

В. И. МИЛЫХ, Л. В. ШИЛКОВА

ЧИСЕЛЬНО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ АНАЛІЗ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ІНДУКТОРА МАГНІТНОГО СЕПАРАТОРА НА БАЗІ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

Подано принципи і результати чисельно-польового дослідження магнітного поля (МП) індуктора магнітного сепаратора на базі трифазного асинхронного двигуна серії А51/2 в режимі неробочого ходу. МП аналізується у тривимірному розподілі чисельним методом плоско-ортогональних моделей. Результати чисельних розрахунків підтверджені результатами вимірів магнітної індукції (МІ) у ході описаного експерименту. За результатами дослідження для експериментального зразка виявлена робоча зона обертового МП з підвищеним рівнем МІ для найбільш ефективного перемішування суміші речовин.

Ключові слова: магнітний сепаратор, індуктор, магнітне поле, чисельні розрахунки, магнітна індукція, плоско-ортогональні моделі, експериментальне дослідження, тесламетр, робоча зона.

Представлены принципы и результаты численно-полевого исследования магнитного поля (МП) индуктора магнитного сепаратора на базе трехфазного асинхронного двигателя серии А51/2 в режиме холостого хода. МП анализируется в трехмерном распределении численным методом плоско-ортогональных моделей. Результаты численных расчетов подтверждены результатами измерений магнитной индукции (МИ) в ходе описанного эксперимента. По результатам исследования для экспериментального образца выявлена рабочая зона вращающегося МП с повышенным уровнем МИ для наиболее эффективного перемешивания смеси веществ.

Ключевые слова: магнитный сепаратор, индуктор, магнитное поле, численные расчеты, магнитная индукция, плоско-ортогональные модели, экспериментальное исследование, тесламетр, рабочая зона.

The principles and results of the numerical and experimental study of the magnetic field of the magnetic separator inductor based on the three-phase asynchronous motor series А51/2 in no-load condition. A quasi-three-dimensional mathematical model describing the magnetic field of the inductor is formed, and a method for calculating this field in its volume is set out. To calculate the method of flat-parallel calculation models is used, that is, spent numerically-field interconnected calculations of the magnetic field in the transverse and longitudinal sections of the inductor. The interrelation of these fields is carried out with the help of a set of special boundary conditions in these sections. The comparison and confirmation of the calculated magnetic field with the measured magnetic field during the experiment is carried out. With the magnetic separator inductor, its magnetic field will be created by an alternating current, that is, when working with alternating voltage. For correct comparison with the calculated magnetic field, measurements were made when powered from a DC network. This is due to the fact that the magnetic field simulation in the FEMM program is carried out at instantaneous current values, that is, simulates the instant of time in which the current has constant values. For surges and recessions in magnitude magnetic induction distributions in a transverse section, a working chamber of an inductor sample is defined. Due to the gradient in the distribution of magnetic induction in the longitudinal section, the inductor's working zone will contribute to the "retraction" of the ferromagnetic working elements.

Keywords: magnetic separator, inductor, magnetic field, numerical calculations, magnetic induction, plane-orthogonal models, experimental study, teslameter, working area.

Вступ. Широкі можливості в галузі технологій розділення дрібних об'єктів з різними електромагнітними властивостями та перемішування різних сумішей з точки зору суттєвого підвищення інтенсивності і продуктивності технологічних процесів відкриваються з використанням магнітних сепараторів (МС) на базі трифазного асинхронного двигуна (ТАД).

Взагалі існує багато варіантів конструкцій МС, і серед них є МС, в яких перемішування здійснюється обертовим магнітним полем (МП), що збуджується індуктором, створеним на базі статора ТАД. Під дією такого поля дрібні феромагнітні елементи рухаються в робочій зоні і створюють так званий «вихровий шар» у деякій робочій масі, яка зазнає необхідну технологічну обробку [1–3].

Для поширення МС, які виконують функцію перемішування, у різні технологічні процеси актуальною стає оцінка розподілу обертового МП та виявлення робочої зони ефективного використання з підвищеним рівнем МІ усередині індуктора реального зразка індуктора МС.

Простір усередині індуктора є немагнітним, тому розподіл МП становиться тривимірним.

Якісно аналіз цього МП можливо провести чисельними методами та важливим є порівняння його з виміряним розподілом МП. Така задача потребує нетривіальних підходів, бо безпосередній розрахунок та вимірювання тривимірного МП є

дуже складними.

Тому аналіз цього МП належить до низки наукоємних системних задач електромеханічної галузі, розв'язання якої дозволить оптимізувати параметри при створенні відповідних методик проектування МС такого типу.

Постановка задачі. Завданням даної роботи є чисельний аналіз МП методом плоско-ортогональних моделей і з уточненням одержуваних даних по вимірювальним приладам, який дозволить виявити робочу зону ефективного використання з підвищеним рівнем МІ усередині індуктора експериментального зразка індуктора МС на базі ТАД. На даному етапі дослідження індуктора МС здійснювався аналіз МП в режимі неробочого ходу, тобто без впливу феромагнітних елементів в робочій зоні, що буде наступною – значно більш складною задачею.

Об'єкт дослідження. Об'єктом дослідження є електромагнітна система індуктора МС на базі ТАД серії А51/2 загальний вигляд якого подано на рис. 1.

Індуктор МС (рис. 2) має розміри:

- зовнішній діаметр осердя $d_{se} = 0,245$ м;
- внутрішній діаметр осердя $d_s = 0,14$ м;
- активна довжина $l_a = 0,09$ м.

Основні параметри індуктора МС:

- номінальна напруга $U_N = 220$ В;
- номінальний струм $I_N = 24$ А;
- кількість полюсів $2p = 2$;
- кількість пазів індуктора $Q_s = 24$;

- кількість пазів індуктора на полюс і фазу $q_s = 4$;
- активний опір фазної обмотки індуктора $R_{s0a} = 0,575 \text{ Ом}$.

Обмотка індуктора двошарова, розподілена з діаметральним кроком, схема з'єднання – «зірка».



Рис. 1 – Загальний вигляд ТАД серії A51/2



Рис. 2 – Індуктор МС

Розрахункова модель індуктора. Розрахунки МП проводились за допомогою програми FEMM [4] методом плоско-ортогональних моделей [5–7], тобто чисельно-польовими взаємопов'язаними розрахунками МП в поперечному та повздовжньому перерізах індуктора, взаємозв'язок яких здійснюється за допомогою комплексу спеціальних граничних умов у цих перерізах.

Для цього створена розрахункова модель електромагнітної системи індуктора в його поперечному та повздовжньому перерізах, яка подана на рис.3.

Чисельний розрахунок МП індуктора МС у поперечному перерізі. Принципи розрахунку МП в поперечному перерізі індуктора МС у цілому відповідають аналогічним розрахункам ТАД [8] навіть зі спрощенням через відсутність ротора. На рис. 3 позначена і далі використовується

циліндрична система координат r, α, z з початком в геометричному центрі індуктора 0.

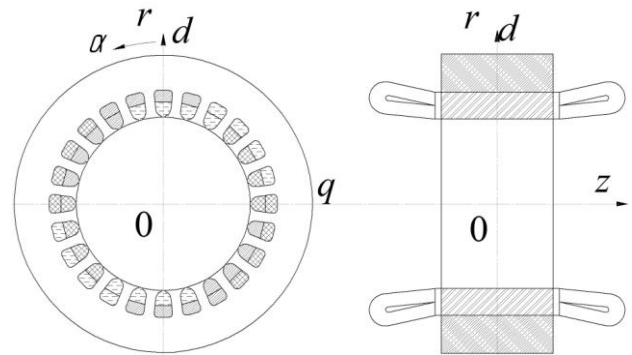


Рис. 3 – Конструктивна схема індуктора МС

МП в поперечному перерізі описується відомим двовимірним диференціальним рівнянням

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[v_e r \frac{\partial A_z}{\partial r} \right] + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \alpha} \left[v_e \frac{\partial A_z}{\partial \alpha} \right] = -J_z, \quad (1)$$

де A_z, J_z – аксіальні складові векторного магнітного потенціалу (ВМП) та густини струму; v_e – питомий магнітний опір (ПМО).

Для ділянок області розрахунку в шихтованому осерді використовується еквівалентне ПМО

$$v_e = v_f / k_{fe}, \quad (2)$$

де v_f – ПМО сталевих листів; k_{fe} – коефіцієнт заповнення ними осердя.

Для решти області v_e відповідає магнітної властивості немагнітних середовищ.

Розповсюдження МП обмежувалось зовнішньою поверхнею осердя індуктора, де була задана гранична умова Діріхле:

$$A_z = 0. \quad (3)$$

В фазних зонах трифазної обмотки статора задана симетрична система фазних струмів:

$$\begin{aligned} I_{sA} &= I_{ms} \cos(\omega_s t); \\ I_{sB} &= I_{ms} \cos(\omega_s t - 2\pi/3); \\ I_{sC} &= I_{ms} \cos(\omega_s t + 2\pi/3), \end{aligned} \quad (4)$$

де t – час; I_{ms} – амплітуда; ω_s – кутова частота.

Амплітудне значення струму індуктора $I_{ms} = \sqrt{2} \cdot I_N = \sqrt{2} \cdot 24 = 33,94 \text{ А}$.

В момент часу струм в фазній обмотці A дорівнює амплітудному значенню $i_{sA} = I_{ms} = 33,94 \text{ А}$, в B і C – $i_{sB} = i_{sC} = -0,5 I_{ms} = 16,97 \text{ А}$.

В пазах статора на рис.4 показані відповідні напрямки фазних струмів, знаки + та – після їх символів повинні бути ще додані до їх миттєвих значень.

Рівняння (1) з урахуванням струмів (4) та умови (3) розв'язувалось методом скінчених елементів за програмою FEMM. При цьому враховувалися нелінійні магнітні властивості матеріалу осердя – електротехнічної сталі марки 2013.

Отримана картина силових ліній МП поперечному перерізі індуктора. Це лінії рівного ВМП, які проведені з визначеним кроком від максимального його значення $A_{max} = 0,007 \text{ Вб/м}$. Картина МП подана на рис. 4.

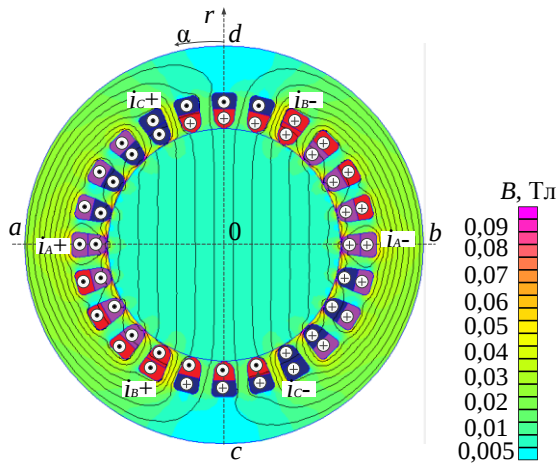


Рис. 4 – МП розрахункової моделі індуктора МС у поперечному перерізі

За розподілом ВМП $A_z(r, \alpha)$ через вираз $\vec{B} = \text{rot} \vec{A}$ визначаються координатні складові МІ:

$$B_r = \frac{1}{r} \frac{\partial A_z}{\partial \alpha}; \quad B_\alpha = -\frac{\partial A_z}{\partial r}. \quad (5)$$

Важливим аспектом підготовчої роботи до розрахунку МП індуктора МС у повздовжньому перерізі є визначення падіння магнітної напруги на відрізок $0d$ по радіусу до r_d (рис. 4):

$$U_{\text{mag}} = \int_0^{r_d} H_r dr, \quad (6)$$

де H_r – радіальна складова напруженості магнітного поля, яка визначається за формулами:

$$H_r = v_e H_\alpha = v_e \frac{1}{r} \frac{\partial A_z}{\partial \alpha}. \quad (7)$$

Для розрахункової моделі на рис. 4 в програмі FEMM визначено $U_{\text{mag}} = 3528,49$ А.

Чисельний розрахунок МП індуктора МС у повздовжньому перерізі. МП у поперечному перерізі (рис. 4) є симетричним відносно зображених осей, тому його, в принципі, можна розглядати у чверті перерізу $0db$.

Так само, електромагнітна система індуктора симетрична і у повздовжньому перерізі відносно зображених осей $0r$ та $0z$ (рис. 3).

Таким чином на рис. 3 сформована поздовжньо-поперечна розрахункова модель електромагнітної системи індуктора, де лінія $0d$ є спільною для обох перерізів. Тому на цієї лінії для цих перерізів повинні бути однаковими розподіли МІ та падіння магнітної напруги. Або, у крайню міру, близькими у межах допустимої погрішності.

В зубцево-пазовій шарі осердя індуктора в поперечному перерізі структура являється дискретною (зубець-паз), а у повздовжньому перерізі – суцільною, що зображено на рис. 5. Для врахування цього для повздовжнього перерізу введено еквівалентний коефіцієнт заповнення сталлю:

$$k_{\text{fets}} = \frac{b_k \cdot k_{\text{fe}}}{\tau_{sr}}, \quad (8)$$

$$\text{де } \tau_{sr} = \frac{2\pi \cdot r_k}{Q_s} - \text{зубцево-пазовий крок на радіусі}$$

r_k ; $b_k = \tau_{sr} - b_n$ – ширина зубця на тому ж радіусі.

В програму FEMM магнітні властивості задаються у числовій формі, у тому числі k_{fets} . Тому зубцево-пазова структура на рис. 6 у повздовжньому перерізі подана шарами, для кожного з яких коефіцієнт k_{fets} по (8) визначався на його середньому радіусі r_k . Таким чином визначено низку значень k_{fets} від 0,505 до 0,613 (знизу вгору).

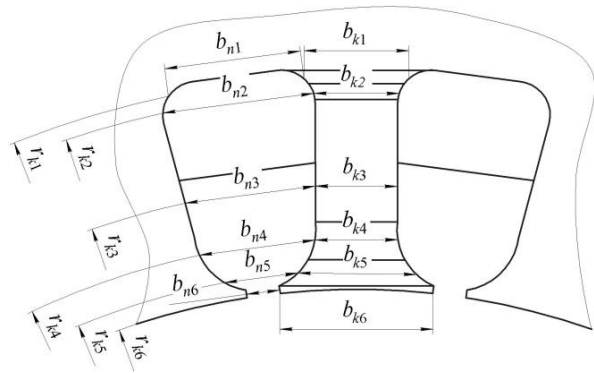


Рис. 5 – Фрагмент зубцево-пазової структури індуктора

Зазначимо, що після розрахунку МП у програмі FEMM, МІ безпосередньо в сталевих листах зубців треба визначати за формулою:

$$B_{\text{fet}} = \frac{B_{ek}}{k_{\text{fets}}}, \quad (9)$$

де B_{ek} – МІ, яка визначена у еквівалентному суцільному середовищі, отриманому через застосування k_{fets} , причому формула чинна як для складових МІ, так і для її модуля.

Виконана підготовка суцільного (тобто однорідного) по координаті α повздовжнього перерізу індуктора в координатній площині rz (рис. 6) дозволяє перейти до формування математичної моделі МП в цьому перерізі. При цьому важливо те, що у поперечному перерізі в робочій зоні індуктора біля осі $0d$ силові лінії МП практично паралельні одна одній. І оскільки саме тут проходить повздовжній переріз, то в його площині можна МП вважати плоско-паралельним.

У такому разі тут можна для МП застосувати відповідне двовимірне диференціальне рівняння:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left[v_{rz} \frac{\partial A_\alpha}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[v_{rz} \frac{\partial A_\alpha}{\partial z} \right] = -J_\alpha, \quad (10)$$

де A_α , J_α – складові ВМП та густини струму, які є ортогональними площині (r, z) ; v_{rz} – розподіл ПМО у повздовжньому перерізі.

У повздовжньому перерізі струм є у лобовій частині обмотки статора. На обрану чверть загальної області розрахунку тут приходиться та ж сама МРС обмотки статора, як і на чверть поперечного перерізу індуктора, а саме, з урахуванням заданих струмів (4) для часу $t = 0$:

$$F_s = N_s I_{ms}, \quad (11)$$

яка становила 543 А.

Для розрахункової моделі сформовані граничні умови.

З урахуванням симетрії струмів відносно лінії z та dg на рис. 6 для ВМП встановлюється умова Неймана:

$$\left(\frac{\partial A_\alpha}{\partial r}\right)_{0b} = 0 \text{ та } \left(\frac{\partial A_\alpha}{\partial r}\right)_{dg} = 0 \quad (12)$$

при якій силові лінії МП поля є перпендикулярними $0b$ та dg .

З урахуванням асиметрії струмів відносно лінії r на рис. 6 лінії $0d$ для ВМП встановлюється умова Діріхле:

$$(A_\alpha)_{0d} = 0, \quad (13)$$

при якій силова лінія магнітного поля співпадає з $0d$.

У той же час, на лінії $gesb$ задана умова Діріхле:

$$(A_\alpha)_{gesb} = C_{var}, \quad (14)$$

де C_{var} – деяка константа, яка визначена у процесі розрахунку МП – рішення рівняння (10).

Для визначення початкового значення C_{var} на ділянці від 0 до l на лінії $0b$ задавалось значення МІ B_{r0} , знайдене у поперечному перерізі індуктора (рис. 4). Магнітний потік на цієї ділянці було визначено двома виразами:

$$\Phi_{\alpha 0l} = (A_{\alpha 0} - A_{\alpha b}) l_\alpha \text{ та } \Phi_{\alpha 0l} = B_{r0} l_z l_\alpha, \quad (15)$$

де l_z – довжина ділянки від 0 до точки l .

Враховуючи, що $A_{\alpha 0} = 0$ і $A_{\alpha b} = C_{var}$, та прирівнюючи два вирази (15), після перетворень отримуємо для (14) константу:

$$C_{var} = B_{r0} l_z. \quad (16)$$

Далі, з заданням умов (12), (13), (14) та МРС лобової частини обмотки (11), методом скінчених елементів по програмі FEMM розв'язується рівняння (10) з урахуванням нелінійних магнітних властивостей сталі осердя індуктора. Результат порівнюється зі значенням падіння магнітної напруги U_{mag} , яке знайдене раніше у поперечному перерізі індуктора за (6). Серією розрахунків МП за програмою FEMM і відповідних коригувань було знайдене значення $C_{var} = 0.16$. При цьому біло визначено максимальне значення ВМП $A_{\alpha max} = 0.0085$ Вб/м. Отримана картина силових ліній МП повздовжньому перерізі індуктора подана на рис. 6.

Експериментальне дослідження МП індуктора МС. При описанні схеми експерименту слід зауважити, що при роботі індуктора МС його МП буде створюватися змінним струмом, тобто працювати при живленні змінною напругою.

Але для коректного порівняння з розрахованим МП чисельним методом вимірювання проведено при живленні від мережі постійного струму. Це пов'язано з тим, що моделювання МП у програмі FEMM проводиться при миттєвих значеннях струму, тобто імітує момент часу у котрому струм має незмінні (постійні) значення.

Дослідження проводилось по схемі, поданій на рис. 7.

Живлення обмотки індуктора проводилось від мережі за напругою $U = 110$ В, що фіксувалось на вольтметрі V .

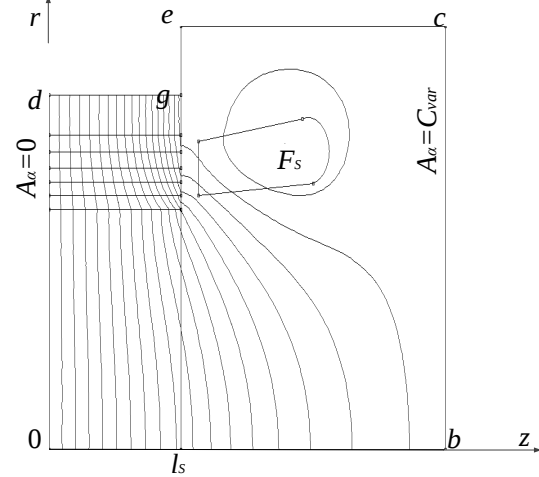
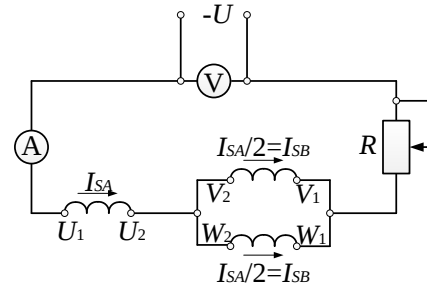


Рис. 6 – Картина силових ліній МП розрахункової моделі індуктора у повздовжньому перерізі



U_1-U_2 , V_1-V_2 , W_1-W_2 – початки та кінці затисків трифазної обмотки індуктора

Рис. 7 – Електрична схема проведення дослідів

Для порівняння результатів вимірювання МП з розрахованим МП чисельним методом за допомогою регулювання опору R досяглось значення амплітудного струму у фазі A $I_{SA} = 34$ А, що фіксувалось на амперметрі A , тоді згідно зі схемою проведення дослідів в двох інших фазах B та C досягались значення струмів рівних половині від'ємного значення номінального струму у фазі A $I_{SB} = -I_{SC} = 17$ А.

Значення опору R для досягнення номінального струму у фазі становило

$$R = \frac{U}{I_{SA}} - 1.5 R_{SA}, \quad (17)$$

де R_{SA} – активний опір фазної обмотки індуктора.

Тобто, підставляючи значення до (17), отримали $R = 2,4$ Ом.

Вимірювання МП, створеної постійним струмом, слід проводити тесламетром з датчиком Холла.

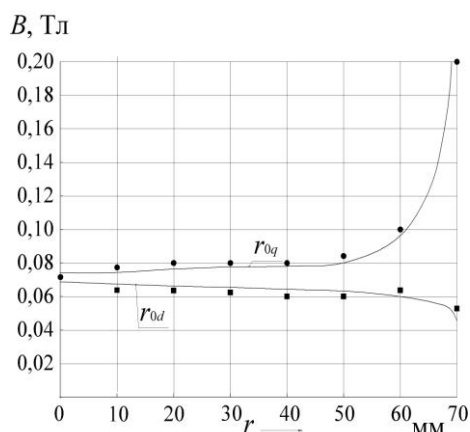
Фотографія проведення вимірювання МП тесламетром наведена на рис. 8.

Вимірювання МП проводились у повздовжньому перерізі індуктора та по повздовжній $0d$ та поперечній $0q$ осях поперечного перерізу індуктора в точках з шагом у 10 мм.



Рис. 8 – Вимірювання МП індуктора

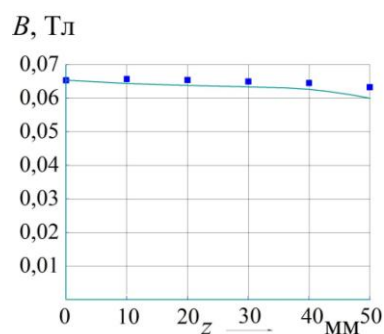
Порівняння чисельних і експериментальних розрахунків МП індуктора МС. Розподіли радіальної складової магнітної індукції на радіальних лініях Ob та Od визначеними чисельним методом показано суцільними лініями (r – радіус), а точками показана виміряні значення в процесі експерименту на рис. 9.

Рис. 9 – Розподіл МІ на поздовжній r_{0d} і поперечній r_{0q} осях у поперечному перерізі індуктора МС

У межах робочої зони індуктора МС МІ досягає значення 0,07 Тл і розподілена доволі рівномірно, що є одним із основних критеріїв ефективної роботи МС. Графіки розподілу МІ підтвердили однорідність МП в перпендикулярній площині до осі індуктора, що є однією із найважливіших вимог, які пред'являються до МС обертового МП. Сплески та спади у розподілах величини МІ у поперечному перерізі знаходяться поблизу фазних зон та їх стиків відповідно. Тобто саме у цій зоні сплесків та спадів МП буде ефективно обертати феромагнітні елементи. Це дозволяє зробити висновок, що згідно з розподілом МП робоча камера для даного зразка індуктора має мати внутрішній та зовнішній радіуси 60 мм та 70 мм відповідно.

Але поряд з цим постає завдання дослідження розподілу МП по аксіальній його осі, що завжди є актуальним у відносно великих немагнітних просторах, оточених феромагнітними екранами.

На рис. 10 кривою лінією поданий суцільною лінією розподіл радіальної складової МІ вздовж лінії Ob визначеними чисельним методом, а точками показана виміряні значення в процесі експерименту. Наочно, що у точці 0, яка є центром робочої зони індуктора (рис. 10), виявилося, що $B_r = 0,07$ Тл, як і планувалося. Тобто у робочій зоні індуктора на лінії Od розподіл B_r виявився таким самим, як і у поперечному перерізі на цієї ж лінії. Однієї з особливостей розподілу $B_r(z)$ є те, що на межі активної частини індуктора (точка 1 на рис. 6) крива має помітний градієнт $\frac{\partial B}{\partial z}$, що буде сприяти «втягненню» феромагнітних робочих елементів в робочу зону індуктора МС.

Рис. 10 – Розподіл радіальної складової МІ по осі z

Порівняння чисельних і експериментальних розрахунків МП індуктора МС підтверджують достатню точність проведених досліджень.

Висновки.

1. У результаті огляду областей застосування та огляду сучасних досліджень аналогів МС підтверджена актуальність проведеного дослідження.

2. Комплексний чисельно-польовий аналіз МП індуктора МС дозволяє проаналізувати розподіли МІ у його поперечному і поздовжньому перерізах та проявити сплески та спади у розподілі у поперечному перерізі для ефективного перемішування суміші речовин та значну зміну на межі активної довжини робочої зони МС у поздовжньому перерізі у достатній мірі для «втягнення» феромагнітних робочих елементів в робочу зону.

3. Експериментальний аналіз МП підтвердив отримання розподілів МІ.

4. Завдяки проведеному чисельно-експериментальному дослідженню визначена робоча зона індуктора досліджуваного зразка.

Список літератури

1. Логвиненко Д.Д. Интенсификация технологических процессов в аппаратах с вихревым слоем / Д.Д. Логвиненко, О.П. Шеляков // Киев: техника, 1976. – 144 с.
2. Загирняк М.В. Магнитные сепараторы. Проблемы проектирования: Монография / М.В. Загирняк, Ю.А. Бранспиз, И.А. Шведчикова; Под ред. М.В. Загирняка. – К.: Техніка, 2011. – 224 с.
3. Компания GlobeCore / Аппарат Вихревого Слоя АВС-100. – Режим доступу : <https://avs.globecore.ru/products/avs-100.html>. – Дата звертання : 30 вересня 2017.

4. Meeker D. Finite Element Method Magnetics. FEMM 4.2 32 bit 11 Oct 2010 Self-Installing Executable. – Режим доступа: <http://www.femm.info/wiki/OldVersions>.
5. Милых В. И. Численный анализ магнитного поля цилиндрического трехфазного индуктора магнитного сепаратора / В. И. Милых, Л. В. Шилкова, С. А. Ревуженко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії". – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 1 (1123). – С. 76-83.
6. Милых В. И. Расчет электромагнитного поля в продольном сечении электрической машины / В. И. Милых // Электротехника. – 1984. – № 12. – С. 41–46.
7. Милых В. И. Сравнительный анализ вариантов граничных условий при численном расчете магнитного поля в концевой зоне турбогенератора методом плоско-ортогональных расчетных моделей / В. И. Милых, О. Н. Дубинина // Технічна електродинаміка. Темат. вип. Проблеми сучасної електротехніки. – 2002. – Ч. 5. – С. 10–15.
8. Милых В. И. Численно-полевой поверочный анализ проектных параметров трехфазных асинхронных двигателей / В. И. Милых, Л. В. Шилкова // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2016. – Вип. 1 (33). – С. 58–65.
9. Kompanija GlobeCore. Apparat Vihrevogo Sloja AVS-100. [Company GlobeCore. Vortex Layer Machine ABC-100]. Available at: <https://avs.globecore.ru/products/avs-100.html>. (accessed 30.09.2017).
10. Meeker, D. "Finite Element Method Magnetics: OldVersions." *Finite Element Method Magnetics: HomePage*. DavidMeeker, 11 October 2010. Web. 10 March 2014 <<http://www.femm.info/wiki/OldVersions>>
11. Milykh V. I., Shilkova L. V. Revuzhenko S. A. Chislennyj analiz magnitnogo polja cilindricheskogo trehfaznogo induktora magnitnogo separatora [Numerical analysis of the magnetic field of a cylindrical three-phase magnetic separator inductor]. *Elektromekhanichni i energozberigayuchi sistemi – Electromechanical and energy saving systems*. Release 1/2017 (1123), pp. 76-83.
12. Milykh V. I. Raschet elektromagnitnogo polya v prodolnom sechenii elektricheskoy mashiny [Calculation of the electromagnetic field in the longitudinal section of an electrical machine]. *Elektrotekhnika* [Electrical Engineering]. Moscow, 1984, no. 12, pp. 41-46.
13. Milykh, V. I., and O. N. Dubinina. "Sravnitelnyy analiz variantov granichnykh usloviy pri chislennom raschete magnitnogo polya v kontsevoy zone turbogeneratora metodom plosko-ortogonalnykh raschetnykh modeley." *Tekhnichna elektrodynamika. Tematichnyy vypusk. Problemy suchasnoyi elektrotekhniki*. Vol. 5. Kyiv: IED NANU, 2002. 10–15. Print.
14. Milykh V. I., Shilkova L. V. Chislennno-polevoy poverochnyy analiz proektnykh parametrov trehfaznykh asinhronnykh dvigateley [Numerically-field confirmatory analysis of a three-phase induction motor design parameter]. *Elektromekhanichni i energozberigayuchi sistemi – Electromechanical and energy saving systems*. Release 1/2016 (33), pp. 58-65.

References (transliterated)

1. Logvinenko D.D., Sheljakov O.P. *Intensifikacija tehnologicheskikh processov v apparatah s vihrevym sloem* [Intensification of technological processes in apparatus with a vortex layer]. Kiev, Tehnika Publ, 1976. 144 p
2. Zahymyak M.V., Branspiz Ju.A., Shvedchikova I.A. *Magnitnye separatory. Problemy proektirovaniya*. [Magnetic separators. Design issues]. Kiev, Tehnika Publ, 2011, 224 p.

Надійшла (received) 14.03.2018

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Чисельно-експериментальний аналіз магнітного поля індуктора магнітного сепаратора на базі асинхронного двигуна / В. І. Мілих, Л. В. Шилкова // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії". – Х. : НТУ «ХПІ», 2018. – № 5 (1281). – С. 104-109. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2409-9295.

Численно-экспериментальный анализ магнитного поля индуктора магнитного сепаратора на базе асинхронного двигателя / В. И. Милых, Л. В. Шилкова // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії". – Х. : НТУ «ХПІ», 2018. – № 5 (1281). – С. 104-109. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2409-9295.

Numerical-experimental analysis of the magnetic field of a magnetic separator inductor on the basis of an asynchronous motor / V. I. Milykh, L. V. Shilkova // Bulletin of NTU "KhPI". Series: "Electric machines and electromechanical energy conversion." – Kharkiv : NTU "KhPI", 2018. – No. 5 (1281). – P. 104-109. – Bibliogr.: 8. – ISSN 2409-9295.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Мілих Володимир Іванович, доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри електричних машин, тел. (057)707-65-14; e-mail: mvikemkpi@gmail.com.

Милых Владимир Иванович, доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», заведующий кафедры электрических машин, тел. (057)707-65-14; e-mail: mvikemkpi@gmail.com.

Milykh Vladimir Ivanovych, Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Chair of the Department of Electrical machines, tel. +38 (057) 707-65-14; e-mail: mvikemkpi@gmail.com.

Шилкова Лариса Василівна, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший викладач кафедри електричних машин, тел. (057)707-68-44, e-mail: larisa_lv@ukr.net.

Шилкова Лариса Васильевна, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», старший преподаватель кафедры электрических машин, тел. (057)707-68-44, e-mail: larisa_lv@ukr.net.

Shilkova Larisa Vasilivna, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Senior Lecturer of the Department of Electrical machines, tel. +38 (057) 707-68-44, e-mail: larisa_lv@ukr.net.