

ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНЕ ГАЛЬМО ЛЕБІДКИ БУРОВОЇ УСТАНОВКИ

Вольченко О.І.¹, Фідровська Н.М.¹, Журавльов Д.Ю.²,
Возний А.В.¹, Семеній О.М.¹

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет

²Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Анотація. У матеріалах статті розглянуто теоретичні та дослідно-конструкторські розробки електродинамічного гальма бурової лебідки. Рушійною силою в процесах нагрівання та охолодження Т-подібних роторів гальма є градієнти температур шарів нанорідини, а уповільнювачем перебування за часом нанорідини в зонах випаровування є горизонтальні канали.

Ключові слова: бурова лебідка, електродинамічне гальмо, динамічні та конструктивні параметри, нанорідина, вихровий струм.

Вступ

У нафтогазовій промисловості, особливо під час буріння глибоких свердловин, здебільшого для бурових лебідок використовують стрічково- та дисково-колодкові гальма, але останнім часом все частіше стали застосовувати й електродинамічне гальмо, призначення якого – утримання бурильної колони в статичному й динамічному стані у свердловині. Основним недоліком останнього є потреба в постійному охолодженні Т-подібних магнітних роторів, розташованих на підйомному валу бурової лебідки. Тому покращення системи охолодження електродинамічного гальма є актуальною проблемою.

Аналіз публікацій

Відоме магнітне гальмо, яке містить нерухомий магнітопровід, обладнаний обмотками збудження, що живляться від джерела постійного струму. У цьому разі два Т-подібних ротора мають в їх нижній частині феропорошок і циркуляційну систему рідинного охолодження.

З метою підвищення надійності в роботі порожнини охолодження рідинної системи розташовані коаксіально щодо робочих зазорів із зовнішнього та внутрішнього боку магнітопроводу.

Порожнини охолодження утворені виконаними в тілі магнітопроводу западинами, закритими пластинами. Недоліком магнітного гальма є складна й малоефективна система охолодження Т-подібних роторів.

Комбіноване гальмо (стрічково-колодкове та індукційне) у лебідках бурових установок виявилось складним щодо конструктивного виконання, а також без примусового рідинного охолодження [1].

У роботі [2] зубчастий проміжок робочої зони магнітопроводу дископодібного електродинамічного гальма подано рівномірним з розміщеними на його поверхні уявними струмами, що створюють таке саме магнітне поле, як і в реальному зубчастому повітряному проміжку. Величину зазору $d_{екв}$ цього рівномірного проміжку знайдено, зважаючи на збереження значення постійного складника розподілу магнітної індукції B_0 в робочій зоні магнітопроводу електродинамічного гальма за умови заданих ампер-витків обмотки збудження. У праці [3] запропоновано спрощену модель розрахунку струмів у електродинамічному гальмі дископодібної форми. У наведених студіях нічого не сказано про примусове охолодження дископодібного електродинамічного гальма під час дії вихрових струмів на його поверхні.

Мета й постановка завдання

Метою статті є покращення системи охолодження Т-подібних магнітних роторів гальма, розташованих на підйомному валу лебідки бурової установки.

Завданням дослідження є покращення системи охолодження електродинамічного гальма. Технічний результат досягається тим, що для працездатності Т-подібні ротори містять канали, які розташовані у вертикальній та горизонтальній площинах і заповнені нанорідиною. У цьому разі система охолодження працює на ефекті теплової труби.

Конструкція та робота електродинамічного гальма

На рис. 1, а зображено описуване гальмо, а на рис. 1, б – поздовжній розріз частини Т-подібного ротора з вертикальними та гори-

зонтальними каналами, заповненими нанорідиною.

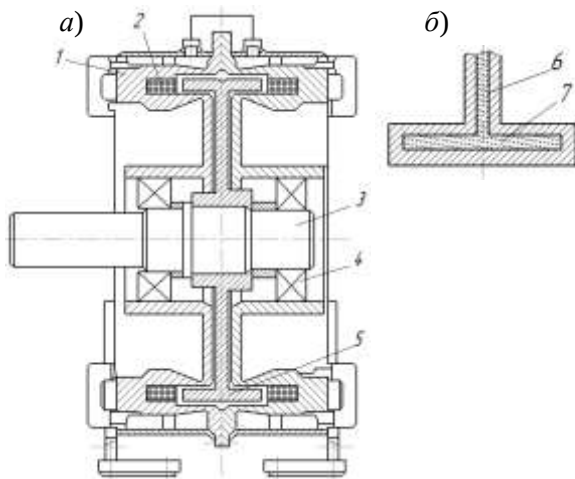


Рис. 1, а, б. Електродинамічне гальмо лебідки бурової установки: 1 – нерухомий магнітопровід; 2 – котушка збудження; 3 – підйомний вал; 4 – підшипники; 5 – Т-подібні ротори; 6, 7 – вертикальні й горизонтальні канали

Роторне гальмо з охолодженням містить нерухомі магнітопроводи 1, всередині яких розташовані котушки збудження 2. На підйомному валу 3, що обертається в підшипниках 4, встановлені Т-подібні ротори 5. Робочі поверхні роторів 5 розташовані між полюсами магнітопроводів 1. У тілі Т-подібних роторів 5 виконані канали 6 та 7, розташовані у вертикальній та горизонтальній площинах та заповнені нанорідиною.

Як остання в системі охолодження застосовані легкоплавкі метали Na ($t_n = 97,79^\circ\text{C}$) і Li ($t_n = 180,5^\circ\text{C}$) у вигляді порошків, змішаних з водою, і називаються нанорідинами. Вони використовуються залежно від енергонавантаженості частин Т-подібних роторів 5 та обертаються біля котушок збудження 2. Для гальма застосовується порошок літію (Li) у нанорідині (50 % літійового порошку та 50 % води), що здатний відводити значні теплові потоки (приблизно $15,0 \text{ кВт/см}^2$ за поверхнево-об'ємної температури 800°C). Системи охолодження заправляється крізь клапани (на рисунку не показано), вмонтовані в тіло вертикальних складників Т-подібних роторів 5, на $\frac{3}{4}$ всього об'єму каналів кожного ротора. Аналогічно монтується випускний клапан, що вмикається в разі аварійного тиску нанорідини. Крім того, сама нанорідина в системі охолодження через агрегатний стан не показана.

Феромагнітний порошок (на рисунку не показано), що міститься в робочих зазорах за наявності струму в котушках збудження 2 втягується в ці зазори та створює тертя між нерухомими полюсами магнітопроводів і обертовими Т-подібними магнітними роторами 5. Гальмівний момент прямо пропорційний струму збудження.

Зони випаровування та конденсації (верхні та нижні частини ротора) під час кожного повороту на 180° стають зонами конденсації та випаровування нанорідини, що інтенсифікує ефект «теплових труб», розташованих у роторі у двох взаємно перпендикулярних площинах.

Теоретичні засади електродинамічного гальма

Зупинимось на динамічних і конструктивних параметрах електродинамічного гальма.

Співвідношення магнітних індукцій в зазорі центральної частини та робочої зони магнітопроводу знаходимо з умови неперервності магнітного потоку [4]:

$$B_{\text{ц}} \cdot A_{\text{ц}} = B_n \cdot A_n,$$

де $B_{\text{ц}}$ – магнітна індукція в зазорі з феропорошком магнітопроводу; $A_{\text{ц}}$ – площа поверхні, що прилягає до зазору магнітопроводу; A_n – сумарна площа поверхонь, обернених до зазору магнітопроводу.

Магнітний потік у центральній частині магнітопроводу має залишитись незмінним у процесі переходу на рівномірний зазор у робочій зоні магнітопроводу:

$$B_{\text{ц}} \cdot A_{\text{ц}} = B_0(S_n), \text{ що дає } B_0 = \frac{B_{\text{ц}} A_{\text{ц}}}{A_n}.$$

Якщо брати до уваги, що $B_z = k \cdot B_{\text{ц}}$, де $0 < k < 1$, то можна записати $B_{\text{ц}} A_{\text{ц}} = B_0(k \cdot A_n)$.

Оскільки повітряний зазор у центральній частині магнітопроводу однаковий, то ампер-витки обмотки збудження електродинамічного гальма з феромагнітним порошком роторів розподіляються пропорційно магнітним індукціям:

$$iW = d \left(\frac{B_{\text{ц}}}{\mu_0} + \frac{B_0}{\mu_0} \right).$$

У процесі переходу до електродинамічного гальма з рівномірним феромагнітним про-

міжком у робочій зоні магнітопроводу для величини еквівалентного зазору $d_{\text{екв}}$ справедливе співвідношення:

$$iW = d \frac{B_{\text{ц}}}{\mu_0} + d_{\text{екв}} \frac{B_0}{\mu_0},$$

звідси

$$d_{\text{екв}} = d \frac{B_{\text{ц}}}{B_0} = d \frac{S_n}{kS_n}.$$

Отже, для визначення еквівалентної величини феромагнітного проміжку необхідно знайти відношення k середнього значення магнітної індукції посередині зазору.

За умови $k \approx 0$ $d_{\text{екв}} = d$, тобто еквівалентний зазор із феропорошком у разі близьких значень площ відповідних поверхонь має такий самий порядок, як і реальний зазор у електродинамічному гальмі.

Розглянемо магнітне поле в феромагнітному проміжку електродинамічного гальма при нерухомому Т-подібному роторі як суму хвиль магнітної індукції, яка в феромагнітному проміжку має лише один складник.

Припустимо, що ротор має однакові у всіх напрямках товщину Δ , магнітну (μ) та діелектричну (ϵ) проникність, електропровідність σ .

У цьому разі вихрові струми ротора, які виникають унаслідок його обертання, не будуть змінювати гармонічний склад розподілу магнітної індукції, впливаючи лише на амплітуду та фазу кожної хвилі магнітної індукції результуючого поля.

Розглянемо в ділянці зазору робочої зони довільну хвилю магнітної індукції B_{zv} з числом пар полюсів v в системі координат z, ρ, φ_c , нерухомій щодо статора: $B_{zv} = B_{zav} \cos v\varphi_c$.

Амплітуда B_{za} хвилі магнітної індукції в феромагнітному зазорі загалом може залежати від координати ρ .

Для створення такої хвилі магнітної індукції проміжку $d_{\text{екв}}$ на поверхні індуктора з боку феромагнітного проміжку мають протікати поверхневі струми з лінійним навантаженням $\bar{J}_v$, значення якого визначається законом складників повного струму:

$$\begin{aligned} \bar{J}_V &= J_{vp} + \bar{I}_p + J_{vp} \cdot \bar{I}_\varphi = \\ &= \frac{d_{\text{екв}}}{\rho} \frac{\partial H_{zv}}{\partial \varphi_c} \cdot \bar{I}_p - d_{\text{екв}} \frac{\partial H_{zv}}{\partial \rho} \cdot \bar{I}_\varphi, \end{aligned} \quad (1)$$

де $H_{zv} = \frac{1}{\mu_0} B_{zv}$ – напруженість магнітного

поля в напрямку координати z для хвилі з числом пар полюсів v у феромагнітному зазорі.

Отже, в системі координат, нерухомій щодо магнітопроводу:

$$J_{vp} = -\frac{vd_{\text{екв}}}{\mu_0 \rho} B_{zav} \sin v\varphi_c; \quad (2)$$

$$J_{v\varphi} = -\frac{d_{\text{екв}}}{\mu_0} \frac{\partial B_{zav}}{\partial \rho} \cos v\varphi_c. \quad (3)$$

Під час обертання ротора в напрямку φ_c з кутовою швидкістю ω координата φ в системі координат, нерухомій щодо ротора, для фіксованої точки магнітопроводу з координатою φ_c матиме вигляд $\varphi = \varphi_c - \omega t$ за умови збігу систем координат, коли $t = 0$. Тоді складники лінійного навантаження в системі координат, пов'язаній з Т-подібним ротором, записуються так:

$$J_{vp} = -\frac{vd_{\text{екв}}}{\mu_0 \rho} B_{zav} \sin v(\varphi + \omega t); \quad (4)$$

$$J_{v\varphi} = -\frac{d_{\text{екв}}}{\mu_0} \frac{\partial B_{zav}}{\partial \rho} \cos v(\varphi + \omega t). \quad (5)$$

Аналогічно в системі координат ротора вираз для хвилі магнітної індукції буде $B_{zv} = B_{zav} \cos v(\varphi + \omega t)$.

Це магнітне поле є першопричиною виникнення вихрових струмів у Т-подібному роторі. Математична викладка є основою для визначення вихрових струмів у Т-подібному роторі електродинамічного гальма під час його обертання в магнітному полі індуктора.

Індукційні струми не завжди протікають чітко визначеними шляхами – у провідниках котушок збурення.

Розглянемо диск Т-подібного ротора (рис. 2, а). Магнітне поле існує на точкових поверхнях диска й ротора, виділеному лише на рис. 2, б, і напрямлено за рисунок. Там, де є магнітне поле, у диску наводиться ЕРС, оскільки диск обертається (і разом з ним рухаються електрони). Електричний струм (позитивних зарядів) спрямований вгору на рис. 2 б, а поза полем – вниз. Подібні струми називаються вихровими; вони виникають у будь-якому провіднику, що рухається в маг-

нітному полі або через який змінюється магнітний потік.

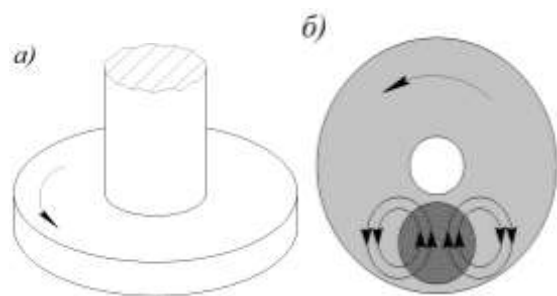


Рис. 2 а, б. Збурення вихревих струмів в обертovому диску Т-подібного ротора

Магнітне поле на рис. 2. а, б взаємодіє з індукційними вихровими струмами та створює силу, яка (згідно з правилом правої руки) гальмує обертання. Цей ефект використовується для плавного гальмування бурової лебідки. Вихрові струми можна використовувати для демпфування (гасіння) коливань гальм бурової лебідки. Але вихрові струми створюють проблеми, оскільки в роторах електродвигунів і генераторів призводять до виділення тепла ($P = I^2 R$) та втрат енергії. Для зменшення вихрових струмів тіло ротора й диска роблять набірними (пластинчастими): їх набирають з великої кількості тонких металевих листів, добре ізольованих один від одного.

Це збільшує опір для вихрових струмів, які обмежені тонкими шарами провідного матеріалу. Завдяки цьому повна довжина шляху вихрових струмів виявляється обмеженою товщиною пластини, що збільшує повний опір цим струмам, а отже, струми слабшають і втрати енергії зменшуються.

Обговорення результатів

Теоретичні та дослідно-конструкторські розробки електродинамічного гальма для лебідок бурових установок дали змогу в матеріалах статті сформулювати такі висновки:

- встановлено закономірності зміни магнітного потоку, що розвивається в гальмі залежно від їх динамічних і конструктивних параметрів; з'ясовано природу виникнення вихрових струмів на елементах гальма та запропоновано конструктивне рішення щодо їх зменшення;

- застосування для рідини нанопорошків легкоплавких металів різних модифікацій, розбавлених водою або ацетоном, дає змогу значно збільшити коефіцієнт теплопровідності нанорідини й завдяки цьому покращити

ефективність примусового охолодження тіла роторів гальма;

- наявність зон випаровування та конденсації за допомогою обертання Т-подібних роторів інтенсифікує теплообмін за допомогою ефекту теплової труби;

- об'єми нанорідини в зонах випаровування набагато більші, ніж у зонах її конденсації, що інтенсифікує теплообмін у різному агрегатному стані нанорідини внаслідок збільшення циклів її циркуляції;

- рушійною силою в процесах нагрівання та охолодження Т-подібних роторів гальма є градієнти температур шарів нанорідини, що мають місце в зонах випаровування та конденсації у вертикальних і горизонтальних каналах. У процесі обертання відцентрова сила жене нанорідину на внутрішні стінки вертикальних каналів. Уповільнювачем перебування за часом нанорідини в зонах випаровування є горизонтальні канали.

Висновок

Проведене дослідження дає змогу значно збільшити коефіцієнт теплопровідності нанорідини й цим покращити ефективність примусового охолодження тіла роторів гальма.

Література

1. Кашуба М.В. Підвищення ефективності роботи фрикційних вузлів бурових лебідок за рахунок індукційного гальмування: автореф. канд. дис. за спеціальністю 05.05.03. Харків, 2014. 23 с.
2. Циганкова Г.А. Електромагнітна модель електродинамічного гальма із зубцево-пазевою конфігурацією зазору індуктора. Праці Інституту електродинаміки НАН України, 2013. Вип. 34. С. 41–45.
3. Циганкова Г.А. Спрощення моделі розрахунку струмів в електродинамічному гальмі дископодібної форми. XXI Міжнародна науково-практична конференція «Theoretical methods of research of the latest problems», Прага, Чехія, 2024. С. 1–5.
4. Бойко В.С., Бойко В.В., Видолуб Ю.Ф. Курило І.А., Шеховцов В.І., Шидловська Н.А. Теоретичні основи електротехніки. Т. 3. Київ, 2013. 244 с.

References

1. Kashuba M.V. Increasing the efficiency of the friction units of drilling winches due to induction braking: author's abstract of candidate's thesis in specialty 05.05.03. Kharkiv, 2014. 23 p.
2. Tsygankova G.A. Electromagnetic model of an electrodynamic brake with a tooth-and-groove configuration of the inductor gap. Proceedings of the Institute of Electrodynamics of the NAS of Ukraine, 2013. V. 34. P. 41–45.

3. Tsygankova G.A. Simplification of the model for calculating currents in an electrodynamic brake of a disk-shaped shape. XXI International Scientific and Practical Conference "Theoretical Methods of Research of the Latest Problems", Prague, Czech Republic, 2024. P. 1–5.
4. Boyko V.S., Boyko V.V., Vydolyub Yu.F. Kurylo I.A., Shekhovtsov V.I., Shydlovska N.A. Theoretical Foundations of Electrical Engineering. Vol. 3, Kyiv, 2013. 244 p.

Вольченко Олександр Іванович¹, д.т.н., проф.

каф. будівельних і дорожніх машин,
divo99@ukr.net, тел. +38 066-491-21-98,

Фідровська Наталія Миколаївна¹, д.т.н., проф.,

зав. каф. будівельних і дорожніх машин,
nfidrovskaya@ukr.net, тел. +38 099-790-55-34,

Журавльов Дмитро Юрійович², д.т.н., доц. каф.

технічної механіки, інженерної та комп'ютерної
графіки, dmytro.2103@ukr.net,
тел. +38 050-950-04-18,

Возний Андрій Володимирович¹, к.т.н., докто-

рант каф. будівельних і дорожніх машин,
andrii.voznyi@gmail.com, тел. +38 097-890-86-38,

Семеній Олександр Михайлович¹, аспірант каф.

будівельних і дорожніх машин,
alexander.psy@gmail.com, тел. +38 050-588-22-54.

¹Харківський національний автомобільно-
дорожній університет, 61002, Україна, м. Харків,
вул. Ярослава Мудрого, 25.

²Івано-Франківський національний технічний
університет нафти і газу, 76000, Україна,
м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15

Electrodynamic brake of the drilling rig winch

Abstract. Problem. In the oil and gas industry, especially when drilling deep wells, in addition to the band and disc-pad brakes of the drilling winch, an electrodynamic brake is increasingly being used as the main one, the purpose of which is to maintain the drill string in a static and dynamic state in the well. The main disadvantage of the latter is the need for constant cooling of the T-shaped magnetic rotors, which are located on the lifting shaft of the drilling winch. Therefore, improving the cooling system of the electrodynamic brake is an urgent problem.

Goal. The purpose and objective of the materials of the article is to improve the cooling system of the T-shaped magnetic brake rotors located on the lifting shaft of the drilling rig winch. **Methodology.** In the

process of studying the issue, the analytical method and decision-making methods were used to improve the cooling system of T-shaped magnetic brake rotors. **Results.** Thus, the problem of the theoretical part of the electrodynamic brake, forced cooling with a nanofluid, and a constructive solution to reduce eddy currents generated by point effects have been solved. **Originality.** Application of nanopowders of low-melting metals of various modifications, diluted with water or acetone, for the liquid, which allows for a significant increase in the thermal conductivity coefficient of the nanofluid and thereby improves the efficiency of forced cooling of the brake rotor body. **Practical value.** Improving the cooling system of the electrodynamic brake allows you to increase its braking efficiency by 15% significantly and, as a result, reduce the downtime of the drilling rig and the costs associated with the repair and replacement of rotors. **Key words:** drilling winch, electrodynamic brake, dynamic and design parameters, nanofluid, eddy current.

Volchenko Oleksandr¹, Professor, Doctor of Technical Sciences, Head of Department of Construction and Road Machinery, divo99@ukr.net,

tel. +38 066-491-21-98,
ORCID: 0000-0003-0388-8351,

Fidrovskaya Natalia¹, Professor, Doctor of Technical Sciences, Department of Construction and Road Machinery, nfidrovskaya@ukr.net,

tel. +38 099-790-55-34,
ORCID: 0000-0002-5248-273X,

Zhuravlev Dmytro², Associate Professor, Doctor of Technical Sciences, Department of Technical Mechanics, Engineering and Computer Graphics, dmytro.2103@ukr.net, tel. +38 050-950-04-18,
ORCID: 0000-0002-2045-9631,

Voznyi Andrii¹, Ph.D., PhD, Department of Construction and Road Machinery,

andrii.voznyi@gmail.com, tel. +38 097-890-86-38,

Semenii Oleksandr¹, Postgraduate Student of the Department of Construction and Road Machinery, alexander.psy@gmail.com, tel. +38 097-890-86-38,
ORCID: 0009-0004-2464-6508.

¹Kharkov National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

²Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, 76000, Ukraine, Ivano-Frankivsk, Karpatka St., 15.