
НАУКОВІ ОСНОВИ РОЗРОБКИ РЕГУЛЬОВАНИХ СФЕРИЧНИХ ОПОР РІДИННОГО ТЕРТЯ ДЛЯ ПРОСТОРОВИХ МЕХАНІЗМІВ

Сформулированы научные основы разработки регулируемых сферических опор жидкостного трения пространственных механизмов. Они заключаются в разработке схемных и конструктивных решений, технологическом обеспечении разработок, изучении особенностей гидродинамических процессов и расчете на их основе статистических характеристик опор. Подтверждение достоверности разработанных научных положений осуществлено экспериментальным исследованием характеристик и опытной апробацией изготовленных сферических опор пространственных механизмов.

Formulated scientific bases of development of the managed spherical supports of liquid friction of spatial mechanisms. They consist in development of scheme and structural decisions, technological providing of developments, study of features of hydrodynamic processes and calculation on their basis of statistical descriptions of supports. Validifying the developed scientific positions is carried out experimental research of descriptions and experimental approbation of the made spherical supports of spatial mechanisms.

Вступ

Прогресивне технологічне обладнання реалізується на основі просторових стержневих шарнірних механізмів. Основним вузлом механізму є сферична опора [1]. Традиційно застосовують опори карданного типу на підшипниках кочення. Перспективним є використання регульованих сферичних опор рідинного тертя.

Опори рідинного тертя мають високу точність, виключають механічні контакти деталей механізму, що суттєво знижує рівень вібрацій. Тому розробка і дослідження гідростатичних та аеростатичних регульованих сферичних опор являє собою актуальну науково-технічну проблему, що має важливе значення для розвитку техніки.

Проблема в загальному вигляді включає розробку опор рідинного тертя. В основному використовуються плоскі та циліндричні опори які використовують робочі середовища у вигляді мінеральних олив або повітря.

Розробка регульованих сферичних опор пов'язана із важливими науковими та практичними завданнями. Використання регульованих опор є основою якісного підвищення характеристик обладнання на основі просторових механізмів.

На основі аналізу останніх досліджень і публікацій [1] встановлено актуальність розробки, регульованих сферичних опор та обґрунтування їх схемних і конструктивних рішень. Наявні методи розрахунку опор рідинного тертя [2] повинні бути уточнені, враховуючи специфіку процесу регулювання [3]. До невирішеної раніше частини загальної проблеми відноситься розробка ефективних методів регулювання сферичних опор, їх конструктивна реалізація та технологічне забезпечення.

Метою досліджень є формулювання наукових основ розробки сферичних опор рідинного тертя.

Для досягнення мети поставлені і вирішені наступні задачі: розробка схемних і конструктивних рішень; вибір геометричних і технологічних параметрів опор; дослідження робочих процесів сферичних опор; розрахунок характеристик регульованих сферичних опор; експериментальне уточнення характеристик; дослідна апробація наукових основ шляхом розробки дослідних зразків сферичних опор.

Виклад основного матеріалу досліджень

1. Схемні і конструктивні рішення

Розробка схемних і конструктивних рішень регульованих сферичних опор рідинного тертя є результатом широкого кола дослідних робіт. Розроблено ряд варіантів регульованих сферичних опор. Регулювання положення рухомої сфери здійснюється різними способами: зміною взаємного положення деталей опори приводами мікропереміщень; деформуванням деталей опори спеціальними пристроями; нагріванням окремих ділянок деталей опори з метою зміни їх геометрії шляхом термодеомацій; зміною положення окремих робочих ділянок опори переміщенням спеціальних вставок; введенням або відключенням додаткових аеростатичних опор, регулюванням потоків робочого середовища; зміною термодинамічних параметрів (зокрема температури) окремих потоків робочого середовища (газу); гідродинамічним запиранням вихідних щілин опорних вузлів спеціальними струменевими системами регулювання [4, 5].

Ряд запропонованих способів регулювання наведено в розроблених схемних і конструктивних рішеннях варіантів сферичних опор. Типовий розроблений варіант аеростатичної або змішаної аеростатично-гідростатичної опори (рис.1) реалізує різні способи регулювання положення сфери.

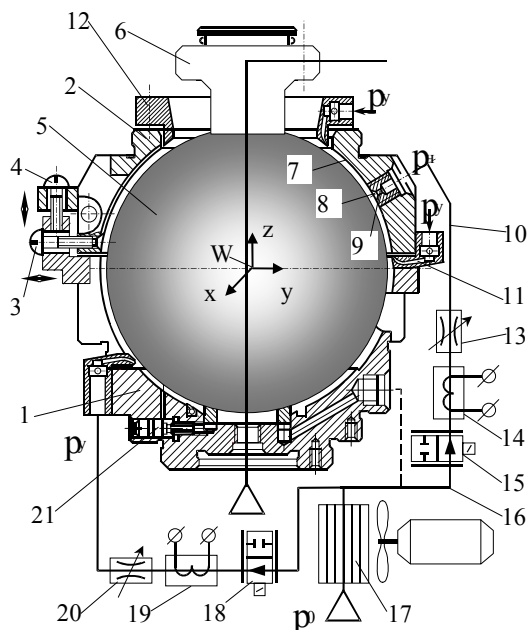


Рис. 1. Варіант схемного рішення регульованої сферичної опори

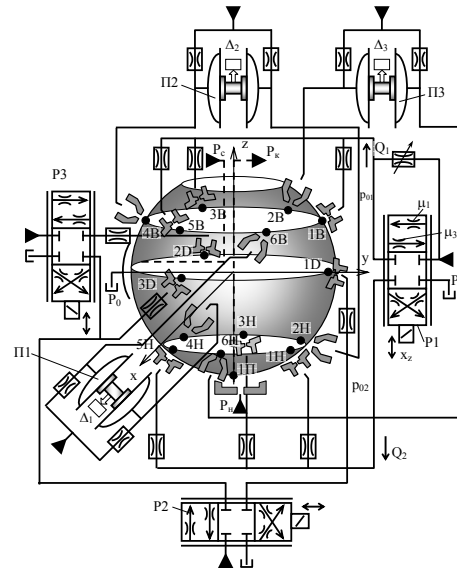


Рис. 2. Варіант гідравлічної схеми системи керування опори

Регульована сферична опора має корпус 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. Сфера з'єднана із штангою механізму 6.

Рухома сфера встановлена в корпусі і кришці на статичних опорах рідинного тертя (аеростатичних або гідростатичних). Опори 7 розташовані регулярним чином по периферії сферичної поверхні. Опори мають кармани 8, в які через нерегульовані дроселі 9 подається робоче середовище від магістралі 10.

Опори мають по своїй периферії систему соплових пристроїв 11, які служать для гідродинамічного запирання щілини на виході гідростатичного або аеростатичного опорного вузла. Соплові пристрої та система підводу робочого середовища до соплових пристроїв виконані в колекторах 12.

Сферична опора має автономну регульовальну систему живлення і керування. Регулювання потоку середовища до кармана опори здійснюється системою регульованих дроселів 13, 15 і нагрівача 14. Підвід робочого середовища до системи дроселів здійснюється від магістралі 16, в яку подається робоче середовище охолоджене в радіаторі 17. Регулювання параметрів потоків у соплових пристроях здійснюється аналогічними системами керування, що включають регульовані дроселі 18, 20 та нагрівачі 19. Конструктивне виконання регульованих дроселів 13 дозволяє виконати ручне регулювання опору

дроселі і забезпечити регулювання початкового положення рухомої сфери. Регульовані дроселі мають запірний елемент 21, який змінює площу прохідного перерізу каналу, по якому робоче середовище подається в карман опори.

Для регулювання положення сфери служить спеціальна система зміни подачі робочого середовища в кармани опор [2] (рис. 2). Регулювання потоків середовища забезпечується розподільниками Р1-Р3. Розподільник Р1 забезпечує можливість переміщення сфери по вертикалі, а розподільники Р2 і Р3 забезпечують регулювання положення сфери в горизонтальній площині.

Система регулювання положення сфери доповнена системою вимірів положення сфери. Для цього служать три пари сопл, розташованих діаметрально відносно сфери в трьох взаємно ортогональних напрямках. Пари сопл утворюють вимірювальні містки із мембранними перетворювачами П1-П3. Переміщення мембрани Δ_1 - Δ_3 пропорційні переміщенням сфери у трьох напрямках.

Запропоновані способи регулювання мають різну ефективність. Найбільш прогресивним є струменеве регулювання положення сфери. В даний час відсутні дані про схемні рішення та робочі процеси опор із струменевим регулюванням.

Для реалізації запропонованих схемних і конструктивних рішень необхідно вирішити конструкторсько-технологічні проблеми розробки сферичних опор.

2. Забезпечення геометричних і технологічних параметрів

При розробці регульованих сферичних опор виникають значні конструкторсько-технологічні проблеми. Вони пов'язані з необхідністю виконання складних криволінійних поверхонь деталей та точного спряження поверхонь. Причинами вищевказаних проблем є складність реалізації запропонованих конструктивних рішень опор.

Регульована сферична опора рідинного тертя має кілька (чотири і більше) окремих опорних елементів (під'ятників) розташованих по поверхні сфери (рис. 3).

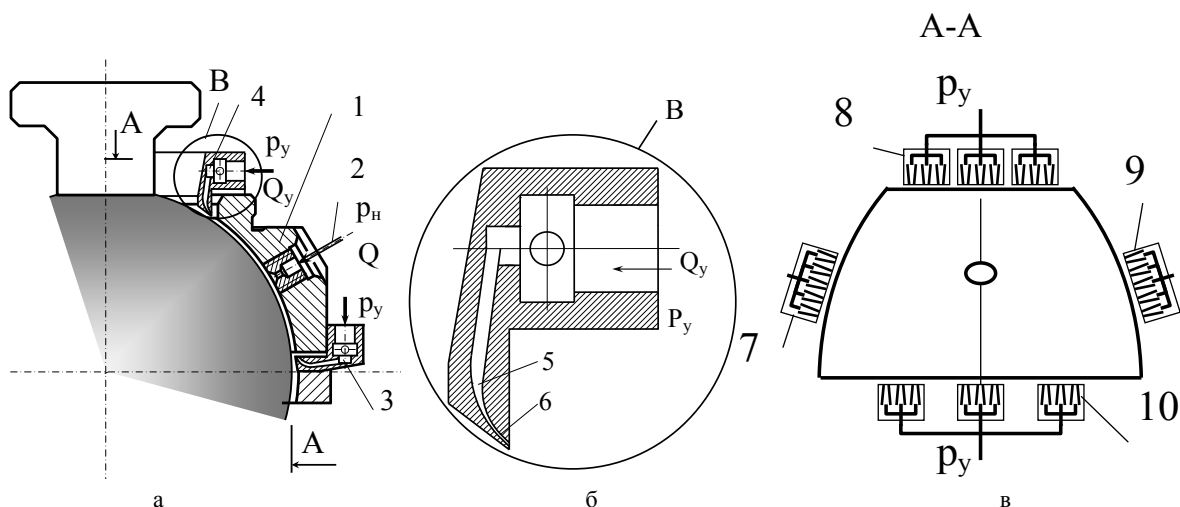


Рис. 3. Опорний елемент розташований в сферичній опорі (а) сопловий пристрій для формування струменя рідини (б) та схема розміщення соплових пристроїв по периферії опорного елемента (в)

Опорний елемент (рис. 3.а) має магістраль 2 підводу робочого середовища під тиском p_n з витратою Q . Регулювання опорної реакції здійснюється гідродинамічним запиранням щілини струменями робочого середовища [5]. Струмені формуються у мало розмірних соплових пристроях 3, 4. Кожне сопло має криволінійний канал 5 із вихідним насадком 6 (рис. 3.б). Соплові пристрої об'єднані в групи 7, 8, 9, 10 і встановлені на периферії опорного елемента (рис. 3.в). Всього кожен елемент має 28 малорозмірних сопл об'єднаних у вісім груп. Групи сопл 7, 9 розташовані по бокових краях щілини, а групи 8, 10 по верхньому і нижньому краях.

Для реалізації даного конструктивного рішення необхідно вирішити складну технічну проблему підводу робочої рідини до окремих груп сопл та формування струменів певного напрямку. Для вирішення даної проблеми гідравлічні комунікації та сопла виконані криволінійними. Виконання

криволінійних каналів потребує застосування сучасних інтегрованих технологій обробки матеріалів. Криволінійні гідравлічні канали запропоновано виконати в спеціальних колекторах виготовлених методом лазерної стерео літографії. Розроблено конструкцію колектора і виготовлено технічну документацію у вигляді твердо тільної моделі. Використані при розробці колектора наукові положення апробовані шляхом виготовлення і дослідної перевірки колектора із системою комунікацій (рис.4).

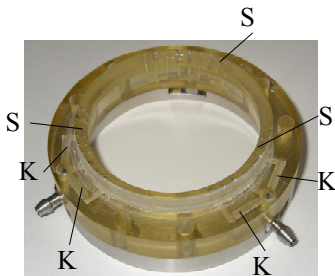


Рис. 4. Колектор, в якому виконана система криволінійних каналів К та 27 сопл S

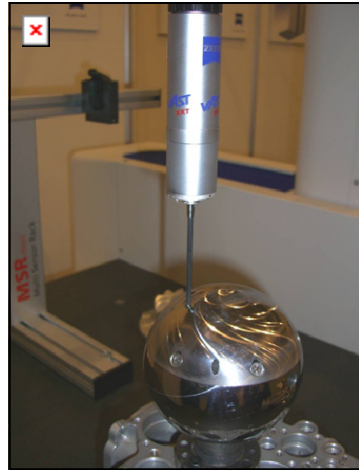


Рис. 5. Визначення фактичної геометрії сфери на вимірвальній машині

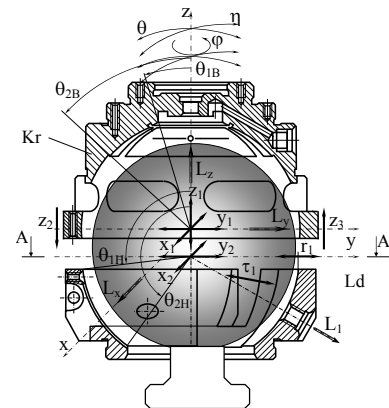


Рис. 6. Зміна взаємного положення корпусу і кришки опори з метою вибору рівномірного радіального зазору

Основною технологічною проблемою створення сферичних опор рідинного тертя є виготовлення точних сферичних поверхонь. Регламентовані відхилення від сферичності поверхонь опори не повинні перевищувати 1...8 мкм при діаметрі сфери 30...120 мм. Відхилення від сферичності внутрішніх сферичних поверхонь регламентується допуском 12...17 мкм. Поверхні повинні мати високу твердість 58...62 HRC та середньоарифметичне відхилення мікропрофіля Ra 0.08...0.16.

На основі проведених досліджень запропоновано проводити чистову обробку сферичних поверхонь крайкою шліфувального круга при забезпеченні необхідного кута перетину вісі обертання круга та вісі обертання заготовки сферичної поверхні.

Одержані сферичні поверхні досліджено шляхом вимірів. Виміри здійснено на 5-ти координатній вимірвальній машині (рис. 5). Вимірювались положення окремих точок оброблених поверхонь на робочих ділянках сфери. Одержані масиви вимірів піддані комп'ютерній обробці. В результаті знайдено фактичний номінальний діаметр сфери та розташування центра сфери відносно базової поверхні.

Вимірне відхилення діаметра сфери від номінального значення (120,5242 мм) знаходиться в межах -2,5...+3,5 мкм. Відхилення від сферичності не перевищує 6 мкм.

Середньоарифметичне відхилення мікропрофіля сфери складає $Ra=0.03...0.1$ мкм. Максимальна висота мікронерівностей $R_{max}=0.1...0.8$ мкм. Середній період хвилястості мікропрофіля $Sm=2...18$ мкм.

Важливою технологічною проблемою розробки сферичної опори є забезпечення рівномірного зазору між сферою і охоплюючими її сферичними поверхнями. Для вирішення вказаної проблеми передбачені пристрої регулювання та спеціальна методика вимірів і регулювання зазору. Регулювання зазору здійснюється взаємним зміщенням корпусу і кришки опори. (рис. 6). Виміри діаметрального зазору здійснюються при переміщенні сфери в різних напрямках L .

За критерій рівномірності зазору між сферичними поверхнями прийнято мінімум суми квадратів відхилення квадрата зазору від номінального значення при зміщенні сфери в характерних напрямках.

3. Особливості гідродинамічних процесів регульованої опори

При експериментальних дослідженнях гідродинамічних процесів в опорі проведена візуалізація течії в щілині гідростатичної опори. Для візуалізації використовувались потоки рідкого середовища різного кольору. Візуалізація ліній течії чистої рідини (води) здійснена введенням в рідину невеликої

кількості (1..2%) повітря. Бульбашки повітря при фотографуванні зображуються як система рисок у своїй сукупності відповідним лініям течії рідини. Для збільшення чіткості зображення застосована рідина фарбована барвником (тушшю) різного кольору (рис. 7, а).

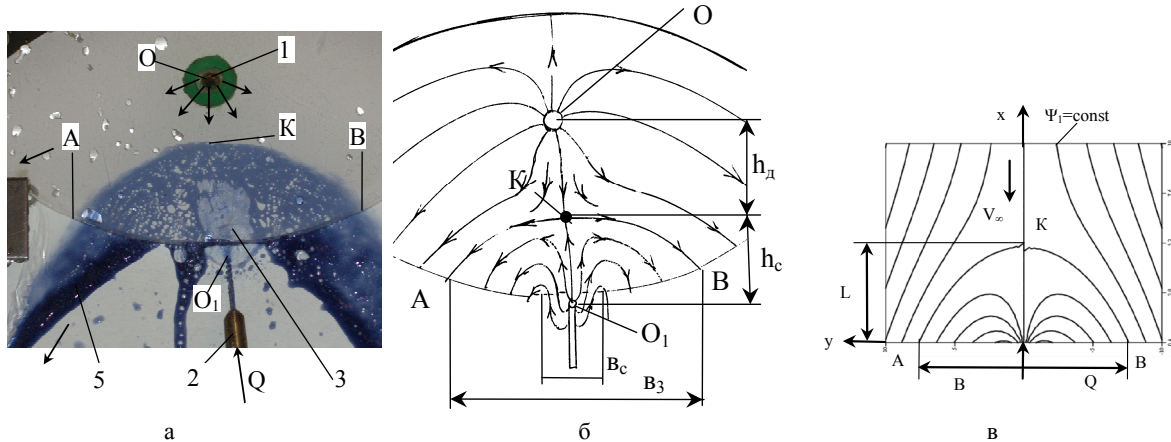


Рис. 7. Експериментально визначені фото течії (а), відповідна фото картина ліній течії (б) та розрахунок ліній течії (в) при втіканні керуючого струменя в периферійну ділянку щілини гідростатичної опори

При попаданні струменя в щілину він ежектує атмосферне повітря, що приводить до появи повітряної порожнини 3. На фото помітні потоки рідини 4 і 5, що витікають із щілини гідростатичної опори.

Рідина до щілини 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 рідина прозора, що витікає із отвору 1. На фото помітні потоки рідини 4 і 5, що витікають із щілини гідростатичної опори

По фото побудована картина ліній течії (рис. 7, б). Лінії течії будуються по слідам бульбашок повітря, що рухаються разом з рідиною. Сліди утворюють риси які відповідають лініям течії. Після з'єднання окремих рисок одержана повна картина ліній течії. Рідина, що попадає в щілину при проникненні керуючого струменя охоплює суттєву ділянку щілини у вигляді сегмента шириною B_3 і висотою h_c . На візуалізованій картині течії простежується критична точка К швидкість частинок рідини в якій дорівнює нулю. Форма граничної лінії течії KA та KB близька до параболи. Критична точка К є стійкою і простежується на багатьох фото. Нормальна лінія течії OK та O_1K близька до прямої лінії. Ширина струменя B_c який попадає в щілину складає 15..25% від ширини області B_3 .

Експериментальні дослідження течії рідини в щілині опори доповнені теоретичним розрахунком гідродинамічних параметрів течії. Розрахунки виконані на основі методу ламінарної аналогії. Функція течії осередненого руху рідини в щілині одержана у вигляді суперпозиції функцій течії п джерел (витоків) рідини

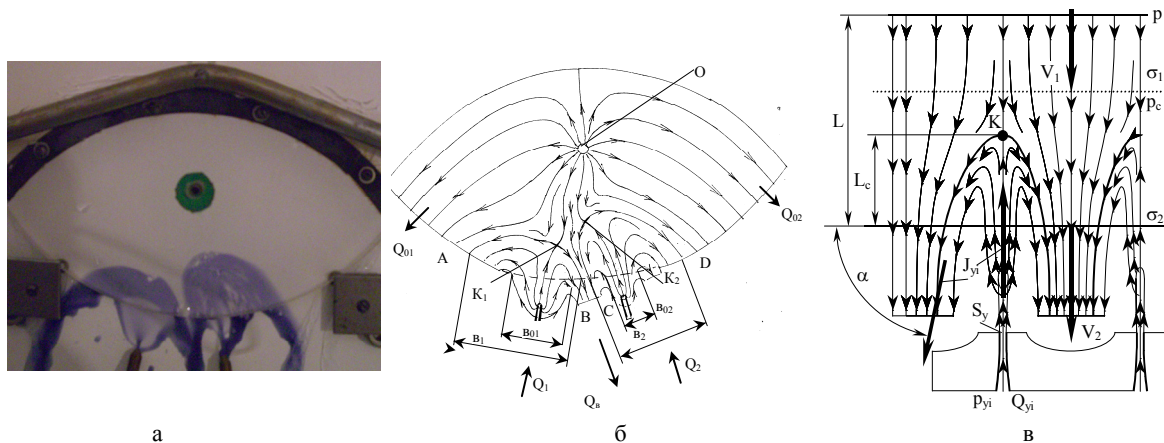


Рис. 8. Фото течії (а), відповідна фото картина ліній течії в щілині опори (б) та ідеалізована схема течії (в) при наявності двох керуючих струменів

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

де Q_k – витрата рідини з k -го джерела.

Схема течії наведена на рис. 7в відповідає наявності двох джерел. Розрахунок ліній течії кількісно і якісно відповідає експериментально визначеним лініям течії в щілині.

Дослідження течії проведені також при дії кількох керуючих струменів (рис. 8, а).

Кожен із керуючих струменів формує в щілині гідростатичної опори свою область течії обмежену лініями течії K_1A та K_1B для лівого струменя і K_2C та K_2D . Для правого струменя. Критичні точки K_1 та K_2 зміщені в напрямку одна до одної. На фото візуалізованої течії простежується область витоку рідини із щілини яка знаходиться між двома струменями. Область обмежена лініями течії OK_1B та OK_2C . Витрата рідини в області витоку зменшується при збільшенні інтенсивності керуючих струменів.

4. Характеристики регульованої сферичної опори

Проведені експериментальні і теоретичні дослідження дали можливість обґрунтувати розрахункову схему течії рідини в щілині опори [6]. Коли керуючий струмінь рідини проникає в щілину (рис. 8, в), 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.

На основі аналізу гідродинамічних процесів обґрунтована розрахункова схема течії для контрольного об'єму у вигляді частини щілини обмеженої перетинами σ_1 та σ_2 . Із рівняння імпульсів визначено тиск p в кармані опорного елемента. Об'єднуючи одержану залежність із рівнянням течії через дросель (див. рис. 3а) одержимо залежність зусилля, яке сприймає опорний елемент із гідродинамічним запиранням потоку на виході щілини.

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

Одержана силова характеристика опорного елемента (рис. 9) визначається зазором δ та величиною тиску керування p_y .

Загальна несуча здатність (реакція) регульованої сферичної опори є результатом спільної дії всіх окремих опорних елементів (рис. 10).

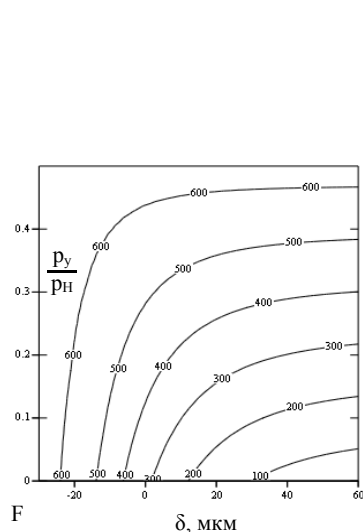


Рис. 9. Силовa характеристика опорного елемента при регулюванні

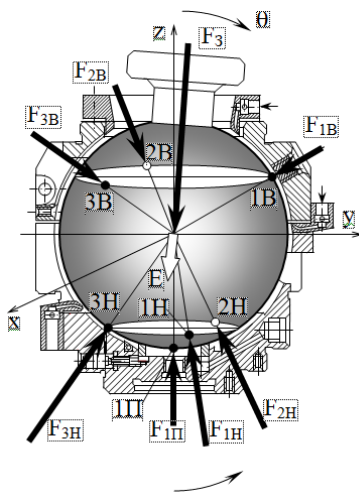


Рис. 10. Схема розташування опорних елементів в опорі

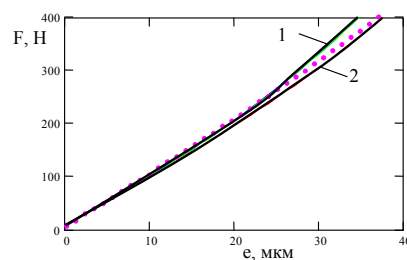


Рис. 11. Залежність модуля опорної реакції від модуля вектора переміщення сфери

Векторна сума сил, що діють на сферу дорівнює нулю. Звідси одержано залежність 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.11). Криві 1 і 2 на рисунку відповідають кутам $\theta_e = 10^\circ$ і 20° .

Результати розрахунків апроксимовані поліноміальною функцією (пунктирна крива на рис.11). Дана функція встановлена у вигляді:

$$F_3 = ae + be^3 \quad (2)$$

Де коефіцієнти a і b визначаються із умови найкращого наближення поліноміальної залежності (2) розрахунку по формулі (1) [4].

5. Експериментальне уточнення характеристик

Достовірність розрахунків характеристики за одержаними залежностями перевірена шляхом порівняння розрахунків із результатами вимірів.

Експерименти проведено по спеціальній методиці на установці, яка дозволяє здійснити знакозмінне статичне навантаження сфери. Методика вимірів полягає у наступному. Здаються всі можливі набори дискретних значень параметрів керування у вигляді тиску в групах сопел $py1_i, py2_j, py3_k$ $i, j, k=0, 1..4$. При цьому формуються таблиці значень просторової матриці (рис. 12а).

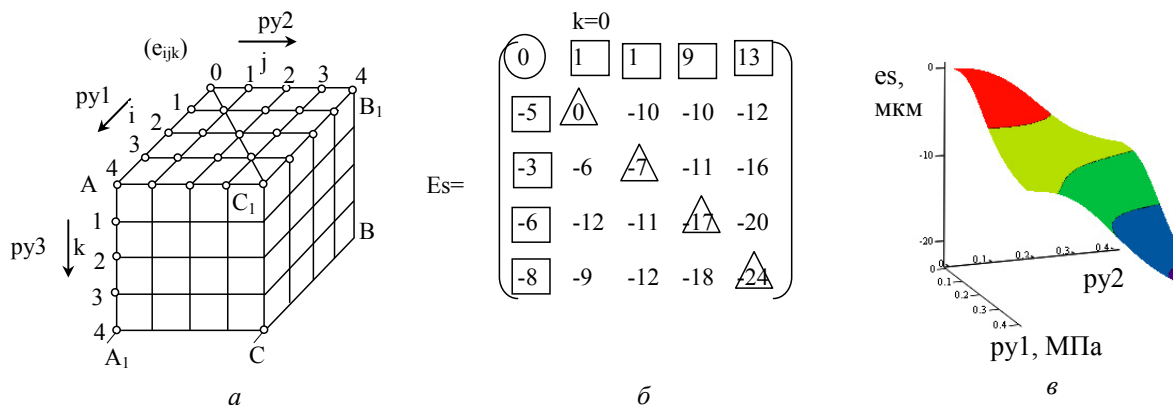


Рис. 12. Регульовальні характеристики сферичної опори у вигляді кубічної матриці(а) , зріз кубічної матриці при $py3=0$ (б) та графік характеристики, яка відповідає зрізу(в)

Значення компонент просторової (кубічної) матриці являють собою вертикальні переміщення сфери, обумовлені зміною параметрів керування $py1, py2, py3$. Матриця формується послідовно по зрізам. Наприклад, перший зріз матриці OAC_1B_1 є результатом вимірів при $py3=0$. Числові значення матриці, яка відповідає першому зрізу (рис. 12, б) визначить залежність переміщення сфери від зміни тиску $py1, py2$ в першій і другій групах сопел. Згладження компонент матриці, дає регульовальну характеристику сферичної опори в функції двох параметрів керування (рис. 12, в).

В процесі експериментальних досліджень проведено вимір повного набору статичних характеристик регульованої сферичної аеростатичної опори. Підтверджена відповідність розрахункових силових характеристик експериментальним даним. Значну увагу приділено експериментальним дослідженням стабільності характеристик. Встановлено наявність незначної (в межах 5%) полоси розсіяння характеристик у вигляді петлі гістерезису.

6. Дослідна апробація розроблених наукових основ

Виконані дослідження в напрямку створення наукових основ розробки регульованих сферичних опор рідинного тертя апробовані при розробці дослідного зразка просторового механізму [7]. Розроблена сферична опора має сферу 1 діаметром 34.995 ± 0.001 мм, виготовлену із карбіда бора (рис. 13).

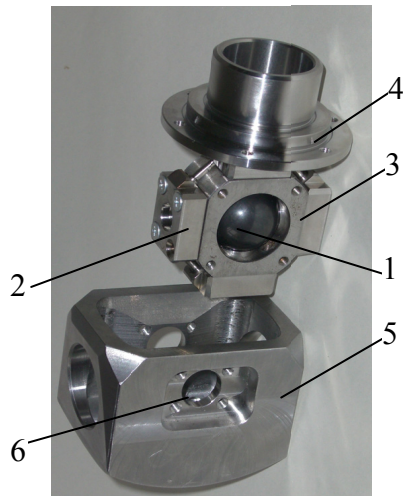


Рис. 13. Основні вузли виготовленого дослідного зразка сферична опора

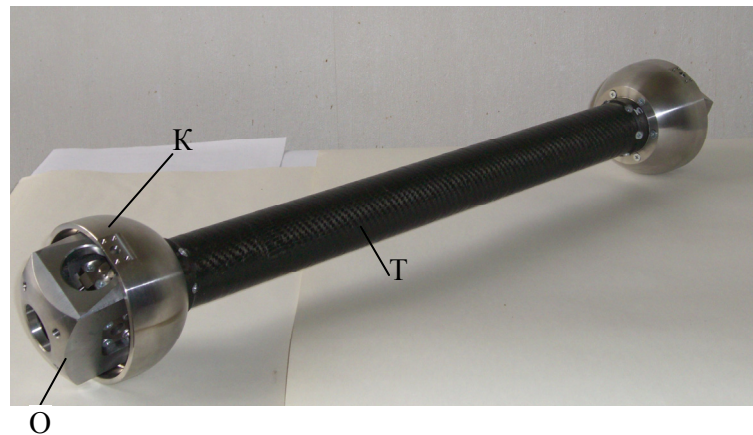


Рис. 14. Штанга просторового механізму із встановленими на її кінцях сферичними опорами

Сфера взаємодіє із сферичними поверхнями вставок 2, що закріплені на рухомій рамці 3. Рамка жорстко зв'язана із втулкою 4. Сфера із рухомою рамкою в зборі входить в порожнину корпуса 5. Корпус має отвори 6 в які поміщаються втулки для закріплення сфери та система регулювання положення сфери.

Сферична опора встановлюється на штанзі просторового механізму (рис. 14). Штанга має трубу Т, виконану із композитного матеріалу (вуглепластик). На трубі гвинтами закріплюються втулки сферичних опор. На втулках встановлюються захисні кожухи К. Корпуси опор О закріплюються на рухомій платформі просторового механізму, або на нерухомій основі.

Дослідна перевірка виготовленого зразка сферичної опори рідинного тертя підтвердила її надійну роботу як основного вузла просторового механізму.

Висновки

1. Розроблені в результаті досліджень схемні і конструктивні рішення регульованих сферичних опор рідинного тертя мають набір засобів для реалізації різних способів регулювання положення сфери. Рекомендується струменевий спосіб регулювання гідродинамічним запиранням потоків на виході щілин опор рідинного тертя.

2. Основними конструкторсько-технологічними проблемами розробки регульованих сферичних опор рідинного тертя є виконання малорозмірних каналів для підводу рідкого середовища, виготовленні і контроль точних сферичних поверхонь та проблеми збирання деталей опори із забезпеченням рівномірного радіального зазору. Дані проблеми вирішуються застосуванням інтегрованих технологій виготовлення деталей з отворами для подачі робочого середовища, забезпеченням спеціальної технології фінішної обробки сферичних поверхонь з подальшим контролем на 5-ти координатній вимірювальній машині та спеціальними системами регулювання положення деталей опори при збиранні з метою забезпечення рівномірного радіального зазору.

3. В щілинах сферичних опор рідинного тертя мають місце складні гідродинамічні процеси, які полягають в наявності зустрічних потоків рідин з утворенням критичних областей, в яких швидкість рідкого середовища близька до нуля. Експериментально підтверджено можливість ефективних ціленаправлених змін параметрів потоку на виході щілини, чим забезпечується гнучке безконтактне

регулювання опорної реакції та регулювання положення сфери в межах діаметрального зазору між сферичними поверхнями.

4. Розрахунок характеристик регульованих сферичних опор підтвердив ефективність запропонованих способів струменевого регулювання в діапазоні тиску керування 0..0.4 від номінального тиску живлення опори. Силові характеристики опори описуються аналітичними залежностями у вигляді полінома третього ступеня.

5. Результати експериментальних досліджень характеристик опор відповідають розрахунковим даним. Доцільно подавати результати вимірів у вигляді набору просторових матриць. Характеристики опори залишаються стабільними в широкому діапазоні змін експлуатаційних параметрів.

6. Розроблений і виготовлений дослідний зразок підтвердив ефективність створених наукових основ розробки регульованих сферичних опор рідинного тертя.

7. Як напрямок подальших досліджень рекомендується проведення дослідно-конструкторських робіт по створенню просторової системи приводів на основі механізмів, які включають розроблені регульовані сферичні опори рідинного тертя.

Список літератури

1. Крайнев А.Ф. Идеология конструирования. – М.: Машиностроение, 2003. – 385с.
2. Воскресенский В.А., Дьяков В.И., Зиле А.З. Расчет и проектирование опор жидкостного трения. – М.: Машиностроение, 1983. – 232с.
3. Войтов В.А., Яхно О.М., Аби Сааб Ф.Х. Принципы конструктивной износостойкости узлов трения гидромашин. – К.: Техніка, 1999. – 192с.
4. Струтинський С.В. Прецизійний поворотний вузол просторового механізму // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. Вип. 17 – Кіровоград. – КНТУ, 2006. – С. 100-107. - Бібліогр.: с. 107.
5. Яхно О.М., Струтинський С.В. Гідростатично-аеростатичний опорний вузол // Патент України на корисну модель №31194. МПК (2006) F16C32/06 №u200714415; заявл.20.12.2007; опубл. 25.03.2008, Бюл. №6.
6. Струтинський С.В. Застосування дискретних математичних моделей у вигляді просторових матриць та багатомірних узагальнених функцій для опису стохастичного тензорного поля моментів інерції сферичної опори // Праці конференції «Теорія та практика раціонального проектування, виготовлення і експлуатації машинобудівних конструкцій». – Львів, 22-24 жовтня 2008. – С.195-196.
Патент України на корисну модель №43729. Шарнір для просторового механізму / Струтинський С.В., МПК F16D3/16, u200903735, заявл. 16.04.2009, опубл. 25.08.2009, Бюл. №16.