УДК 631.3 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.1.16

О. В. РАДІОНОВ
доктор технічних наук, професор,
професор кафедри технічного сервісу
Сумський національний аграрний університет
ORCID: 0000-0001-7282-578X

О. І. АЛФЬОРОВ
доктор технічних наук, професор,
професор кафедри проектування технічних систем
Сумський національний аграрний університет
ORCID: 0000-0002-6304-6925

Н. В. ТАРЕЛЬНИК
кандидат економічних наук, доцент,
доцент кафедри проектування технічних систем
Сумський національний аграрний університет
ORCID: 0000-0002-6304-6925

В. В. ПОСТОЛАТІЙ
аспірант кафедри технічного сервісу
Сумський національний аграрний університет
ORCID: 0009-0008-6008-0168

М. А. КУСКОВ
аспірант кафедри надійності та міцності машин і споруд
імені В. Я. Аніловича
Харківський державний біотехнологічний університет
ORCID: 0000-0001-7204-9872

ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ДЛЯ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОГО ВИРОБНИЦТВА ШЛЯХОМ ВПРОВАДЖЕННЯ МАГНІТОРІДИННИХ ГЕРМЕТИЗАТОРІВ

Підвищення надійності сільськогосподарського обладнання є актуальним завданням. З цих позицій важливо розглянути експлуатацію асинхронних електродвигунів (АД). Дані електродвигуни застосовуються у важких умовах експлуатації та мають досить високий рівень аварійності. Одним із шляхів продовження експлуатаційного циклу є практично повне запобігання потраплянню забруднюючих речовин усередину АД. Забезпечити необхідний рівень герметичності можна застосуванням нового типу ущільнень – магніторідинних герметизаторів.

Метою даної роботи є комп'ютерне моделювання і дослідження просторового розподілу в активній області герметизатора обертового валу магнітного поля, магнітних сил, що діють на магнітні частинки мікронного розміру, а також швидкості магнітофоретичного руху частинок під дією цих сил. У цьому використовується чисельний метод кінцевих елементів, реалізований у пакеті програм Comsol.

У роботі отримано такі основні результати. Виконаний за допомогою програми Comsol кінцево-елементний розрахунок розподілу магнітної індукції в активній зоні герметизатора зі збільшеним зазором (0,8 мм) для двох випадків – 1) коли вал, що обертається, є гладким і 2) за наявності дефекту на валу. Вперше аналітично розглянуто режим, коли в робочу магнітну рідину додатково вводяться магнітні частинки мікронного розміру згідно з патентом України № 10642. Показано розподіл зон, що характеризуються максимальною локальною неоднорідністю цього поля, що визначає величину та напрямок магнітної сили, що діє на мікроскопічні частинки магнітної рідини. Отримано розрахунковим шляхом розподіл магнітної сили, що діє на мікрочастинки різного діаметра (0,1–10 мкм), та швидкості руху цих частинок під дією цієї сили. Показано, що ці частинки концентруються в зонах з неоднорідним полем – у кутових зона зубців магнітної системи та поблизу дефекту на валу, причому характерний час перебігу перехідного процесу для частинок діаметром 0,1, 1 та 10 мкм становить відповідно 630, 6,3 та 0,063 хв. Додавання мікронних частинок до робочого зазору герметизатора дозволяє збільшити до трьох разів величину даного зазору при збереженні надійності в експлуатації. Виконаний розрахунок показав можливість застосування технології згідно з патентом України № 10642. Використання МРГ з підвищеними проміжками довели адекватність розробленої математичної моделі.

Ключові слова: *електродвигун, надійність, вал, працездатність, сільськогосподарське виробництво, ущільнення, магніторідинний герметизатор, наночастинки, мікрочастинки, метод кінцевих елементів, магнітне поле, магнітна індукція, силові лінії.*

A. V. RADIONOV
Doctor of Engineering, Professor,
Professor at the Department of Technical Service
Sumy National Agrarin University
ORCID: 0000-0001-7282-578X

O. I. ALFOROV
Doctor of Engineering, Professor,
Professor at the Department of Technical System Designs
Sumy National Agrarin University
ORCID: 0000-0002-6304-6925

N. V. TARELNYK
Candidate of Economic Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Technical System Designs
Sumy National Agrarian University
ORCID: 0000-0002-6304-6925

V. V. POSTOLATII
Postgraduate Student at the Department of Technical Service
Sumy National Agrarian University
ORCID: 0009-0008-6008-0168

M. A. KUSKOV
Postgraduate Student at the Department of Reliability, Strength and Technical Service of Machines named after V. Ya. Anilovich
Kharkiv State Biotechnology University
ORCID: 0000-0001-7204-9872

IMPROVING THE RELIABILITY OF ASYNCHRONOUS ELECTRIC MOTORS FOR AGRICULTURAL PRODUCTION BY IMPLEMENTING MAGNETIC SEALING TECHNOLOGIES

Improving the reliability of agricultural equipment is an urgent task. From these positions, it is important to consider the operation of asynchronous motors (AM). These electric motors are used in severe operating conditions and have a fairly high accident rate. One of the ways to extend the operational cycle is to almost prevent the pollutants penetration completely inside the AM. It is possible to ensure the required level of tightness by using a new type of seal – magnetofluid seals.

The purpose of this work is computer modelling and the spatial distribution study in the active region of the rotating shaft seal of the magnetic field, magnetic forces acting on micron-sized magnetic particles, as well as the velocity of magnetophoretic motion of particles under the action of these forces. The numerical finite element method implemented in the Comsol software package is used in this work.

The following main results were obtained in this work. The finite-element calculation of magnetic induction distribution in the active zone of the seal with an increased gap (0.8 mm) for two cases – 1) when the rotating shaft is smooth and 2) in the presence of a defect on the shaft has been performed using the Comsol program. For the first time analytically considered the mode when additional magnetic particles of micron size are added to the working magnetic fluid according to the patent of Ukraine № 10642. The distribution of zones characterized by maximum local inhomogeneity of this field determining the magnitude and direction of the magnetic force acting on microscopic particles in magnetic fluid is shown. The distribution of magnetic force acting on microparticles of different diameters (0.1–10 microns) and the velocity of motion of these particles under the action of this force is obtained by calculation. It is shown that these particles concentrate in zones with inhomogeneous field – in the angular zone of the teeth of the magnetic system and near the defect on the shaft, and the characteristic time of the transient process for particles with diameters of 0.1, 1 and 10 microns is 630, 6.3 and 0.063 min, respectively. The addition of micron particles to the working gap of the seal allows it to increase up to three times the value of this gap while maintaining reliability in operation. The performed calculation showed the possibility of application of the technology according to the patent of Ukraine № 10642. Implementation of MFS with increased gaps proved the adequacy of the developed mathematical model.

Key words: *electric motor, reliability, shaft, performance, agricultural production, seal, magnetofluid seal, nanoparticles, microparticles, finite element method, magnetic field, magnetic induction, power lines.*

Вступ

Сільськогосподарське виробництво зумовлює широке застосування електроенергії у всіх галузях. Найпоширенішим і енергоємним споживачем електроенергії, яка витрачається на виробничі цілі, на сьогоднішній день є електропривід. Умови експлуатації електроприводу в сільському господарстві суттєво відрізняється від промислових. Це пояснюється децентралізованістю його розташування, використанням електроприводу в приміщеннях з наявністю хімічно активних газів при підвищеній вологості, відсутністю технічних засобів, які забезпечують рівномірність завантаження робочих машин, сезонністю роботи та ін.

Приблизно 95% від усіх використовуваних електроприводів припадає на асинхронні електродвигуни (АД) з короткозамкненим ротором. Проте їхня експлуатаційна надійність залишається ще недостатньою. Щорічний вихід із ладу великий і сягає, за окремими галузями, до 20–25% [1].

Аварійність АД завдає великої шкоди сільськогосподарському виробництву. Цей збиток складається з прямої шкоди (вартість електродвигуна або його капітального ремонту та витрат на його заміну) та технологічного збитку, який завдається виробництву через простої технологічного обладнання або псування продукції внаслідок аварії на АД.

АД є прикладом складної системи, на безвідмовність роботи якої впливає безліч чинників. Ремонт електродвигунів та їх частин є трудомістким процесом, який потребує значного обсягу ручної праці. Також необхідно враховувати, що основну частину АД ремонтують самі споживачі. Як правило, ремонт ведеться за спрощеною технологією, з низькою продуктивністю праці [2].

Тому виявлення причини виходу з ладу, оптимізація технології відновлення та продовження міжремонтного часу для найбільш вузьких місць АД є актуальним завданням.

Постановка проблеми

Продовження міжремонтного циклу експлуатації АД можна досягти шляхом забезпечення практичного повного запобігання потраплянню забруднюючих речовин і вологи всередину електродвигуна.

Незважаючи на значний прогрес у галузі герметології та різноманіття конструктивних рішень, проблема вибору такого ущільнення є досить складною. Це пов’язано з тим, що потенційні можливості традиційних ущільнень значною мірою вичерпали себе та вони не здатні забезпечити абсолютну герметичність [3].

Одним із можливих шляхів вирішення цієї проблеми є застосування нового типу ущільнень – магніторідинних герметизаторів (МРГ), основною перевагою яких є можливість забезпечення практично повної герметичності.

Серед інших важливих переваг МРГ виділимо наступні: мінімальний знос внаслідок чисто рідинного тертя в зазорі між рухомими та нерухомими елементами; відсутність необхідності в змащенні; низькі втрати потужності та малий момент опору; висока ремонтопридатність; простота обслуговування; працездатність в статиці та динаміці; самовідновлення у разі аварійного прориву ущільненої середи та ін. [4, 5].

Основним недоліком МРГ є проблема експлуатації при підвищених зазорах між валом, що обертається, і корпусом ущільнення. У літературі відсутні дані про можливості експлуатації МРГ при робочих зазорах більше 0,3 мм. У той же час аналіз умов роботи електродвигунів у сільськогосподарському виробництві показує, що цей параметр має бути збільшений щонайменше до 0,5 мм.

Одним із можливих шляхів вирішення проблеми є створення комбінованих ущільнень, які поєднують переваги традиційних та магніторідинних систем герметизації.

Проте, для АД, які серійно випускаються, як правило, не вистачає місця для розміщення комбінованого ущільнення. Тому, цей шлях обмежений у реалізації та застосовується на електродвигунах великої потужності (від 1МВт і вище), які в сільському господарстві застосовуються дуже рідко [6].

Компенсувати різке ослаблення магнітного поля при збільшених робочих зазорах і, як наслідок, погіршення ущільнювальних властивостей МРГ можна шляхом додавання в магнітну рідину перед заправкою мікронних частинок феромагнітного порошку при їх інтенсивному перемішуванні [7].

Це забезпечує їх введення в робочий зазор МРГ і осадження на поверхні концентраторів магнітного потоку в області найбільшої магнітної індукції. Таким чином, можна зменшити величину робочого зазору. Стримує розвиток цього методу не вивченість процесів впливу магнітного поля на магнітні частинки мікронного розміру, а також швидкості магнітофоретичного руху частинок під дією цих сил.

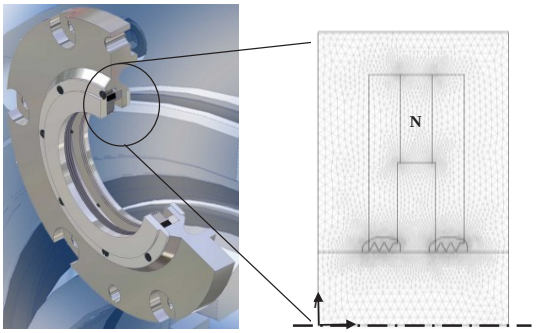
Формулювання мети дослідження

Метою даної роботи є комп'ютерне моделювання та дослідження просторового розподілу в активній області герметизатора обертового валу магнітного поля, магнітних сил, які діють на магнітні частинки мікронного розміру, а також швидкості магнітофоретичного руху частинок під дією цих сил. При цьому використовується чисельний метод кінцевих елементів, який реалізований у програмному середовищі Comsol [8].

Розрахунок магнітного поля в активній зоні герметизатора. Принцип роботи МРГ заснований на взаємодії магнітної рідини з магнітним полем магнітної системи герметизатора, при якому забезпечується герметизація внутрішньої області пристрою по відношенню до зовнішньої області за наявності обертового валу. Типова конструкція МРГ циліндричного типу показано на рис. 1 і містить магнітну систему з постійним магнітом, який

намагнічений в осьовому напрямку. Всередині магнітної системи знаходиться обертовий вал (не показаний на рис. 1, а), в зазорі якого під полюсами, що мають зубчасту структуру для отримання різконеоднорідного магнітного поля, знаходиться магнітна рідина, яка утримується під дією магнітних сил і забезпечує герметизацію внутрішнього середовища за певного перепаду тиску Δp в осьовому напрямі.

Досліджуваний герметизатор характеризується осьовою симетрією, звідси полева задача може вирішуватися у двовимірній постановці в циліндричній системі координат у площині rOz. Розрахункова область для аналізу магнітного поля наведена на рис. 1 б і містить області з магнітними матеріалами трьох типів: постійні магніти, намагнічені в осьовому напрямку, феромагнітний матеріал полюсів магнітної системи і обертового валу, а також область, яка зайнята магнітною рідиною. Характеристики намагнічування цих матеріалів будуть розглянуті далі.



a) b)

Рис. 1. Загальний вигляд типової конструкції герметизатора:
а) – розрахункова область активної зони МРГ; б) – кінцево-елементна сітка;

Полева задача розглядається як магнітостатична і вирішується в осесиметричній постановці в циліндричній системі координат у площині r0z для векторного магнітного потенціалу $\boldsymbol{A}$, який має єдину φ – компоненту, тобто $\boldsymbol{A} = (0, A_\varphi, 0)$.

Із системи диференціальних рівнянь Максвелла для стаціонарного магнітного поля

$$\nabla \times \boldsymbol{H} = 0, \quad \boldsymbol{B} = \nabla \times \boldsymbol{A}, \ \nabla \cdot \boldsymbol{A} = 0 \tag{1}$$

та рівняння стану магнітного матеріалу, записаного у загальному випадку як

$$\boldsymbol{B} = \mu_0 \mu_r \boldsymbol{H} + \boldsymbol{B}_r \tag{2}$$

отримаємо наступне диференціальне рівняння для векторного потенціалу

$$\nabla \times [(\mu_0 \mu_r)^{-1} \nabla \times \boldsymbol{A} - (\mu_0 \mu_r)^{-1} \boldsymbol{B}_r] = 0 \tag{3}$$

де $\boldsymbol{H}$ – напруженість магнітного поля, – $\boldsymbol{B}$ магнітна індукція, $\boldsymbol{B}_r$ – залишкова індукція, яка характеризує постійний магніт і задається в області, яку займає цей магніт, μ_0 – магнітна проникність вакууму, $\mu_r(|\boldsymbol{B}_r|)$ – відносне значення магнітної проникності (скалярна величина) для магнітного матеріалу, який залежить від модуля вектора магнітної індукції.

Постійний магніт МРГ виконаний з матеріалу NdFeB марки 38SH, який характеризується залишковою індукцією $B_r = 1{,}26$ Тл і коерцитивною силою $H_s = 950$ кА/м. Звідси для рівняння стану магніту з виразу (2) після підстановки цих значень отримаємо для області постійного магніту $\mu_r = 1{,}06$.

Для магнітної рідини, яка знаходиться в магнітному полі $H > 200$ кА/м, магнітна проникність приймалася рівною $\mu_r = 2$. Магнітний матеріал полюсів магнітної системи і обертового валу, що обертається, характеризувався нелінійною кривою намагнічування, яка взята з бази даних пакета Comsol.

У якості граничних умов використовувалися – умова симетрії на осі обертового валу та умова магнітної ізоляції $\boldsymbol{B} \cdot \boldsymbol{n} = 0$ на бічних та верхній поверхнях. Для чисельного розв'язання диференціального рівняння у часткових похідних (3) із зазначеними граничними умовами використовувався метод кінцевих елементів, який реалізований у пакеті програм Comsol.

Розрахунок величини магнітної сили, що діє на магнітні частки. Розглянемо магнітну суспензію, яка розведена настільки, що присутні в ній магнітні частинки можна вважати не взаємодіючими одна з одною. У неоднорідному постійному в часі магнітному полі $\boldsymbol{B}_0$ на кожну магнітну частинку, яка має магнітний момент $\boldsymbol{m}$, діє магнітна сила, яка визначається на підставі наступного виразу [9]:

$$\boldsymbol{F}_m = (\boldsymbol{m} \cdot \nabla)\boldsymbol{B}_0 \tag{4}$$

Розрахунок величини магнітного моменту $\boldsymbol{m}$ залежить від типу магнітних частинок – чи є вони багатодоменні чи однодоменні. Частинки мікронного розміру, які розглядаються в даній статті, виконані з карбонільного заліза, є багатодоменними, магнітний момент яких дорівнює $\boldsymbol{m} = V_p \boldsymbol{M}$, де V_p – об'єм частинки; $\boldsymbol{M}$ – намагніченість матеріалу частинки. Для частинки сферичної форми, матеріал якої характеризується відносним значенням магнітної проникності μ_r, величина намагніченості обчислюється як [9]

$$\boldsymbol{M} = \frac{3(\mu_r - 1)}{\mu_r + 2} \frac{\boldsymbol{B}_0}{\mu_0}.$$

З урахуванням цієї рівності вираз для магнітної сили (4) запишеться у вигляді

$$\boldsymbol{F}_m = \frac{3(\mu_r - 1)}{\mu_r + 2} V_p \nabla \frac{|\boldsymbol{B}_0|^2}{2\mu_0} \tag{5}$$

Магнітна силова функція.

Вираз (5) для магнітної сили, яка діє на частинки в неоднорідному магнітному полі, перетворюємо на вигляд

$$\boldsymbol{F}_m = \frac{3(\mu_r - 1)}{\mu_r + 2} V_p \boldsymbol{G}_{\text{в}}, \tag{6}$$

$$\boldsymbol{G}_{\text{в}} = \nabla \frac{|B_0|^2}{2\mu_0} \tag{7}$$

де $\boldsymbol{G}_{\text{в}}$ – векторна величина, що залежить від просторового положення точки поля і визначає ступінь неоднорідності магнітного поля. Назвемо її магнітною силовою функцією магнітного поля [10].

Магнітна силова функція $\boldsymbol{G}_{\text{в}}$ може розглядатися як характеристика магнітної системи (герметизатора), яка створює неоднорідне магнітне поле в її активній зоні. Знаючи в кожній точці значення та напрямок векторної функції $\boldsymbol{G}_{\text{в}}$, можна, використовуючи вираз (6), розрахувати величину магнітної сили, яка діє на магнітні частки.

При аналізі швидкості руху частинок використовуються наступні припущення: 1) частинки мають сферичну форму і 2) рух частинок відбувається в режимі, під дією тільки магнітних сил $\boldsymbol{F}_m$ розподілених у просторі. У цьому випадку рух частинок підпорядковується закону Стокса і величина їх швидкості може бути визначена з наступного виразу [11]:

$$\boldsymbol{V} = \mu_p \boldsymbol{F}_m, \tag{8}$$

де $\mu_p = 1/(3\pi\eta d_p)$ – рухливість частинки, η – динамічна в'язкість рідини, d_p – діаметр сферичної частки.

Аналіз результатів розрахунку

Розрахунки проводилися за наступних вихідних даних: діаметр валу – 100 мм, величина зазору в герметизаторі – 0,8 мм, діаметр магнітних частинок, які додаються в робочу магнітну рідину, d_p = 0,1; 1; 10 мкм, η = 43,3 Па·с, магнітна проникність частинок $\mu_r = 100$, магнітна проникність магнітної рідини приймалася $\mu = 2$. Розрахунки виконувались для двох випадків – за відсутності та за наявності дефекту на поверхні валу.

Розподіл силових ліній магнітного поля (ізолінії $A_\varphi r$), та магнітної індукції (у кольорі) в активній зоні герметизатора показано на рис. 2 а.

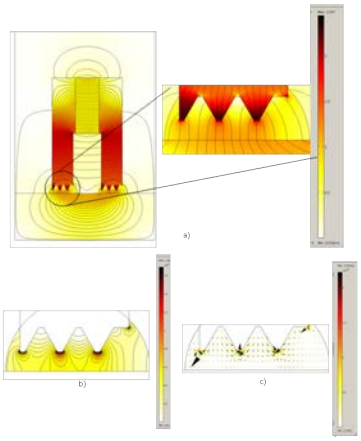


Рис. 2. Розподіл поля в активній зоні герметизатора при відсутності дефекту на валу: а) – розподіл магнітного поля; б) – розподіл значення $|\boldsymbol{B}_0|^2/(2\mu_0)$; с) – розподіл вектора магнітної силової функції $\boldsymbol{G}_{\text{в}}$

На рис. 2 також показано розподіл значення $|\boldsymbol{B}_0|^2/(2\mu_0)$ (рис. 2b) та вектора силової функції $\boldsymbol{G}_{\text{в}}$ (рис. 2 с) за відсутності дефекту на валу. Як видно з цих малюнків, наявність зубцевої структури на поверхні

полюсів створює різконеоднорідне поле і, відповідно, розподіл сили в активній зоні.

В якості дефекту на валу задавалася канавка розміром 0,5×0,5 мм, яка розташована по всій поверхні валу. Розподіл магнітного поля та магнітної сили за наявності такого дефекту показано на рис. 3. Видно, що поблизу дефекту магнітне поле є неоднорідним, що призводить до виникнення магнітної сили F_m, яка діє на мікрочастинки.

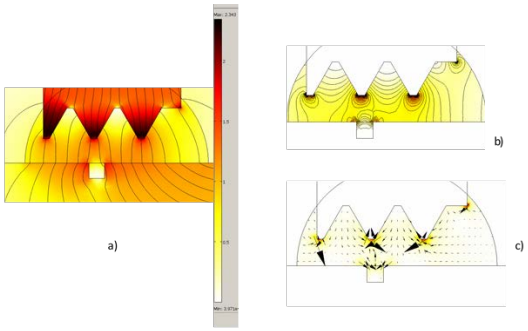


Рис. 3. Розподіл поля в активній зоні герметизатора з дефектом на валу:
а) – магнітного поля; б) – значення $|B_0|^2/(2\mu_0)$; с) – вектора силової функції $G_в$

На рис. 4 показано розподіл швидкості руху мікроскопічних частинок різних розмірів в активному хоні герметизатора без дефекту на валу, а на рис. 5 – за наявності дефекту. З аналізу цих даних можна зробити висновок, що частинки після закінчення деякого характерного часу протікання перехідного процесу будуть концентруватися в областях з різко неоднорідним магнітним полем, тобто будуть концентруватися в кутових зонах зубців магнітопроводу та в зоні розташування дефекту.

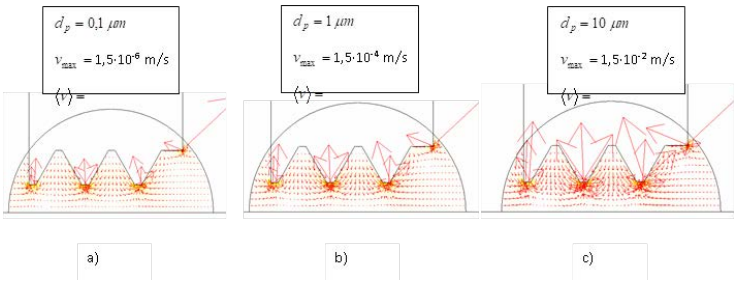


Рис. 4. Розподіл в активній зоні герметизатора вектора швидкості руху магнітних частинок різного діаметра:
а) d_p = 0,1 мкм; б) d_p = 1 мкм; с) d_p = 10 мкм

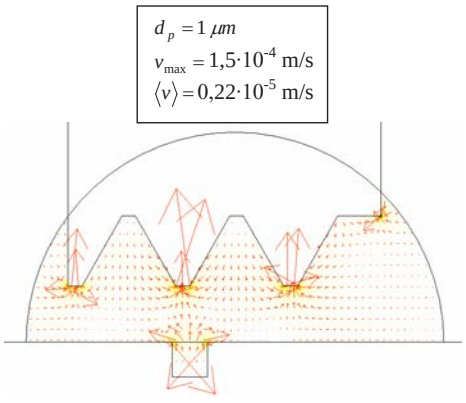


Рис. 5. Розподіл в активній зоні герметизатора вектора швидкості руху магнітних частинок діаметру $d_p = 1$ мкм при наявності дефекту на валу

Для оцінки величини цього характерного часу використали поняття середньої швидкості частинок $< V >$ – середнє по області магнітної рідини значення модуля швидкості (8). При цьому оціночне значення характерного часу перехідного процесу складе , $\tau = \delta/< V >$, де $\delta = 0{,}8$ мм – величина зазору.

Для часток різного діаметра $d_p = 0{,}1$, 1 і 10 мкм значення цього часу буде відповідно рівне $\tau = 630$, 6,3 та 0,063 хв відповідно. Таким чином, частинки розміром 1 мкм за час, який дорівнює приблизно 1 хвилині, будуть локалізовані в зонах неоднорідності, які показані на рис. 2 та 3. Цей результат був підтверджений експериментально [12].

Висновки

Виконаний за допомогою програмного середовища Comsol кінцево-елементний розрахунок розподіл магнітної індукції в активній зоні герметизатора зі збільшеним зазором (0,8 мм) для двох випадків – 1) коли обертовий вал є гладким і 2) за наявності дефекту на валу. Вперше аналітично розглянуто режим, коли в робочу магнітну рідину додатково вводяться магнітні частинки мікронного розміру згідно з патентом України № 10642. Показано розподіл зон, які характеризуються максимально локальною неоднорідністю цього поля, що визначає величину та напрямок магнітної сили, що діє на мікроскопічні частинки в магнітній рідині.

Отримано розрахунковим шляхом розподіл магнітної сили, яка діє на мікрочастинки різного діаметра (0,1–10 мкм), та швидкості руху цих частинок під дією цієї сили. Показано, що ці частинки концентруються в зонах з неоднорідним полем – у кутових зонах зубців магнітної системи та поблизу дефекту на валу, причому характерний час перебігу перехідного процесу для частинок діаметром $d_p = 0{,}1$, 1 та 10 мкм становить відповідно 630, 6,3 та 0,063 хв. Додавання мікронних частинок до робочого зазору герметизатора дозволяє збільшити до трьох разів величину даного зазору при збереженні надійності в експлуатації.

Виконаний розрахунок показав можливість застосування технології згідно з патентом України № 10642. Впровадження МРГ з підвищеними зазорами довели адекватність розробленої математичної моделі.

Список використаної літератури

1. Радіонов А.В. Вплив режимів роботи асинхронних електродвигунів з їхньої працездатність. *Вісник СНАУ*, Серія «Механізація та автоматизація виробничих процесів. Вип. 10/1 (29). 2016. С. 156–161.

2. Рисбаєва Г.Б., Умурзакова А.Д. Огляд інтелектуальних методів контролю стану та діагностики несправностей асинхронних машин сільськогосподарського призначення. *Наука XXI століття – епоха трансформації*. Т. 1, 4. IV. 2022. С. 172–175.

3. Радіонов А.В. Модернізація технологічного устаткування шлях підвищення техногенної безпеки небезпечних виробництв. Проблеми екологічної безпеки: матеріали XVI Міжнародної науково-технічної конференції. Кременчук: *КрНУ*, 2018. С. 78–79.

4. Pislary-Danescu L., Morega A.M., Telipan G. and others. Magnetic Nanofluid Applications in Electrical Engineering. *IEEE Transactions on Magnetics*. Vol. 49, No. 11. 2013. P. 5489−5498.

5. Ravaud R., Lemarquand G. Mechanical properties of a ferrofluid seal: three-dimensional analytical study based on the coulombian model. *Progress in Electromagnetics ResearchB*. Vol. 13. 2009. P. 385−407.

6. Радіонов А.В., Виноградов О.М. Комбіновані магніторідинні герметизатори – ефективна альтернатива безконтактним ущільненням підшипникових вузлів з рідким мастилом. Збагачення корисних копалин: *Наук. техн. зб.* Вип. 35 (76). 2008. С. 148–155.

7. Патент на винахід 106420 UA, МПК H01F7/00, H01F7//28 (2006.01). Магніторідинне ущільнення з автоматичною корекцією робочого зазору / Радіонов О.В., Виноградов О.М.: заявл. 08.11.2012; опубл. 26.08.2014, Бюл. № 16. 7 с.

8. Comsol multiphysics modeling і simulation software.[Електронний ресурс]. URL: htpp//www.comsol.com/

9. Jackson, John D. Classical Electrodynamics (3rd ed.). New York: John Wiley & Sons. 1999. p.832.

10. Подольцев А.Д., Кучерява І.М. Багатомасштабне моделювання в електротехніці. Київ: *Інститут електродинаміки НАНУ*, 2011. 256 с.

11. Moon F.C. Magneto-Solid Mechanics. *Wiley*, 1984, 436 p.

12. Pshenichnikov A.F., Lebedev A.V., Radionov A.V., and Efremov D.V., A Magnetic Fluid for Operation in Strong Gradient Fields, *Colloid Journal*, Vol. 77, No. 2. 2015. P. 196–201.

References

1. Radionov A.V. (2016). Vplyv rezhymiv roboty asynkhronnykh elektrodvyhuniv z yikhnoi pratsezdatnist. *Visnyk SNAU*, 10/1 (29), 156–161.

2. Rysbaieva H.B. & Umurzakova A.D. (2022). *Ohliad intelektualnykh metodiv kontroliu stanu ta diahnostyky nespravnostei asynkhronnykh mashyn silskohospodarskoho pryznachennia.* Nauka KhKhI stolittia – epokha transformatsii. T. 1, 4. IV, 172–175.

3. Radionov A.V. (2018). Modernizatsiia tekhnolohichnoho ustatkuvannia shliakh pidvyshchennia tekhnohennoi bezpeky nebezpechnykh vyrobnytstv. *Problemy ekolohichnoi bezpeky: materialy XVI Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii.* Kremenchuk: KrNU, 78–79.

4. Pislaru-Danescu L., Morega A. M., Telipan G., Morega M., Dumitru J. B., & Marinescu V. (2013). Magnetic Nanofluid Applications in Electrical Engineering. *IEEE Transactions on Magnetics*, *49 (11)*, 5489−5498.

5. Ravaud R. & Lemarquand G. (2009). Mechanical properties of a ferrofluid seal: three-dimensional analytical study based on the coulombian model. *Progress in Electromagnetics Research B., 13*, 385−407.

6. Radionov A.V. (2008). Vynohradov O.M. Kombinovani mahnitoridynni hermetyzatory – efektyvna alternatyva bezkontaktnym ushchilnenniam pidshypnykovykh vuzliv z ridkym mastylom. Zbahachennia korysnykh kopalyn: *Nauk. tekhn. zb.*, *35 (76)*, 148–155.

7. Patent na vynakhid 106420 UA, MPK H01F7/00, H01F7//28 (2006.01). Mahnitoridynne ushchilnennia z avtomatychnoiu korektsiieiu robochoho zazoru / Radionov O.V., Vynohradov O.M.: zaiavl. 08.11.2012; opubl. 26.08.2014, Biul. № 16. 7 p.

8. Comsol multiphysics modeling i simulation software. [Electronic resource]. URL: htpp//www.comsol.com/

9. Jackson John D. (1999). *Classical Electrodynamics* (3rd ed.). New York: John Wiley & Sons, 832.

10. Podoltsev A.D. & Kucheriava I.M. (2011). *Bahatomasshtabne modeliuvannia v elektrotekhnitsi*. Kyiv: Instytut elektrodynamiky NANU, 256.

11. Moon F.C. (1984). *Magneto-Solid Mechanics*. Wiley, 436.

12. Pshenichnikov A.F., Lebedev A.V., Radionov A.V., & Efremov D.V., (2015). A Magnetic Fluid for Operation in Strong Gradient Fields, *Colloid Journal*, *77* (2), 196–201.