

1. *Тангаев И. А.* Буримость и взрываемость горных пород. – М.: Недра, 1978. – 184 с.

2. *Рогальский Б. С., Штогрин Е. А., Кушнир И. С.* Оценка буримости горных пород на открытых горных разработках // Горн. журн. – 1985. – № 12. – С. 41–44.

3. *Рогальский Б. С., Дмитриаш А. В., Романюк И. М.* Устройство для информационного обеспечения буровзрывных работ в карьерах // Уголь Украины. – 1989. – № 5. – С. 30–32.

4. *Единые нормы выработки (времени) на открытие горных работ для предприятий горнодобывающей промышленности.* Бурение. – М.: НИИ труда: ЦБНТ. – 1984. – 55 с.

5. *Зенков Ф. А., Печников А. И.* Справочник по техническому нормированию открытых горных работ. – М.: Недра, 1969. – 23 с.

УДК 537.81:51.001

## РОТОР З ПАСИВНИМИ НАДПРОВІДНИМИ МАГНІТНИМИ ПІДШИПНИКАМИ В УМОВАХ ГІРНИЧОГО ВИРОБНИЦТВА

*Г. В. Славко, канд. техн. наук (ДПУ, м. Кременчук)*

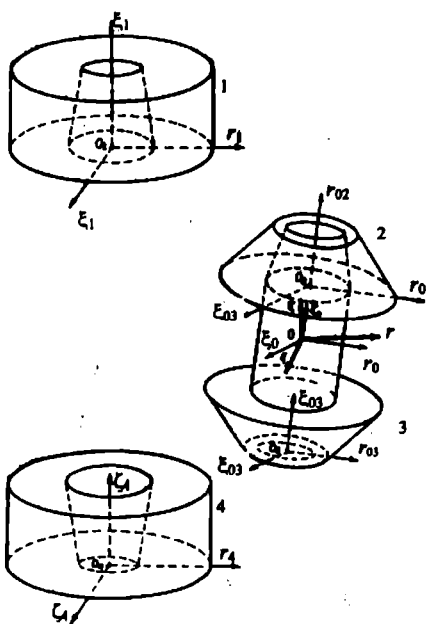
*Обоснована целесообразность использования в условиях горного производства бесконтактных сверхпроводимых пассивных магнитных подшипников, приведены их преимущества перед подшипниками трения. Построена математическая модель ротора с магнитными подшипниками, получены условия их стойкости, приведены рекомендации по оптимизации распределения механического напряжения.*

Жорсткі умови, в яких працює промислове устаткування кар'єрів, шахт, гірничо-збагачувальних комбінатів та підприємств по переробці сировини спонукають проводити дослідження з метою створення принципово нових типів устаткування. Особливу увагу слід звернути на експлуатаційні проблеми, які виникають в умовах підвищеної запиленості в пристроях з підшипниками тертя: підвищену зношуваність, перегрів, надмірну витрату мастильних матеріалів, необхідність очищення підшипників та встановлення захисних пристроїв, зниження коефіцієнта корисної дії. Все це призводить до передчасного виходу з ладу підшипників, і як наслідок, до простоїв під час проведення ремонтно-профілактичних робіт. Основною причиною підвищеного зносу є попадання пилу та частинок породи в мастильні матеріали і між поверхнями тертя.

Одним з найперспективніших засобів розв'язання зазначених проблем вважається магнітний підвіс ротора. Можна виділити два основні типи підшипників, що забезпечують стійкий магнітний підвіс ротора відносно

нерухомого статора: активні та пасивні. В активних магнітних підшипниках (АМП) стійкість підвісу забезпечується системою автоматичного керування, а в пасивних (ПМП) – використанням ефектів надпровідної левітації (вільного паріння). Нові можливості по створенню безконтактних магнітних підшипників відкриваються при використанні ефекту надпровідної пасивної магнітної левітації. Переваги ПМП над АМП особливо яскраво проявляються у важких експлуатаційних умовах гірничого виробництва. Вразливим місцем активних магнітних підшипників є пристрій, що забезпечує керування підвісом ротора. Це, як правило, складний електронний блок, який отримує інформацію за принципом зворотного зв'язку від чутливого елемента і забезпечує позиціонування ротора відносно статора. Забруднення компонентів чутливого пристрою може призвести до збільшення похибки вимірювання і вивести ротор із зони стійкості. А електростатичний заряд частинок пилу, наявність металевих домішок можуть створювати своєрідне екранування і впливати на індуктивне поле чутливих елементів.

Звичайні механічні підшипники відмовляють тому, що пил забиває зазори і мастильні матеріали не працюють. Для магнітних підшипників промислового



Модель ротора

використання властиве швидке обертання. Тому в цій роботі приділяється увага саме таким системам. Для забезпечення стійкої магнітної левітації з надпровідними підшипниками потрібно реалізувати криогенне охолодження, яке забезпечує надпровідність. Затрати на криогенне забезпечення значно нижчі, ніж втрати від нагрівання, тертя та використання мастил.

На рисунку наведена принципова схема ротора на надпровідних пасивних підшипниках. Дві кругові надпровідні котушки довільного перерізу розташовані так, що їхні осі співпадають, а відстань між ними незмінна (котушки 1 і 4). Друга пара котушок (2–3) також розташована на одній осі і відстань між ними фіксована.

Першу пару котушок (1–4) вважатимемо нерухомою, а другу пару (2–3) такою, що має шість степенів вільності відносно першої пари. Усі конструктивні елементи системи, крім котушок, виготовлені з немагнітного матеріалу. Точка

0, що лежить на спільній осі ротора (котушки 2-3), є центром мас ротора. Введемо системи координат, як показано на рисунку. Розглядана система вважається консервативною. Надпровідні кругові котушки моделюються сукупністю окремих кругових контурів. Прийmemo, що густина струму по контурах у межах однієї котушки однакова. Нехай  $\rho, \alpha, \zeta$  – циліндричні координати, які визначають положення центра мас ротора щодо статора, а  $\theta, \psi, \phi$  – кути Ейлера, що визначають орієнтацію ротора.

Магнітне поле, що створюються системою кількох струмових контурів, з високим ступенем точності може бути отримане на основі принципу суперпозиції. Нехай до складу системи входить  $n$  контурів. Тоді потокозчеплення контуру  $k$  визначаються рівнянням

$$\Psi_k = \sum_{j=1}^n \Psi_{kj} \quad (1)$$

Позначимо взаємні індуктивності двох контурів через  $l_{ij}$ , а власну індуктивність  $i$ -го контуру  $l_{ii}$ . Тоді

$$\Psi_k = \sum_{j=1}^n l_{kj} i_j, \quad k = 1, \dots, n, \quad (2)$$

де  $i_j$  – струм у  $j$ -му контурі. Система, для якої справедливі співвідношення (2), лінійна. Нехай система  $n$  контурів розбивається на чотири групи, кожна з яких являє собою котушку з однаковими струмами в контурах. Вважатимемо, що в  $\gamma$ -котушці  $N_\gamma$  контурів ( $\gamma = 1, \dots, 4$ ), причому  $\sum_{\gamma=1}^4 N_\gamma = n$ . Введемо такі

позначення:  $I_r$  – струм у котушці з номером  $r$ ,  $\Psi_r = \sum_{k=1}^{N_r} \Psi_{kr}$  – потік, зчеплений з котушкою  $r$ ,  $L_{rr} = \sum_{k=1}^{N_r} \sum_{j=1}^{N_r} l_{kj}$  – власна індуктивність котушки  $r$ ,  $L_{rt} = \sum_{k=1}^{N_r} \sum_{j=1}^{N_t} l_{kj}$  – взаємна індуктивність котушок  $r$  і  $t$ , де  $(r, t = 1, \dots, 4)$ . Запишемо систему

$$\Psi_r = \sum_{t=1}^4 L_{rt} I_t, \quad \text{де } (r = 1, \dots, 4). \quad (3)$$

Введемо позначення:

$$\Psi = \begin{pmatrix} \Psi_1 \\ \Psi_2 \\ \Psi_3 \\ \Psi_4 \end{pmatrix}, \quad I = \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{pmatrix}, \quad L = \begin{pmatrix} L_{11} & L_{12} & L_{13} & L_{14} \\ L_{21} & L_{22} & L_{23} & L_{24} \\ L_{31} & L_{32} & L_{33} & L_{34} \\ L_{41} & L_{42} & L_{43} & L_{44} \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Тоді систему (3) можна записати в матричному вигляді:

$$LI = \Psi. \quad (5)$$

З урахуванням введених позначень магнітна енергія системи:

$$W_M = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n \Psi_k I_k. \quad (6)$$

Користуючись тим, що у всіх контурах котушки струм однаковий, отримаємо:

$$W_M = \frac{1}{2} \Psi I. \quad (7)$$

Розв'язавши рівняння (5) відносно  $I$ , матимемо:

$$I = L^{-1} \Psi. \quad (8)$$

Підставивши  $I$  з (8) у (7), отримаємо

$$W_M = \frac{1}{2} L^{-1} \Psi^2. \quad (9)$$

Енергія магнітного поля, представлена через потоки і координати (взаємні індуктивності – функції координат, що визначають положення котушок) є потенціальною енергією. У силу ідеальної провідності котушок  $\Psi$  є константою. Слід також зазначити, що  $L_{ij} = L_{ji}$ .

Припустимо, що в деякому положенні вільного елемента системи (ротора) відносно нерухомого статора система живиться струмами  $I_0$ . Причому заведення струму здійснено так, що ротор в цьому положенні знаходиться у рівновазі при відсутності сили ваги. Для подвійного ротора зазначена умова заведення струму може бути реалізована, якщо забезпечити однакову силу притягання ротора котушками статора. У випадку симетричного ротора і статора умови вказаного живлення очевидні (однакові струми в котушках статора й однакові струми в котушках ротора, при однаковому зазорі між котушками ротора і статора). Прийmemo, що у положенні живлення системи (положення рівноваги при  $G=0$ ) усі котушки системи переводяться у надпровідний стан. Для цього положення виконується рівність

$$\Psi = L^0 I^0, \quad \text{де } L^0 = \begin{pmatrix} L_{11}^0 & L_{12}^0 & L_{13}^0 & L_{14}^0 \\ L_{21}^0 & L_{22}^0 & L_{23}^0 & L_{24}^0 \\ L_{31}^0 & L_{32}^0 & L_{33}^0 & L_{34}^0 \\ L_{41}^0 & L_{42}^0 & L_{43}^0 & L_{44}^0 \end{pmatrix}, \quad I^0 = \begin{pmatrix} I_1^0 \\ I_2^0 \\ I_3^0 \\ I_4^0 \end{pmatrix}, \quad \Psi = \begin{pmatrix} \Psi_1 \\ \Psi_2 \\ \Psi_3 \\ \Psi_4 \end{pmatrix}. \quad (10)$$

У цьому положенні відбувається також “заморожування” потокозчеплень  $\Psi$ , які надалі при зміні положення ротора відносно статора залишаються незмінними. При переміщенні ротора з зазначеного положення міняються взаємні індуктивності, а, отже, й струми, причому так, щоб забезпечувалося виконання співвідношення (5) при постійному  $\Psi$ . З огляду на сказане, потенціальну енергію магнітної взаємодії (9) можна переписати у вигляді

$$W_M = \frac{1}{2} L^{-1} (L^0 I^0)^2. \quad (11)$$

Якщо припустити, що система з чотирьох котушок знаходиться в однорідному і стаціонарному полі тяжіння Землі, причому вісь статора (нерухомої системи котушок) збігається з напрямком дії сили ваги, то повна потенціальна енергія системи дорівнюватиме

$$W = W_M \pm G\zeta = \frac{1}{2} L^{-1} (L^0 I^0)^2 \pm G\zeta, \quad (12)$$

де  $G$  – маса вільного ротора. Отримано формулу потенціальної енергії системи з вертикальною віссю обертання вільного ротора. Аналогічно може бути отримана потенціальна енергія системи з горизонтальною віссю обертання ротора:

$$W = W_M \pm G\rho = \frac{1}{2} L^{-1} (L^0 I^0)^2 \pm G\rho.$$

Якщо положення ротора визначається узагальненими координатами  $q = \{\rho, \alpha, \zeta, \theta, \psi, \varphi\}$ , то необхідні умови існування стійкої рівноваги знаходяться із системи рівнянь

$$P_q = -\frac{\partial W(q_0)}{\partial q} = 0, \text{ де } q_0 = \{\rho_0, \alpha_0, \zeta_0, \theta_0, \psi_0, \varphi_0\}. \quad (13)$$

Виконання умов (13) означає обернення в нуль узагальнених сил по координатах  $q$  у положенні рівноваги  $q_0$ .

Для систем з вертикальною віссю обертання найбільший інтерес для дослідження на стійкість викликають положення співвісності, а для систем з горизонтальною віссю обертання – положення квазіспіввісності статора і ротора. Можна показати, що для систем з вертикальною віссю обертання з струмовими елементами у вигляді котушок у положенні співвісності котушок статора і ротора ( $\rho = \theta = 0$ ,  $\zeta, \alpha, \varphi, \psi$  – довільні) виконуватимуться п'ять із шести необхідних умов:

$$\frac{\partial W}{\partial \rho} = \frac{\partial W}{\partial \theta} = \frac{\partial W}{\partial \alpha} = \frac{\partial W}{\partial \varphi} = \frac{\partial W}{\partial \psi} = 0, \quad (14)$$

а шоста умова може бути виконана для співвісності при деякому значенні  $\zeta$ :

$$G = -\frac{1}{2} \left( \frac{\partial L^{-1}}{\partial \zeta} \right) (L^0 I^0)^2. \quad (15)$$

Поблизу положення рівноваги (для малих збурень координат) потенціальна енергія  $W$  може бути розкладена в ряд:

$$W = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 W}{\partial \zeta^2} (\Delta \zeta)^2 + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 W}{\partial \rho^2} (\Delta \rho)^2 + \frac{\partial^2 W}{\partial \rho \partial \theta} \Delta \rho \Delta \theta + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 W}{\partial \theta^2} (\Delta \theta)^2, \quad (16)$$

де символ  $\Delta$  означає мале збурення відповідної координати, а другі похідні потенціальної енергії обчислені в положенні рівноваги і визначаються формулою

$$\frac{\partial^2 W}{\partial q_1 \partial q_2} = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 L^{-1}}{\partial q_1 \partial q_2} (L^0 I^0)^2, \quad (17)$$

де  $(q_1, q_2) = \{(\zeta, \zeta), (\rho, \rho), (\theta, \theta), (\rho, \theta)\}$ .

Згідно з теоремою Лагранжа–Діріхле, система буде стійкою, якщо функція  $W$  в положенні рівноваги матиме мінімум. Відповідно до критерію Сильвестра отримаємо достатні умови стійкості

$$\frac{\partial^2 W}{\partial \zeta^2} > 0, \quad \frac{\partial^2 W}{\partial \theta^2} > 0, \quad \frac{\partial^2 W}{\partial \rho^2} \frac{\partial^2 W}{\partial \theta^2} - \left( \frac{\partial^2 W}{\partial \rho \partial \theta} \right)^2 > 0, \quad (18)$$

де другі похідні визначаються з (17). Наведені умови стійкості системи з вертикальною віссю обертання без особливих змін у методиці можуть бути поширені на випадок ротора з горизонтальною віссю обертання.

Отримані результати необхідно враховувати не тільки при розрахунках, пов'язаних з вантажопідйомністю системи, але й при розрахунку систем на міцність. Для одержання розподілу механічних напружень в окремій котушці можна скористатися формулою силової взаємодії, якщо досліджувати взаємодію окремих елементів котушки з усіма іншими контурами. Чим на більше число моделюючих елементів буде розбита котушка, тим точнішою вийде картина. Силова взаємодія двох струмових елементів визначається за відомою формулою [1]

$$P = -I^2 \frac{\partial L_{12}}{\partial \zeta}, \quad (19)$$

де  $\partial L_{12} / \partial \zeta$  – похідна взаємної індуктивності малого елемента з усією іншою котушкою. Перебравши усі контури котушки, можна визначити картину розподілу механічних напружень у котушці. Таким чином, розподіл механічних напружень обумовлюється геометричними параметрами котушок і пропорційний квадрату струму, що протікає по контурах котушки.

При коливаннях вільної котушки щодо нерухомої, які приводять до зміни струмів, поле напруг, що створюється самою котушкою, змінюватиметься лише за величиною, зберігаючи напрямок. Зміна напрямків стискальних і розтяжних сил може відбуватися за рахунок впливу сторонньої котушки. Якщо враховувати, що сусідні контури взаємодіють, то в припущенні ізотропності властивостей обмотки задача про тангенціальні і радіальні напруження може бути розв'язана згідно з [1].

При низьких температурах у надпровідних котушках ізоляційні

матеріали, що виконують, крім того, роль фіксаторів контуру, стають крихкими. Розтяжні напруження при наявності локальних дефектів матеріалу можуть призводити до руйнувань, і, як наслідок, до виділення енергії, що сприяє переходу надпровідника в нормальний стан. Тому конструкція котушки повинна бути такою, щоб радіальні напруження, що її розтягують, зводилися до мінімуму. Розрахунки показують, що для створення товстої обмотки доцільно провести розбивку обмотки на кілька тонких концентричних секцій, які не мають механічного зв'язку. Крім того, необхідно враховувати, що для систем з вільно левітуючим ротором маса підвішеного елемента впливає на контури, створюючи додаткові аксіальні напруження. Слід також зазначити, що механічні напруження можуть призводити не тільки до руйнівних деформацій, але й до зміни властивостей надпровідних матеріалів. Крім того, під дією механічних напружень (при дуже високому рівні) знижується рівень критичного струму.

Таким чином, при проектуванні магнітного підвісу слід враховувати цілий ряд побічних ефектів, які можуть знижувати вантажопідйомність підвісу і стійкість його роботи. Наведені в роботі результати будуть корисними для проектування пристроїв з використанням пасивних надпровідних підшипників.

1. Уилсон М. Сверхпроводящие магниты: Пер. с англ. – М.: Мир, 1985. – 405 с.: ил.