

ОБҐРУНТУВАННЯ РОЗРОБЛЕННЯ БЕЗКОНТАКТНИХ МАГНІТНИХ ОПОР ІЗ ФЕРОМАГНІТНОЮ РІДИНОЮ

Анотація. Запропонована конструктивна схема безконтактної магнітної опори із феромагнітною рідиною. Вона має осьові і радіальні встановлені нерухомо потужні постійні магніти, які взаємодіють через шар феромагнітної рідини із поверхнею рухомого стола, виконаного із немагнітного матеріалу.

Розглянуто задачу гідростатики феромагнітної рідини в опорі та визначені особливості гідродинаміки феромагнітної рідини. В першому наближенні досліджена течія рідини при постійному значенні магнітної індукції. Визначено розподіл швидкостей в шарі феромагнітної рідини в залежності від величини магнітної індукції (числа Гартмана). Одержані значення швидкостей уточнені врахуванням зміни магнітної індукції в об'ємі рідини. Одержано нелінійне диференціальне рівняння, яке розв'язано числовим методом Рунге-Кутта. При цьому визначено профіль швидкостей феромагнітної рідини. Встановлено умову відсутності вихроутворення, що є основою обґрунтування вибору параметрів безконтактних магнітних опор.

Ключові слова: магнітна опора, феромагнітна рідина, статика, течія рідини, профіль швидкостей, умови вихроутворення.

Безконтактні магнітні опори із феромагнітною рідиною мають низькі коефіцієнти опору і високу демпфуючу здатність. Вони ефективні до застосування у різноманітних пристроях. Тому розроблення і дослідження магнітних опор із феромагнітною рідиною є актуальним.

Проблема в загальному вигляді полягає у створенні опор рідинного тертя із поліпшеними характеристиками.

В останніх дослідженнях і публікаціях наведено схемні рішення шарнірів із феромагнітною рідиною [1] та результати їх досліджень [2]. Також застосовуються ущільнення із феромагнітною рідиною [3]. Результатів розроблення та дослідження магнітних опор з феромагнітною рідиною в літературних джерелах не виявлено.

Тому до невирішених раніше частин загальної проблеми віднесено теоретичне обґрунтування можливості розроблення безконтактних магнітних опор із феромагнітною рідиною.

Метою даних досліджень є підтвердження можливості розроблення безконтактних магнітних опор із феромагнітною рідиною. Задачами досліджень є розроблення принципів рішень магнітних опор із феромагнітною рідиною та теоретичні дослідження робочих процесів гідростатики та гідродинаміки феромагнітної рідини в опорах.

Запропоновано ряд схемних рішень безконтактних магнітних опор (рис. 1а).

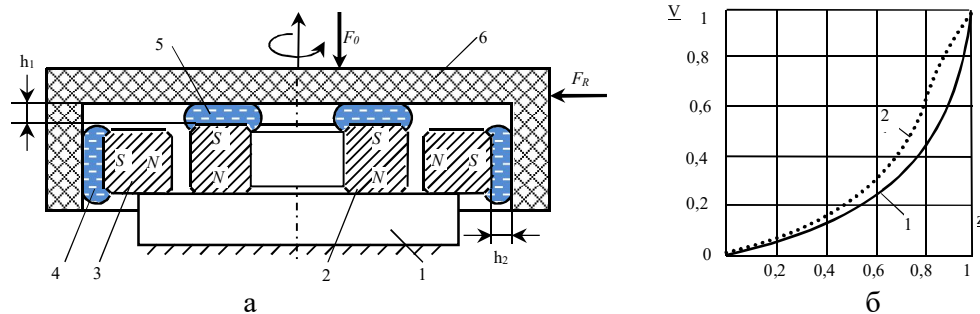


Рис. 1 - Схемне рішення безконтактної магнітної опори із феромагнітною рідиною (а) та розрахункові профілі швидкостей в шарі феромагнітної рідини (б)

Опора має нерухому основу 1 на якій встановлено кільцевий магніт 2 та магніти 3. На поверхнях магнітів знаходяться певні об'єми феромагнітної рідини 4 і 5, які контактують із внутрішньою поверхнею поворотного стола 6 виконаного із немагнітного матеріалу.

Безконтактна опора сприймає осьове F_0 і радіальне F_R навантаження. При незначних швидкостях переміщення стола відносно нерухомої основи параметри феромагнітної рідини в зазорах між поверхнями магнітів і поверхнею стола визначаються законами магнітної гідростатики [4]. Статичний тиск p у феромагнітній рідині визначається залежністю:

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

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

При знаходженні феромагнітної рідини на полюсі магніта, вона розміщується в шарі товщиною h і утворює вільну поверхню. На вільній поверхні тиск у феромагнітній рідині буде рівним атмосферному. Із залежності (1) випливає, що на поверхні рідини при відстані h від торцевої поверхні магніта значення магнітної індукції $B \approx 0$.

При установці стола на шар феромагнітної рідини товщина шару зменшується на величину z і складе $(h-z)$. При цьому тиск на поверхні стола буде визначено залежністю (1) при врахуванні зміни магнітної індукції. Встановлено, що закон зміни магнітної індукції в шарі феромагнітної рідини близький до параболічного і визначається залежністю [2]:

$$B(z) = \sqrt{2\eta c / h}, \quad (2)$$

де c – константа, яка залежить від форми магніта і його властивостей.

Об'єднуючи формули (1) і (2) одержимо залежність тиску в шарі феромагнітної рідини від переміщення стола:

$$p = p_0 + cz / h.$$

Несуча здатність опори залежить від переміщення стола у вертикальному напрямку:

$$F_0 = s(p - p_0) = \frac{cs}{h} z.$$

де s – площа шару феромагнітної рідини.

Розглянемо закономірності течії в шарі феромагнітної рідини між магнітом та поверхнею стола. Прийmemo, що товщина шару рідини не змінюється, а окрема точка стола переміщується в напрямку x із швидкістю v_0 . Прийнято, що в щілині має місце шарувата течія феромагнітної рідини між паралельними стінками (течія Куетта) [4].

Рух феромагнітної рідини без врахування змін температури визначається системою рівнянь [5]:

$$\begin{aligned} (\vec{v} \nabla) \vec{v} &= -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \Delta \vec{v} + \frac{1}{\rho} (\vec{j} \times \vec{B}), & \operatorname{div} \vec{v} &= 0, \quad \operatorname{div} \vec{B} = 0, \quad \operatorname{rot} \vec{E} = 0, \\ \vec{j} &= \sigma [\vec{E} + (\vec{v} \times \vec{B})], & \operatorname{rot} \vec{B} &= \eta \vec{j}. \end{aligned} \quad (3)$$

де \vec{v} - вектор швидкості феромагнітної рідини; p - тиск; ν - кінематична в'язкість рідини; ρ - густина; σ - електрична провідність феромагнітної рідини; \vec{j} - вектор електричного струму в рідині; \vec{B} - вектор індукції магнітного поля; \vec{E} - вектор напруженості електричного поля;

В проекціях на вісі координат x та z для плоско-паралельного руху рівняння магнітної гідродинаміки (3) набудуть вигляду:

$$\mu \frac{d^2 v_x}{dz^2} = -j_y B_0, \quad \frac{dp}{dz} = -j_z B_x, \quad j_y = \sigma (E_y - v_x B_0), \quad j_z = \frac{1}{\eta} \cdot \frac{dB_x}{dz}, \quad (4)$$

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

Об'єднуючи перше і третє рівняння системи (4) одержимо:

$$\frac{d^2 V_x}{dz^2} = \frac{\sigma}{\eta} (E_y - V_x B_0) B_0. \quad (5)$$

Прийmemo в якості першого наближення, що магнітна індукція є постійною по ширині щілини. Введемо відносні безрозмірні комплекси:

$$\begin{aligned} \bar{V} &= V_x / V_0, & \bar{z} &= z / h, & \bar{x} &= x / h, \\ \bar{K} &= \frac{E_0}{V_0 B}, & \bar{p} &= \frac{p}{\rho V_0^2}, & \bar{B}_x &= \frac{B_x}{B \operatorname{Re}_m}, & \bar{J}_y &= \frac{J_y}{\sigma B V_0}, & \operatorname{Re}_m &= \frac{V_0 h}{\nu}, & Ha &= B_0 h \sqrt{\frac{\sigma}{\eta}}, \end{aligned} \quad (6)$$

де Ha - число Гартмана; Re_m - число Рейнольдса.

Рівняння магнітної гідродинаміки у відносних величинах набудуть вигляду:

$$\frac{d^2 \bar{V}}{d\bar{z}^2} = Ha^2 (\bar{V} - \bar{K}), \quad \bar{J}_y = \bar{K} - \bar{V}, \quad \frac{d\bar{B}_x}{d\bar{z}} = \bar{J}_y \quad (7)$$

Крайовими умовами для даних рівнянь є:

$$\bar{V} = 1, \quad \text{при } \bar{z} = 1, \quad \bar{V} = 0, \quad \text{при } \bar{z} = 0. \quad (8)$$

Розв'язок першого із рівнянь системи (7) із врахуванням (8):

$$\bar{V} = \bar{K} + \frac{(1 - \bar{K}) \operatorname{sh}(Ha \cdot \bar{z}) - \bar{K} \operatorname{sh}[Ha(1 - \bar{z})]}{\operatorname{sh}(Ha)}. \quad (9)$$

Підставляючи одержаний розв'язок (9) в два останні рівняння системи (7) і інтегруючи, одержимо:

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

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

$$\bar{B}_x = \frac{\operatorname{ch} Ha - \operatorname{ch}(Ha \cdot \bar{z})}{Ha \cdot \operatorname{ch}(Ha)}.$$

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

$$\bar{V} = \frac{\operatorname{sh}(Ha \cdot \bar{z})}{\operatorname{sh}(Ha)},$$

Розрахунок за даною залежністю дає профіль швидкостей без точки перегину (крива 1 на рис. 16).

Для врахування зміни магнітної індукції по ширині щілини, введемо змінне по перетину щілини число Гартмана:

$$Ha_z = Ha_m \cdot \sqrt{z/a}, \quad (10)$$

де максимальне значення числа Гартмана:

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

Підставимо значення параметра (10) в перше із системи рівнянь (7) і одержимо (при $K \approx 0$) нелінійне рівняння для визначення швидкостей:

$$\frac{d^2 \bar{V}}{d\bar{z}^2} = Ha_m^2 \cdot \bar{z} \cdot \bar{V}. \quad (11)$$

Граничними умовами для даного рівняння при $\bar{z} = 0$, $\bar{V} = 0$:

$$\frac{d\bar{V}}{d\bar{z}} = 1.$$

Остання із даних умов впливає із тієї обставини, що на опорній поверхні при $z = 0$ згідно (10) $Ha_z \rightarrow 0$. Відповідно в даній області $\frac{d\bar{V}}{d\bar{z}} = 1$.

Нелінійне диференціальне рівняння (11) розв'язане числовим методом Рунге-Кутта згідно процедури:

$$y = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad H = Ha_m^2 = 16, \quad f(x, y) = \begin{pmatrix} H \cdot x \cdot y_1 \\ y_0 \end{pmatrix}, \quad y := r\text{fixed}(y, 0, 3, N, f).$$

Розрахунковий профіль швидкостей має точку перегину (крива 2 на рис. 1б). Тому зміни магнітної індукції необхідно враховувати при визначенні характеристик магнітної опори.

Наявність точки перетину на кривій 2 є небажаним явищем і може привести до втрати стійкості течії. Встановлено, що суттєвим є перегин профіля швидкості при $Ha_m \geq 6$. Дане значення критерія взято за основу при виборі геометричних параметрів опори.

Висновки

1. Обґрунтовано схемне рішення безконтактної магнітної опори із феромагнітною рідиною, яка має потужні постійні магніти між поверхнями яких і поверхнею стола виконаного із немагнітного матеріалу знаходиться шар феромагнітної рідини.

2. Обґрунтовано вибір параметрів безконтактної магнітної опори із умови обмеження критерія (числа Гартмана), що забезпечує незначний ступінь перегину профіля швидкості в шарі рухомої феромагнітної рідини і відповідно відсутність вихроутворення в об'ємі рідини.

Список літератури:

1. Пат. 114488 Україна, МПК F16C 11/06, F16D 3/16, F16C 32/04. Сферичний шарнір / Струтинський С.В. // № а 2014 03642; заявл. 08.04.2014; опубл. 26.06.2017, Бюл. № 12. – 5 с.: іл. 4.
2. Струтинський С.В. Магнітні опори рідинного тертя з феромагнітною рідиною призначені для просторових механізмів / С.В.Струтинський, О.Д.Коваль // Вісник НТУУ «Київський політехнічний інститут», серія «Машинобудування». – Київ, 2015. - №1(73) – с. 84-95. ISSN 2305-9001.
3. Радионов А.В. Комбинированные магнитожидкостные герметизаторы – эффективная альтернатива бесконтактным уплотнениям подшипниковых узлов с жидкой смазкой [Текст] / А.В. Радионов, А.Н. Виноградов // Збагачення корисних копалин: Наук.техн.зб. – 2009. – Вип. 35(76). – С.148-155.
4. Брановер Г.Г. Магнитная гидродинамика несжимаемых сред / Г.Г.Брановер, А.Б.Цинобер - М.: Наука, 1979. – 379 с.
5. Шерклиф Дж. Курс магнитной гидродинамики / Дж.Шерклиф – М.: Мир, 1967. – 319 с.

УДК 621.695

Кононенко А.П. д.т.н., проф., **Божко Р.И.**, аспирант

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, Украина

ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ НАГНЕТАТЕЛЬНЫХ ЭРЛИФТНЫХ УСТАНОВОК С РАДИАЛЬНЫМИ НАГНЕТАТЕЛЯМИ

***Аннотация.** Исследованы возможные области применения нагнетательных эрлифтных установок и факторы, ограничивающие применение эрлифтов традиционной конструкции. Выполнен численный анализ работы нагнетательной эрлифтной установки на примере использования в ее составе радиального нагнетателя ЦНВ 200/3,0. Доказано, что в сравнении с эрлифтной установкой традиционной технологической схемы работа эрлифтной установки с нагнетателем ЦНВ 200/3,0 в нагнетательном режиме, в диапазоне относительных погружений $a = (0,15 \div 0,95)$, обеспечивает увеличение высоты подъема жидкости и подачи эрлифта при практически равноценной энергетической эффективности.*

***Ключевые слова:** нагнетательный эрлифт, радиальный нагнетатель, высота подъема, коэффициент полезного действия, подача эрлифта*

Благодаря известным достоинствам эрлифты находят широкое применение в различных отраслях промышленности, в том числе и в строительном деле (для добычи и гидроподъема песка и гравия), подъема полезных ископаемых (конкреций) со дна водоемов, и т. д. [1, 2, 3]. Одним из перспективных направлений развития технологий в этой отрасли является использование эрлифтов для добычи сапропелей и пелоидов [3].

При эксплуатации эрлифтных установок традиционной конструкции движение жидкости (гидросмеси) по отводящему трубопроводу осуществляется самотеком, что