

УДК 621.9.04

Струтинський С.В. к.т.н., Коваль О.Д. к.т.н., доц.
НТУУ «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна

МАГНІТНІ ОПОРИ РІДИННОГО ТЕРТЯ З ФЕРОМАГНІТНОЮ РІДИНОЮ ПРИЗНАЧЕНІ ДЛЯ ПРОСТОРОВИХ МЕХАНІЗМІВ

Strutynskiy S., Koval O.
National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine (strutynskiy@gmail.com)

MAGNETIC RESISTANCE FLUID FRICTION WITH FERROFLUID INTENDED FOR SPATIAL MECHANISM

***Анотація.** Розроблені схемні рішення варіантів магнітних опор із ферромагнітною рідиною. Встановлені особливості розподілу гідростатичного тиску у ферромагнітній рідині. Визначені статичні характеристики магнітних опор різного виду. Досліджені особливості гідродинаміки ферромагнітної рідини в опорі. Дані пропозиції по використанню розроблених магнітних опор в сферичних шарнірах просторових механізмів та в ефективних демпферах рідинного тертя.*

***Ключові слова:** опора, ферромагнітна рідина, статичний тиск, розподіл швидкостей, статичні характеристики, сферичні шарніри, демпфери коливаль.*

Вступ

Мехатронні просторові системи приводів використовують різноманітні опорні вузли. Особливо ефективним є застосування принципово нових пристроїв, що використовують сучасні матеріали, зокрема ферромагнітну рідину. Тому розробка магнітних опор рідинного тертя з ферромагнітною рідиною є актуальною науковою проблемою.

Проблема в загальному вигляді полягає у створенні принципово нових магнітних опор рідинного тертя із ферромагнітною рідиною. Проблема пов'язана із важливими науковими та практичними завданнями розробки прогресивного технологічного обладнання на основі просторових систем приводів.

В літературних джерелах наведені ефективні технічні пристрої, робочим середовищем яких є магнітна рідина [1]. Відзначено особливі властивості магнітного текучого середовища [2]. Розглянуто ряд задач пов'язаних із течією магнітної рідини [3] та її застосування. Одним із ефективних напрямків є застосування магнітної рідини в ущільненнях різного виду [4]. В останніх дослідженнях і публікаціях наведено прогресивні конструкції ущільнень та методи їх розрахунку [5].

В літературних джерелах не виявлено пропозицій по конструктивній реалізації та дослідженню характеристик магнітних опор рідинного тертя з ферромагнітною рідиною.

До невирішених раніше частин загальної проблеми відноситься розробка конструкцій опор рідинного тертя з ферромагнітною рідиною, дослідження особливостей гідродинаміки ферромагнітної рідини та характеристик опор.

Метою досліджень є розробка опор рідинного тертя з ферромагнітною рідиною та визначення їх характеристик. Задачами досліджень є розробка і практична реалізація ефективних опор рідинного тертя з ферромагнітною рідиною, встановлення особливостей гідростатики та гідродинамічних процесів у опорах, визначення їх статичних характеристик.

Виклад основного матеріалу досліджень.

Розроблені схемні і конструктивні рішення опор.

Розроблені магнітні опори із ферромагнітною рідиною по своїм функціям аналогічні гідростатичним або аеростатичним опорам, але не потребують зовнішнього джерела енергії для підводу текучого робочого середовища. Відповідно вони є більш ефективними і мають широкі функціональні можливості.

Магнітна опора включає постійний магніт 1, встановлений на опорній поверхні 2, при цьому між магнітом і опорною поверхнею знаходиться шар ферромагнітної рідини 3 (рис. 1, а).

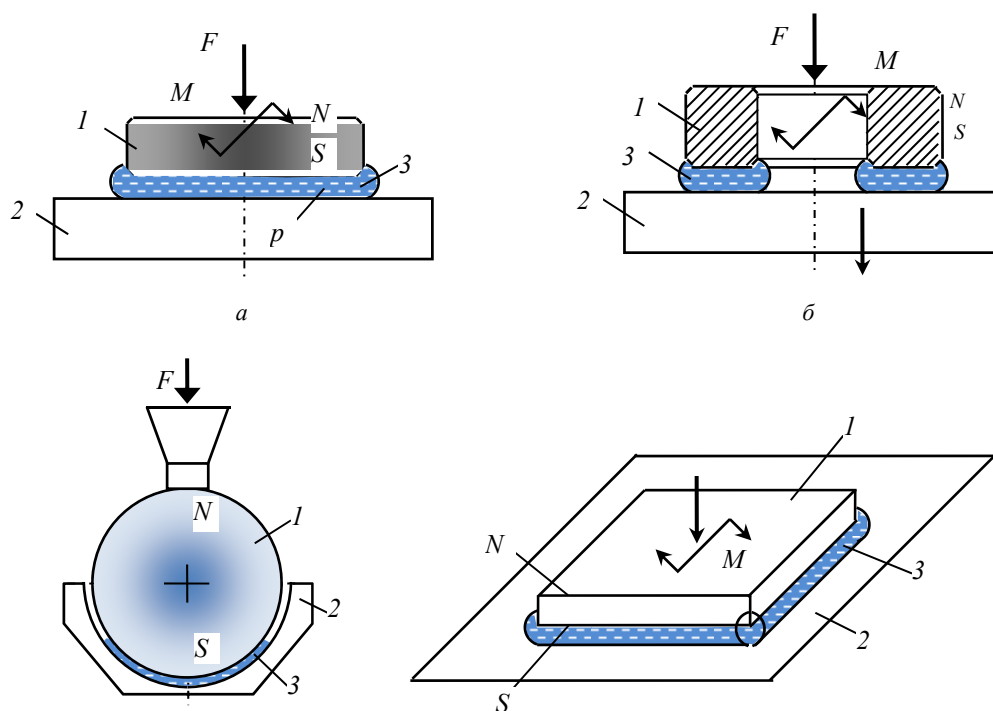


Рис. 1. Схеми розроблених магнітних опор рідинного тертя з феромагнітною рідиною: плоска опора з циліндричним магнітом (а); з кільцевим магнітом (б); сферична магнітна опора у сферичній лунці (в); магнітна опора із магнітної стрічки (г)

Опорна поверхня 2 виконана із немагнітного матеріалу. Тому в щілині між опорною поверхнею і магнітом під дією магнітних сил скупчується феромагнітна рідина. Реакція опори виникає внаслідок наявності сил тиску p в рідині і компенсує дію статичного навантаження F (див. рис. 1, а). Магніти із сучасних матеріалів (неодим) характеризуються високим рівнем індукції магнітного поля біля полюса магніта. Тому опори мають достатню несучу спроможність.

При використанні кільцевого магніта (рис. 1, б) феромагнітна рідина 3 скупчується в межах кільцевої області. Сферична опора (рис. 1, в) має магнітну сферу, яка через шар феромагнітної рідини взаємодіє із сферичною опорною поверхнею. Перспективним видом магнітних опор із феромагнітною рідиною є опора із магнітної стрічки (рис. 1, г).

Тиск у феромагнітній рідині визначається індукцією магнітного поля, яка мало змінюється по периметру магніта, але суттєво змінюється по товщині шару феромагнітної рідини. Тому опори сприймають як осьове F , так і моментне M навантаження. Особливо ефективно моментне навантаження сприймає опора у вигляді циліндричного магніта (див. рис. 1, б). Магнітна індукція кільцевого магніта має максимум на периферійній ділянці торця магніта, що збільшує реактивний момент. Сферична опора (рис. 1, в) не сприймає моментного навантаження, але забезпечує компенсацію ексцентриситета сили F .

В опорах використана феромагнітна рідина [5] на основі мінеральної оливи. При нанесенні обмеженої кількості феромагнітної рідини на поверхню магніта в околиці магнітного полюса формується компактний об'єм рідини у вигляді краплі, яка охоплює полюсну ділянку магніта (рис. 2, а).



Рис. 2. Скупчення феромагнітної рідини на полюсах постійних магнітів різної форми: циліндричний магніт при значній кількості рідини (а); циліндричний магніт при обмеженій кількості рідини (б); рідина на полюсі магнітної сфери (в)

В залежності від наявності феромагнітної рідини на полюсній ділянці магніта формується тороподібний рідкий об'єм, величина і форма якого залежить від індукції магнітного поля та кількості рідини. При достатній кількості рідини крапля охоплює весь торець магніта (рис. 2, а). Форма вільної поверхні краплі залежить від індукції магнітного поля та сил поверхневого натягу. При зменшенні кількості рідини крапля зменшується набуваючи вигляду рідкого кільця, що охоплює периферичну ділянку торця магніта (рис. 2, б).

На поверхні магнітів із великим значенням магнітної індукції на полюсній ділянці магніта формуються множинні виступи із феромагнітної рідини висота та кількість яких пропорційна рівню індукції магнітного поля (рис. 2, в).

Закономірності гідростатики феромагнітної рідини та статичні характеристики магнітних опор

Магнітні опори із феромагнітною рідиною є принципово новим видом гідравлічних пристроїв. Тому для їх дослідження використані спеціально розроблені теоретичні та експериментальні методи. Теоретичні методи базуються на фундаментальних положеннях магнітної гідростатики [1, 6].

У випадку, коли магнітна опора переміщується із незначною швидкістю або є нерухомою параметри феромагнітної рідини визначаються законами магнітної гідростатики [3]. Враховуючи значну інтенсивність магнітного поля можна не враховувати масові гравітаційні сили в рідині. При цьому статичний тиск у феромагнітній рідині p буде визначатися індукцією магнітного поля згідно залежності:

$$p = p_0 + B^2 / (2\eta), \quad (1)$$

де B – модуль індукції магнітного поля; η – магнітна проникність феромагнітної рідини; p_0 – значення атмосферного тиску.

Прийнявши, що індукція магнітного поля мало змінюється по поверхні полюсої ділянки магніта одержимо рівномірні епюри тиску на полюсні ділянки. Внаслідок дії магнітних сил у феромагнітній рідині виникає поле напружень. Тензор магнітних напружень Максвелла [2] в статичі визначається своїми головними значеннями і складає:

$$\sigma_{zz} = B^2 / (2\eta), \quad \sigma_{yy} = \sigma_{xx} = -B^2 / 2\eta, \quad (2)$$

де вісь z орієнтована в напрямку індукції магнітного поля, а взаємно-перпендикулярні вісі x та y розташовані в площині перпендикулярній вісі x .

Це значить, що на кожен частинку феромагнітної рідини діє розтягуюча сила в напрямку вектора індукції, який направлений по нормалі до поверхні магніта та стискаючі сили в двох взаємно-перпендикулярних напрямках, які лежать в площині паралельній дотичній площині до поверхні магніта. Це приведе до появи результуючої нормальної сили, яка діє на торцеву поверхню магніта.

Індукція магнітного поля змінюється в залежності від відстані до поверхні магніта. Для встановлення закону зміни магнітної індукції, а відповідної зміни статичного тиску проведені спеціальні експериментальні дослідження. На торцеву поверхню полюсної ділянки циліндричного магніта нанесена феромагнітна рідина. Без дії зовнішніх сил рідина утворює характерну краплю, яка частково знаходиться на циліндричній поверхні магніта (рис. 3, а)

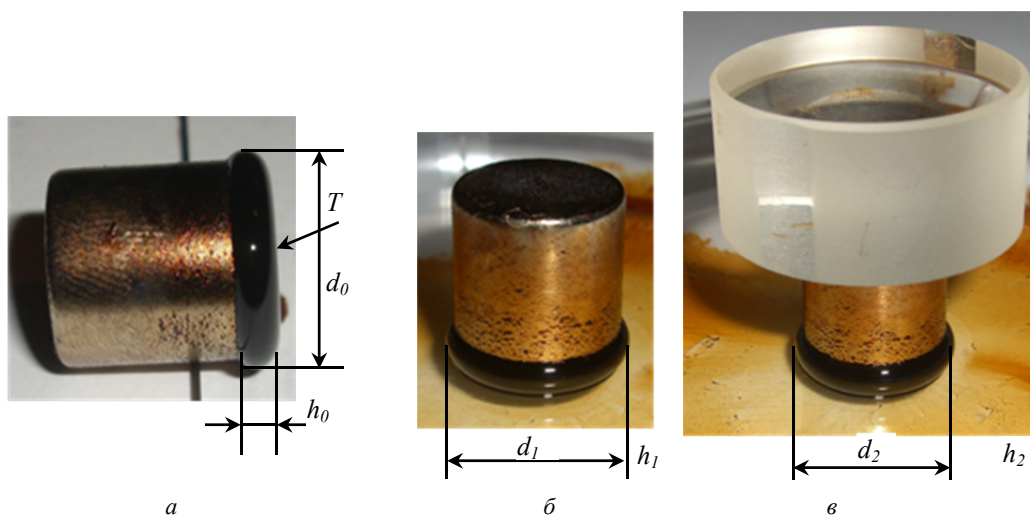


Рис. 3. Розташування феромагнітної рідини на торцевій поверхні циліндричного магніта: з утворенням вільної поверхні феромагнітної рідини (а); при встановленні магніта на скляну опорну поверхню при стисненні рідини силами ваги магніта (б); при навантаженні магніта скляним циліндром (в)

На зовнішній поверхні краплі тиск у феромагнітній рідині буде рівним атмосферному із врахуванням сили поверхневого натягу рідини. Можна прийняти, що сили поверхневого натягу на плоскій поверхні малі і із залежності (1) випливає, що на плоскій поверхні рідини T значення магнітної індукції $B \approx 0$. Це має місце при відстані h_0 від торцевої поверхні магніта.

При установці магніта на скляну опорну поверхню товщина шару феромагнітної рідини зменшується до значення h_1 (рис. 3, б). Положення магніта залишається стійким. Він ніби «плаває» по опорній поверхні. При навантаженні магніта скляним циліндром (див. рис. 3, в) товщина шару феромагнітної рідини зменшується до значення h_2 . Ексцентричність навантаження мало впливає на поперечно-кутове положення магніта. Шар феромагнітної рідини залишається стабільним. Зовнішній діаметр поверхні феромагнітної рідини змінюється мало ($d_0 \approx d_1 \approx d_2$).

В процесі досліджень проведені виміри статичних силових характеристик магнітних опор різного виду. Для цього магніт навантажувався контрольними вагами, а його зміщення у вертикальному напрямку вимірювалось індикатором з точністю 0,001 мм (рис. 4).



Рис. 4. Експериментальні виміри статичної силової характеристики магнітної опори з феромагнітною рідиною і циліндричним магнітом

Проведені виміри статичних характеристик магнітних опор в околиці нульових навантажень та у всьому діапазоні можливих змін товщини шару феромагнітної рідини (рис. 5).

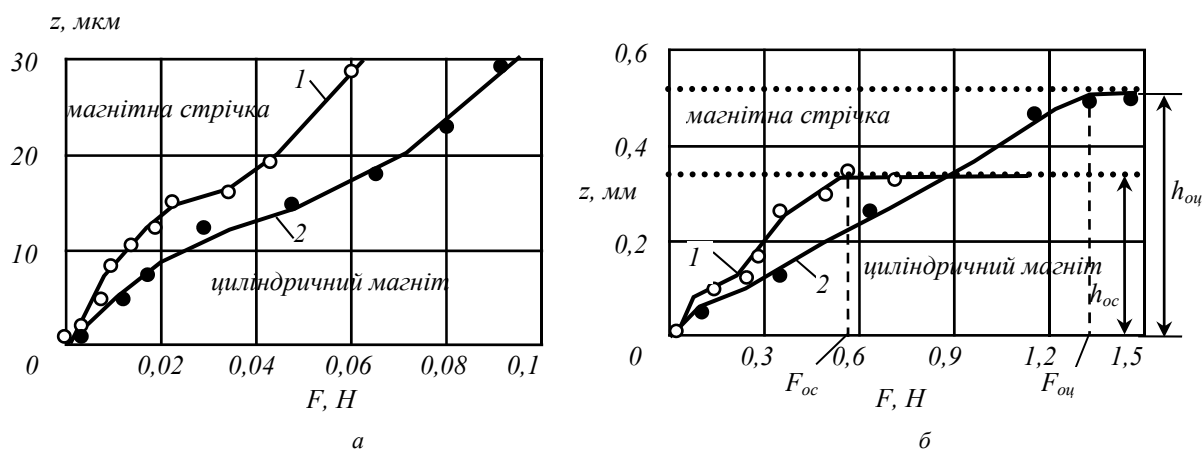


Рис. 5. Експериментально визначені статичні характеристики магнітних опор в околиці малих навантажень (а) та в діапазоні всіх можливих змін товщини шару феромагнітної рідини (б)

Статична характеристика опори у вигляді ділянки гнучкої магнітної стрічки розміром 22,8x20,12 мм є суттєво нелінійною. Максимальне переміщення опори по вертикалі складає $h_{oc} = 0.35$ мм. Навантаження необхідне для максимального переміщення опори складає $F_{oc} = 0.56$ Н. Це відповідає значенню еквівалентного тиску феромагнітної рідини $P_{oc} = 1.23$ кПа. Незначна несуча здатність опори із магнітної стрічки пояснюється вкрай малими значеннями магнітної індукції на поверхні стрічки.

Більшу несучу здатність має опора з циліндричним магнітом (діаметр 12 мм). Максимальне переміщення магніта $h_{oc} = 0.54$ мм досягається при навантаженні $F_{oc} = 1.35$ Н. Це відповідає значенню еквівалентно тиску $P_{oc} = 0.012$ Мпа.

Для наближеного опису можна прийняти, що статичні характеристики опор з різними магнітами близькі до лінійних у всьому діапазоні зміни товщини шару феромагнітної рідини (див. рис. 5, 6). Відповідно вони описані залежністю:

$$z = e \cdot F, \quad (3)$$

де значення коефіцієнта $e \approx 0,38$ мм/Н для циліндричного магніта і $e \approx 0,63$ мм/Н для магніта у вигляді магнітної стрічки.

Для підвищення несучої здатності магнітної опори в ній рекомендовано використати потужний кільцевий магніт (рис. 6).

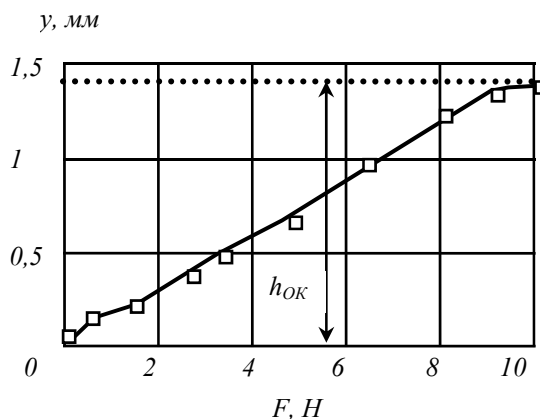


Рис. 6. Експериментальні виміри статичної характеристики магнітної опори з кільцевим магнітом: – встановлення індикатора для вимірів переміщення магніта (а); статична характеристика магнітної опори з кільцевим магнітом (б)

Несуча здатність опори з кільцевим магнітом складає 10,5Н при зовнішньому діаметрі магніта 40 мм, а внутрішньому діаметрі 25 мм. Еквівалентний тиск феромагнітної рідини при максимальному переміщенні магніта складає $p_{ok} \approx 0,014$ МПа. Діапазон зміни товщини шару феромагнітної рідини в опорі складає 1,48 мм. У вказаному діапазоні характеристика магнітної опори близька до лінійної залежності (3) в якій $e = 0,149$ мм/Н.

Із порівняння статичних характеристик опор випливає, що найбільшу жорсткість має опора із кільцевим магнітом. Для підвищення жорсткості рекомендується використати більш потужний магніт. В особливих випадках магнітні опори працюють в гідридному режимі. При невеликих навантаженнях зусилля сприймаються виключно силами статичного тиску у феромагнітній рідині. Якщо діюче навантаження перевищує регламентовану несучу здатність опори, рідина витісняється із зазору і опора працює як звичайний підшипник гідродинамічного тертя.

На основі проведених досліджень встановлено закон зміни індукції магнітного поля в шарі феромагнітної рідини. При зміні положення магніта тиск на опорній поверхні S змінюється від значення p_0 відповідного висоті краплі h_0 до значення p відповідного товщині шару рідини a (рис. 7).

При відсутності навантаження ($F=0$) товщина шару рідини складає h_0 , а тиск на вільній поверхні рідини (показана пунктиром) дорівнює атмосферному. Із формули (1) випливає, що на вільній поверхні значення магнітної індукції в рідині $B \approx 0$. Відповідно при товщині шару рідини h_0 на відстані h_0 від поверхні магніта $B \approx 0$. Приймемо початок системи координат в точці O , яка відповідає опорній поверхні розташованої на відстані h_0 від поверхні магніта. При зміщенні опорної поверхні на величину z на опорній поверхні виникає тиск p .

Несуча здатність магнітної опори визначається залежністю:

$$F = S(p - p_0), \quad (4)$$

де S - площа торця магніта, на якому знаходиться феромагнітна рідина; p - тиск на опорній поверхні відповідній поверхні магніта.

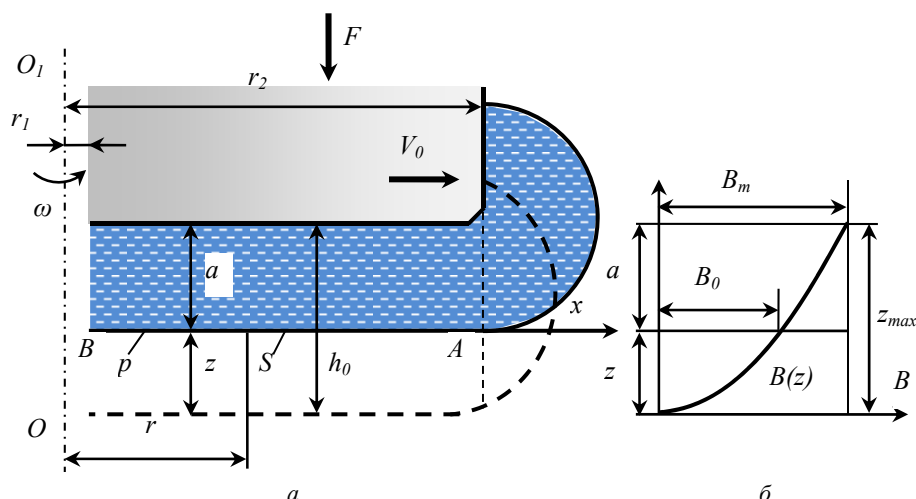


Рис. 7. Схема зміни товщини шару феромагнітної рідини при навантаженні опори силою F (а) та закон зміни магнітної індукції в шарі рідини (б)

Підставивши значення зусилля, яке діє на опору із залежності (3) у формулу (4) одержимо залежність магнітної індукції від зміни товщини шару феромагнітної рідини у вигляді:

$$B = \sqrt{\frac{2\eta}{eS}} z. \quad (5)$$

Максимальне значення магнітної індукції в шарі рідини досягається на поверхні магніта ($z = h_0$) і складає:

$$B_m = \sqrt{\frac{2\eta}{eS}} h_0. \quad (6)$$

Параболічна залежність (5) визначає закон зміни магнітної індукції в шарі рідини (див. рис. 7, б). Позначимо через a товщину шару рідини між магнітом і опорною поверхнею.

Відповідно в шарі рідини від опорної поверхні АВ до торця магніта, магнітна індукція $B(z)$ змінюється по параболічному закону від значення B_0 до значення B_m . Якщо товщина шару рідини є малою $a \rightarrow 0$ зміни магнітної індукції є незначними і можна прийняти $B = B_0 = const$. Якщо товщина шару близька до максимального значення $a = h_0$ в околиці опорної поверхні мають місце значні зміни магнітної індукції.

Особливості гідродинаміки феромагнітної рідини в магнітній опорі

Розглянемо закономірності течії феромагнітної рідини в шарі рідини між магнітом та опорною поверхнею. Прийнемо, що розміри щілини не змінюються ($a = const$), а магніт переміщується в напрямку x із швидкістю V_0 . Якщо знехтувати крайовими ефектами, можна вважати, що в щілині має місце плоско-паралельна течія феромагнітної рідини між паралельними стінками, одна із яких рухається (течія Куетта). Область течії обмежена нерухомою опорною поверхнею ($z=0$) та рухомою поверхнею хвостовика, що рухається із швидкістю V_0 (рис. 8).

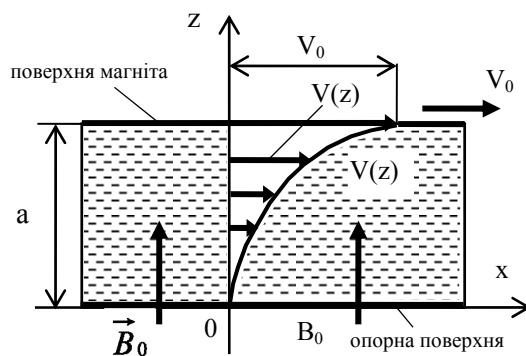


Рис. 8. Схема течії феромагнітної рідини в зазорі між поверхнею магніта і опорною поверхнею

На феромагнітну рідину в щілині розміром a діє поперечне магнітне поле з індукцією B_0 . Рух рідини без врахування змін температури визначається системою рівнянь [3]:

$$\begin{cases} (\bar{V}\nabla)\bar{V} = -\frac{1}{\rho}\nabla p + \nu\Delta\bar{V} + \frac{1}{\rho}(\bar{J}\times\bar{B}), \\ \operatorname{div}\bar{V} = 0, \quad \operatorname{div}\bar{B} = 0, \quad \operatorname{rot}\bar{E} = 0, \\ \bar{J} = \sigma[\bar{E} + (\bar{V}\times\bar{B})], \\ \operatorname{rot}\bar{B} = \eta\bar{I}, \end{cases} \quad (7)$$

де r - вектор швидкості феромагнітної рідини; p - тиск; ν - кінематична в'язкість рідини; ρ - густина; σ - електрична провідність феромагнітної рідини; η - магнітна проникність рідини; \bar{J} - вектор електричного струму в рідині; \bar{B} - вектор індукції магнітного поля; \bar{E} - вектор напруженості електричного поля;

В проекціях на вісі координат x та z із врахуванням наявності плоско-паралельного руху рідини в щілині рівняння магнітної гідродинаміки (7) набудуть вигляду:

$$\begin{cases} \mu \frac{d^2 V_x}{dz^2} = -J_y B_0, \\ \frac{dp}{dz} = -J_z B_x, \\ J_y = \sigma(E_y - V_x B_0), \\ J_z = \frac{1}{\eta} \cdot \frac{dB_x}{dz}, \end{cases} \quad (8)$$

де індекси x, y, z визначають вісь, на яку проєктується відповідна змінна.

Об'єднуючи перше і третє рівняння системи (8) одержимо:

$$\frac{d^2 V_x}{dz^2} = \frac{\sigma}{\eta} (E_y - V_x B_0) B_0. \quad (9)$$

Прийmemo в якості першого наближення, що магнітна індукція мало змінюється по ширині щілини. Це відповідає малим зазорам між магнітом і опорною поверхнею ($a \rightarrow 0$).

Введемо відносні безрозмірні комплекси:

$$\begin{aligned} \bar{V} &= \frac{V_x}{V_0}, & \bar{z} &= \frac{z}{a}, & \bar{x} &= \frac{x}{a}, & \bar{K} &= \frac{E_0}{V_0 B}, & \bar{p} &= \frac{p}{\rho V_0^2}, \\ \bar{B}_x &= \frac{B_x}{B \operatorname{Re}_m}, & \bar{J}_y &= \frac{J_y}{\sigma B V_0}, & \operatorname{Re}_m &= \frac{V_0 a}{\nu}, & Ha &= B_0 a \sqrt{\frac{\sigma}{\eta}}, \end{aligned} \quad (10)$$

де a - розмір щілини; Ha - число Гартмана; Re_m - число Рейнольдса.

Рівняння магнітної гідродинаміки (8, 9) у відносних величинах набудуть вигляду:

$$\frac{d^2 \bar{V}}{d\bar{z}^2} = Ha^2 (\bar{V} - \bar{K}), \quad \bar{J}_y = \bar{K} - \bar{V}, \quad \frac{d\bar{B}_x}{d\bar{z}} = \bar{J}_y \quad (11)$$

Граничними умовами для даних рівнянь є:

$$\bar{V} = 1, \quad \text{при } \bar{z} = 1, \quad \bar{V} = 0, \quad \text{при } \bar{z} = 0. \quad (12)$$

Розв'язок першого із рівнянь системи (11) при вказаних граничних умовах має вигляд:

$$\bar{V} = \bar{K} + \frac{(1 - \bar{K}) \operatorname{sh}(Ha \cdot \bar{z}) - \bar{K} \operatorname{sh}[Ha(1 - \bar{z})]}{\operatorname{sh}(Ha)}. \quad (13)$$

Підставляючи одержаний розв'язок (13) в два останні рівняння системи (11) і інтегруючи, одержимо:

$$\bar{B}_x = -\frac{\bar{K} \operatorname{ch}[Ha(1 - \bar{z})] + (1 - \bar{K}) \operatorname{ch}(Ha \cdot \bar{z})}{Ha \cdot \operatorname{sh}(Ha)}. \quad (14)$$

Прийmemo умову, що при $\bar{z} = 0$, $\bar{B}_x = 0$. Відповідно одержимо:

$$\bar{B}_x = \frac{chHa - ch(Ha \cdot \bar{z})}{Ha \cdot ch(Ha)} \quad (15)$$

При невеликому значенні напруженості зовнішнього електричного поля $\bar{K} \approx 0$ одержимо:

$$\bar{V} = \frac{sh(Ha \cdot \bar{z})}{sh(Ha)} \quad (16)$$

Із даної залежності випливає, що для течії рідини в щілині при незначній індукції магнітного поля маємо лінійну залежність швидкості від координати:

$$\bar{V} = \bar{z} \quad (17)$$

При збільшенні індукції магнітного поля росте число Гартмана. При цьому змінюється профілі швидкостей (рис. 9, а).

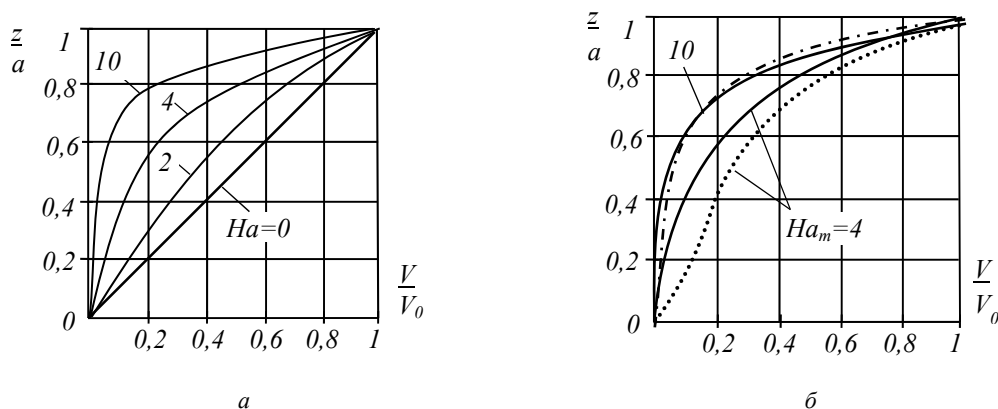


Рис. 9. Профілі швидкостей феромагнітної рідини в щілині, розраховані для постійного значення магнітної індукції (суцільної лінії) та одержані в результаті чисельних розрахунків при зміні магнітної індукції по ширині щілини (пунктирні лінії): розрахунки за формулою (16) (а); результати чисельного інтегрування рівняння (19) згідно процедури (21) (б)

Розрахунків за формулою (16) профілі швидкостей (див. рис. 9, а) мають місце для щілин малих розмірів, у яких можна знехтувати зміною магнітної індукції по ширині щілини.

Для щілин середніх розмірів має місце зміна магнітної індукції по ширині відповідно залежності (5). Введемо змінне по перетину щілини число Гартмана:

$$Ha_z = Ha_m \cdot \sqrt{\frac{z}{a}}, \quad (18)$$

де максимальне значення числа Гартмана:

$$Ha_m = B_m h_0 \cdot \sqrt{\frac{\sigma}{\eta}}.$$

Підставимо значення параметра (18) в перше із системи рівнянь (11) і одержимо (для $K \approx 0$) рівняння для визначення профіля швидкостей:

$$\frac{d^2 \bar{V}}{d\bar{z}^2} = Ha_m^2 \cdot \bar{z} \bar{V} \quad (19)$$

Граничними умовами для розв'язку даного рівняння прийнято

$$\text{при } \bar{z} = 0, \bar{V} = 0, \frac{d\bar{V}}{d\bar{z}} = 1, \quad (20)$$

Остання із умов (20) випливає із тієї обставини, що на опорній поверхні при $z = 0$ згідно (18) $Ha_z \rightarrow 0$.

Відповідно в даній області профіль швидкостей близький до залежності (17), що дає $\frac{d\bar{V}}{d\bar{z}} = 1$.

Нелінійне диференціальне рівняння (19) розв'язане чисельним методом згідно процедури:

$$y = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad H = 16, \quad f(x, y) = \begin{pmatrix} H \cdot x \cdot y_1 \\ y_0 \end{pmatrix}, \quad y_1 = \text{rkfixed}(y, 0, 3, N, f). \quad (21)$$

Чисельне інтегрування диференціального рівняння (19) проведено для різних значень числа Гартмана Ha_m . Встановлено, що розрахункові профілі швидкостей (пунктирні лінії на рис. 9, б) відрізняються від попередніх розрахунків в основному біля опорної поверхні. При збільшенні загальної індукції магнітного поля біля поверхні магніта відмінності розрахунків зменшуються. Тому, із результатів розрахунків випливає, що врахування змін магнітної індукції по ширині щілини мало змінює профілі швидкостей. Зміни профіля мають місце в основному на незначних відстанях від опорної поверхні.

Для навантаженої магнітної опори шар феромагнітної рідини набагато менший свого максимального значення $a \ll h_0$. Тому можна не враховувати змін магнітної індукції по ширині щілини і прийняти для розрахунку профіля швидкостей залежність (16).

Визначення моменту тертя в магнітній опорі з феромагнітною рідиною.

Дотичні напруження пов'язані із градієнтом швидкості згідно залежності:

$$\tau = \mu \frac{V_0}{a} \cdot \frac{d\bar{V}}{dz},$$

де $\mu = \nu\rho$ - динамічна в'язкість.

Для визначення моменту опору розрахунок напружень в рідині проводиться в околиці опорної поверхні. Відповідно,

$$\tau_0 = \mu \frac{V_0}{a} \cdot \frac{d\bar{V}}{dz} \Big|_{z=0}.$$

Після диференціювання залежності (16) одержимо:

$$\frac{d\bar{V}}{dz} = \frac{HaCh(Haz)}{Sh(Ha)}.$$

Відповідно на опорній поверхні:

$$\tau_0 = \mu \frac{V_0}{a} \cdot \frac{Ha}{Sh(Ha)}. \quad (22)$$

Момент тертя опори буде визначено при її повороті навколо осі OO_1 (див. рис. 7). Момент буде складений із елементарних сил дії дотичних напружень у всіх поточних точках S опорної поверхні. При цьому момент опору визначиться інтегралом:

$$M = \int_{r_1}^{r_2} 2\pi\tau_0 \cdot r dr. \quad (23)$$

де r_2 - зовнішній радіус магніта; r_1 - внутрішній радіус магніта.

Окружна швидкість магніта в точці S з радіусом r складає:

$$V_0 = \omega r \quad (24)$$

Підставивши значення швидкості (24) і дотичного напруження (22) в залежність (23) одержимо після інтегрування:

$$M = \frac{2}{3} \pi \cdot \frac{\mu\omega}{a} \cdot \frac{Ha}{Sh(Ha)} (r_0^3 - r_1^3). \quad (25)$$

Із формули (25) випливає, що момент опору лінійно залежить від кутової швидкості опори і зменшується із ростом індукції магнітного поля в щілині.

Пристрої на основі магнітних опор із феромагнітною рідиною

На основі розроблених магнітних опор із феромагнітною рідиною реалізовані оригінальні пристрої гідропривода [8-10]. В просторових системах приводів використані магнітні сферичні шарніри рідинного тертя. Сферичний шарнір має рухому сферу 1 із немагнітного матеріала (рис. 10, а).

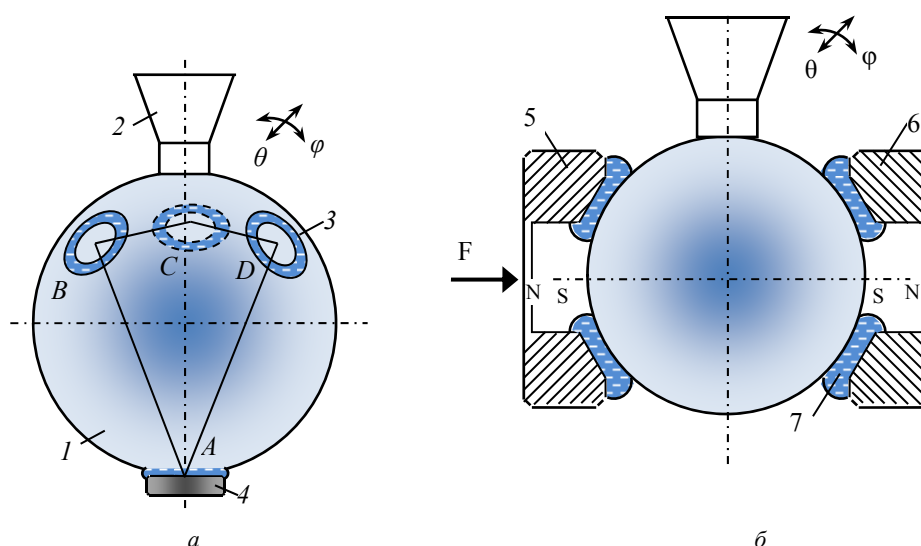


Рис. 10. Розроблені схемні рішення магнітних сферичних шарнірів рідинного тертя з феромагнітною рідиною, призначені для використання в просторових системах приводів: шарнір із чотирма магнітами в корпусі розміщеними по вершинах тетраедра (а); шарнір із двома кільцевими магнітами, розташованими діаметрально відносно сфери (б)

Хвостовик 2 шарніра розміщений на сфері та служить для з'єднання сфери із приводом. В нерухомому корпусі встановлені магніти 3, які взаємодіють із поверхнею сфери через шар феромагнітної рідини. Магніт 4 має дещо більший діаметр, чим забезпечується компенсація гравітаційних сил, що діють на сферу. Центри магнітів А, В, С і D розміщені рівномірно по поверхні сфери, утворюючи геометричну фігуру близьку до тетраедра. Цим забезпечується рівномірна жорсткість шарніра в різних діаметральних площинах. Сфера допускає обмежене переміщення в напрямках θ , φ . Недоліком даного шарніра є невеликий діапазон поперечно-кутових переміщень, який складає $45-60^\circ$. Збільшення діапазона переміщень сфери досягається в шарнірі з двома кільцевими магнітами 5 і 6 (рис. 10, б). Шар феромагнітної рідини знаходиться між поверхнею сфери і сферичними поверхнями кільцевих магнітів. Наведена конструкція шарніра забезпечує можливість повного повороту сфери відносно осі магнітів (у напрямку θ). У взаємно перпендикулярному напрямку φ сфера допускає обмежений поворот.

Сферичні шарніри мають незначні сили тертя і лінійні характеристики жорсткості. При екстремальних навантаженнях феромагнітна рідина витісняється із зазору між сферою та магнітом і шарнір працює як сферичний гідродинамічний підшипник. Зняття екстремального навантаження відновлює початкове положення шарніра.

Другим практично важливим застосуванням магнітних опор із феромагнітною рідиною є реалізація демпферів рідинного тертя. Плоский демпфер має один або кілька магнітів 1, що взаємодіють через шар феромагнітної рідини із однією або кількома кількома пластинами 2, зв'язаними із об'єктом 3, який підлягає демпфуванню (рис. 11, а).

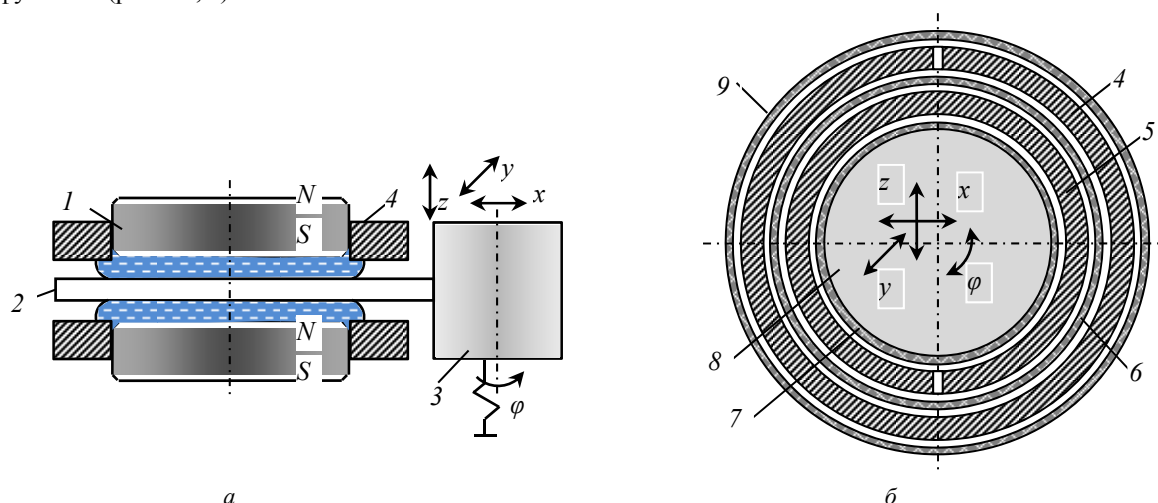


Рис. 11. Демпфери коливань на основі магнітних опор рідинного тертя з феромагнітною рідиною: демпфер із плоскими магнітами (а); демпфер із кільцевими магнітами, виготовленими із магнітної стрічки (б)

При переміщенні об'єкта 3 в напрямку z відбувається перетікання феромагнітної рідини по поверхні пластини 2, а відповідно виникає гідродинамічний опір, що гасить енергію коливань об'єкта. При переміщенні пластини в горизонтальному напрямку при зміщенні об'єкта в напрямку x або y чи його повороті на кут φ теж мають місце сили опору. Однак їх інтенсивність набагато менша, ніж при переміщенні пластини у вертикальному напрямку.

Циліндричний демпфер (рис. 11, б) має кільцеві магніти 4 і 5 виконані із гнучкої магнітної стрічки a між магнітами знаходиться кільце 6. Порожнини між магнітами і кільцем заповнені феромагнітною рідиною, яка разом з магнітами знаходиться в герметичному еластичному корпусі. Внутрішня частина корпусу 7 розміщена на штоці 8, зв'язаному із об'єктом, що підлягає демпфуванню. Зовнішня частина корпусу 9 закріплена нерухомо.

Основні сили опору виникають при радіальних переміщеннях штока у напрямках x , z . Часткове демпфування відбувається при крутильних і поздовжніх переміщеннях штока в напрямках φ і y .

Розроблені демпфери із феромагнітною рідиною мають значну енергоємність і високі показники демпфування коливань.

Висновки

1. Доведена теоретично та підтверджена шляхом розробки і апробації дослідних зразків можливість реалізації ефективних магнітних опор з феромагнітною рідиною.

2. Встановлено, що феромагнітна рідина внаслідок дії магнітостатичного тиску концентрується на полюсній ділянці магніта. В околиці даної ділянки тензор магнітних напружень має від'ємні компоненти в напрямку нормалі та забезпечує фокусування феромагнітної рідини в області контакту магніта із опорною поверхнею.

3. Характеристики жорсткості магнітних опор різного виду близькі до лінійних в діапазоні зміни робочих зазорів опор. Це пов'язано із експериментально встановленим видом параболічної залежності магнітної індукції в шарі феромагнітної рідини від відстані до поверхні магніта. Для малих зазорів зміни індукції є незначними.

4. Профіль швидкостей в шарі феромагнітної рідини є близьким до профіля течії Куетта. Зміни магнітної індукції в рідині дещо змінюють форму профіля в околиці опорної поверхні. Для малих зазорів ці зміни є несуттєвими.

5. Для підвищення ефективності опори треба застосувати феромагнітну рідину високої в'язкості із максимально можливою кількістю феромагнітних частинок, що збільшує електропровідність та густину феромагнітної рідини. Рекомендується загушувачі для підвищення в'язкості та надлишковий вміст феромагнітних частинок. Випадання осаду феромагнітних частинок унеможливується центруючою дією магнітного поля.

6. Як напрямок подальших досліджень рекомендується розробка конструкцій дослідних зразків магнітних опор із феромагнітною рідиною, їх апробація та дослідження характеристик опор.

Аннотация. Разработаны схемные решения вариантов магнитных опор с ферромагнитной жидкостью. Установлены особенности распределения гидростатического давления в ферромагнитной жидкости. Определены статические характеристики магнитных опор различного вида. Исследованы особенности гидродинамики ферромагнитной жидкости в опоре. Даны предложения по использованию разработанных магнитных опор в сферических шарнирах пространственных механизмов и в эффективных демпферах жидкостного трения.

Ключевые слова: опора, ферромагнитная жидкость, статическое давление, распределение скоростей, статические характеристики, сферические шарниры, демпферы колебаний.

Abstract. The schematic solutions of magnetic bearings with ferromagnetic fluid were developed. The experimental measurements of ferromagnetic fluid accumulation in polar plots of various types of magnets were made. The experimental samples of magnetic poles with the cylindrical and annular magnets were made.

The features of hydrostatic pressure distribution in ferromagnetic fluid in a fixed magnetic bearing were founded. On the basis of the stress tensor analysis the centering action of a magnetic field in the magnetic pole areas of magnetic bearing was proved. The interconnection of pressure and magnetic induction were defined.

The static magnetic characteristics of various types of bearings were defined. It is shown that the bearings characteristics are close to linear. Based on the measured static characteristics the variation of magnetic induction in the ferromagnetic fluid layer was determined.

The features of hydrodynamics of ferromagnetic fluid in the bearing were investigated. The effect of changes in magnetic induction in the fluids velocity distribution and the resistance moment in the liquid layer were defined. These proposals of usage the developed magnetic bearings in technical devices such as spherical hinges of spatial mechanisms and effective dampers with fluid friction were given.

Keywords: bearing, ferromagnetic fluid, static pressure, the velocity distribution, static characteristics, spherical joints, the fluctuations dampers.

Бібліографічний список використаної літератури

1. *Брановер Г.Г.* Магнитная гидродинамика несжимаемых сред / Брановер Г.Г., Цинобер А.Б.// М.: Наука, 1979. – 379 с.
2. *Шерклиф Дж.* Курс магнитной гидродинамики / Дж.Шерклиф // М.: Мир, 1967. – 319 с.
3. *Повх И.Л.* Техническая гидромеханика / Повх И.Л.// Л.: Машиностроение, 1969. – 524с.
4. *Кондаков Л.А.* Уплотнения и уплотнительная техника: Справочник / Кондаков Л.А., Голубев А.И., Овандер В.Б. и др.// М.: Машиностроение, 1986. – 464 с.
5. *Радионон А.В.* Комбинированные магнитошидкостные герметизаторы – эффективная альтернатива бесконтактным уплотнениям подшипниковых узлов с жидкой смазкой / Радионон А.В., Виноградов А.Н.// Збагачення корисних копалин: Наук.техн.зб. – 2009. – Вип. 35(76). – С.148-155.
6. *Лойцянский Л.Г.* Механика жидкости и газа / Лойцянский Л.Г.// М.: Наука, 1973. – 847с.
7. *Струтинський С.В.* Просторові системи приводів: Монографія / Струтинський С.В., Гуржій А.А.// К.: Педагогічна думка, 2013. – 492 с.
8. *Яхно О.М.* Гідродинамічні процеси магнітних сферичних шарнірів просторових систем приводів у вигляді рухомих октаедричних структур / Яхно О.М., Струтинський С.В. // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Х.: НТУУ«ХПІ». – 2014. №1(1044). – С.88-97.
9. *Яхно О.М.* Гідродинамічні аспекти течії феромагнітної рідини в інерційному демпфері коливань просторового механізму / Яхно О.М., Струтинський С.В. // Всеукраїнський науково-технічний журнал «Промислова гідравліка і пневматика». – Вінницький аграрний університет. - №1(43), 2014. – С. 27-34.
10. *Струтинський С.В.* Розробка динамічних інерційних магнітних приводів із феромагнітною рідиною для переміщення рухомого просторового механізму октаедричного типу / Струтинський С.В. // Технологічні комплекси. Науковий журнал. – Луцьк. - №1(9). – 2014. – С. 132-139.

References

1. *Branover G.G., Cinober A.B.* Magnitnaja gidrodinamika neszchimaemyh sred [Magnetic hydrodynamics incompressible media]. Moscow: Nauka, 1979, p.379.
2. *Sherklif Dzh.* Kurs magnitnoj gidrodinamiki [Course magnetohydrodynamics]. Moscow: Mir, 1967, p.319.
3. *Povh I.L.* Tehnicheskaja gidromehanika [Technical Hydromechanics]. Lviv: Mashinostroenie, 1969, p. 524.
4. *Kondakov L.A., Golubev A.I., Ovander V.B.* etc. Uplotnenija i uplotnitel'naja tehnika: Reference book [Compaction and compaction equipment]. Moscow: Mashinostroenie, 1986, p. 464.
5. *Radionov A.V., Vinogradov A.N.* Kombinirovannye magnitozhidkostnye germetizatory – jeffektivnaja al'ternativa beskontaktnym uplotnenijam podshipnikovyh uzlov s zhidkoj smazkoj [Combined magnetic hermetic - effective alternative to non-contact seals bearing assemblies lubricated]. Zbagachennja korisnih kopalin: Scientific and technical collection, 2009, no. 35 (76), pp. 148-155.
6. *Lojczanskij L.G.* Mehanika zhidkosti i gaza [Fluid and gas mechanics]. Moscow: Nauka, 1973, p. 847.
7. *Strutins'kij S.V., Gurzhij A.A.* Prostorovi cistemi privodiv: Monograph [Spatial infusion drives]. Kiev: Pedagogichna dumka, 2013, p. 492.
8. *Jahno O.M., Strutins'kij S.V.* Hidrodinamichni procesi magnitnih sferichnih sharniriv prostорових систем приводів у вигляді рухомих октаедричних структур [Hydrodynamic processes spherical joints spatial magnetic drive systems as mobile octahedral structures] Bulletin of the National Technical University «KhPI»: Collection of scientific works. Kharkiv: NTU “KhPI”, 2014, no 1(1044), pp.88-97.
9. *Jahno O.M., Strutins'kij S.V.* Hidrodinamichni aspekti techii feromagnitnoї ridini v inercijnomu dempferi kolivan' prostорового механізму [Hydrodynamic aspects of ferromagnetic fluid flow in the inertial dampers spatial oscillation mechanism] Ukrainian scientific journal «Promislova gidravlika i pnevmatika», Vinnitsa Agricultural University, no 1(43), 2014, pp. 27-34.
10. *Strutins'kij S.V.* Rozrobka dinamichnih inercijnih magnitnih privodiv iz feromagnitnoju ridinoju dlja peremishhennja ruhomogo prostорового механізму октаедричного типу [Development of dynamic magnetic inertial actuators with ferromagnetic fluid to move the movable spatial mechanism octahedral type] Scientific journal “Tehnologichni kompleksi”. Lutsk, no1(9), 2014pp. 132-139.

Подана до редакції 18.03.2015