойцянский. – М.: Наука, 1973. – 847 с. 10. Башта, Т. М. Машиностроительная гидравлика [Текст] / Т. М. Башта. – М.: Машиностроение, 1971. – 672 с. 11. Сигорский, В. П. Математический аппарат инженера [Текст] / В. П. Сигорский. – К.: Техніка, 1975. – 768 с.

Bibliography (transliterated): 1. Rybak, L. A., Erzhukov, V. V., Chichvarkin, A. V. (2011). Effective methods for solving problems of kinematics and dynamics of robot-machine parallel structure. Moscow : Fizmathlit, P. 148 c. ISBN978-5-9221-1296-3. 2. Merlet, J. P. (2006). Parallel Robots. Solid mechanics and applications., Berlin: Springer, 394. 3. Krizhanivskij, V. A., Kuznecov, Y. M., Valyavskij, I. A., Sklyarov, R. A. (2004). Technological equipment with parallel kinematics: textbook for universities. Edited by Kuznetsov, Y. M., Kirovograd, 449. 4. Strutynskiy, V. B., Kolot, O. V (2005). Mathematical modeling of stochastic processes in systems of drives. Monograph. Kramatorsk: "Tirazh -51", 530. 5. Jachno, O. M., Strutynskiy, S. V. (2008). The system for determining the exact position of the adjustable hydrostatic spherical bearing. Bulletin of National technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", a series of Engineering, Kiev, 52, 26-34. 6. Strutynskiy, S. V. (2013). Spatial drive systems: Monograph. Strytynskij S.V. Gourzhiy A. A., Kiev: Pedagogical thought, 492. 7. Patent of Ukraine for useful model (2006). MPK No 31194 F16C32. Tostation-aerostation anchor node. Jachno, O. M., Strutynskiy, S. V. No. u200714415; Appl.20.12.2007; publ. 25.03.2008, 6, 3. 8. Povkh, I. L. (1969). Technical hydromechanics. Lviv: Engineering, 524. 9. Loitsyansky, L. (1973). Mechanics of liquid and gas. Moscow: Nauka, 847. 10. Basta, T. M. (1971). Engineering hydraulics. Moscow: Mashinostroenie, 672. 11. Sigorskij, B. N. (1975). Mathematical apparatus engineer. Kiev: Machinery, 768.

Надійшла (received) 17.12.2014

УДК 666.1.031

В. С. ЦАПАР, ст. викл., НТУУ «КПІ» Київ

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПЕРІОДІВ ПЕРЕКЛЮЧЕННЯ ПАЛЬНИКІВ НА ОДНОРІДНІСТЬ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ СКЛОВАРНОЇ ПЕЧІ

Проведено дослідження залежності температурного розподілу у скловарній регенеративній печі від величини періодів роботи пальників, визначено вплив періодів переключення пальників на однорідність температурного поля у печі. Отримано значення температур у контрольних точках скловарної печі при періодах переключення пальників 20, 30 та 45 хвилин. Визначено необхідність формування критерію оптимальності переключення пальників, котрий визначатиме час переключення в залежності від значень поточних параметрів у печі та навколишнього впливу.

Ключові слова: період переключення пальників, скловарна піч, скляна тара, температурні поля.

Вступ. Велика увага на сучасному етапі розвитку промислових технологій приділяється якості готової продукції. Оптимізація витрат, вдосконалення технологій ставить все вищі і вищі вимоги до якості виробів. Зокрема, дуже чутливі до якості склотари сучасні автоматичні лінії пакування та розливу.

Значну питому вагу в товарообігу пакувальної продукції займає скляна тара. Скляною тарою називають групу скляного посуду, яка призначена для фасування, транспортування, зберігання і використання при споживанні різних продуктів. Скляна тара є незамінною для упакування багатьох харчових продуктів і напоїв.

Скло, в якості пакувальної продукції, має свої переваги:

- хімічна нейтральність забезпечує збереження харчових продуктів без суттєвих змін;
- прозорість;
- міцність та стійкість до навантажень;
- стійкість до внутрішнього тиску дає змогу випускати газовані напої та аерозольні товари;