

В. І. МІЛИХ, Л. В. ШИЛКОВА

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИЧНОЇ МОДЕЛІ ТРИФАЗНОГО ІНДУКТОРА МАГНІТНОГО ПОЛЯ В РОБОЧОМУ РЕЖИМІ ПРИ ОБРОБЦІ СИПУЧОГО МАТЕРІАЛУ

Представлена фізична модель трифазного індуктора магнітного поля з циліндричною робочою камерою для проведення його експериментального дослідження в робочому режимі. Надано кадр з відзнятого відео, який підтверджує, що ферромагнітні елементи певної форми в робочому режимі орієнтуються за силовими лініями магнітного поля при його обертанні. Показано залежності електричних величин індуктора у усталеному робочому режимі залежно від об'ємного коефіцієнта заповнення камери ферромагнітними елементами. Надано фотографії сипучого матеріалу до та після його обробки в індукторі. Запропоновано практичні рекомендації, які можуть бути враховані при проведенні подальших уточнюючих експериментальних досліджень.

Ключові слова: трифазний індуктор магнітного поля, експериментальне дослідження, фізична модель, робочий режим, ферромагнітні елементи, об'ємний коефіцієнт заповнення камери, обробка матеріала.

Представлена физическая модель трехфазного индуктора магнитного поля с цилиндрической рабочей камерой для проведения его экспериментального исследования в рабочем режиме. Показан кадр из снятого видео, подтверждающий, что ферромагнитные элементы определенной формы в рабочем режиме ориентируются по силовым линиям магнитного поля при его вращении. Даны зависимости электрических величин индуктора в установившемся рабочем режиме в зависимости от объемного коэффициента заполнения камеры ферромагнитными элементами. Показаны фотографии сыпучего материала до и после его обработки в индукторе. Предложены практические рекомендации, которые могут быть учтены при проведении дальнейших уточняющих экспериментальных исследований индуктора.

Ключевые слова: трехфазный индуктор магнитного поля, экспериментальное исследование, физическая модель, рабочий режим, ферромагнитные элементы, объемный коэффициент заполнения камеры, обработка материала.

Purpose. A physical model of a three-phase magnetic field inductor with a cylindrical working chamber is presented for conducting its experimental research in the working mode. **Results.** A frame from the shot video is provided, confirming that the ferromagnetic elements of a certain shape in the operating mode are oriented along the lines of force of the magnetic field during its rotation. This means that the resulting electromagnetic moment, by analogy with synchronous machines, will be reactive, the principle of operation of the inductor will correspond to the principle of operation of a synchronous jet motor. The dependences of the electric values of the magnetic field inductor in the steady-state operating mode are presented, depending on the volumetric coefficient of the chamber filling with ferromagnetic elements. **Originality.** Photos of the material before and after processing it in the inductor are presented. **Practical value.** Practical recommendations are given that can be taken into account during further refinement of experimental studies.

Keywords: three-phase magnetic field inductor, experimental research, physical model, operating mode, ferromagnetic elements, chamber volumetric fill factor, material processing.

Вступ. В різних технологіях перемішування і диспергування дрібних об'єктів з різними магнітними властивостями (з введенням в робочу камеру (РК) ферромагнітних елементів (ФЕ) – для немагнітної сировини та без введення в робочу камеру ФЕ – для ферромагнітної сировини) знайшли застосування індуктори магнітного поля (ІМП) на базі трифазних асинхронних двигунів (ТАД), які відносяться до класу магнітних сепараторів (МС) [1, 2]. Вдосконалення конструкції ІМП проводиться за допомогою уточнюючих розрахунків, використовуючи сучасні методики проектування. А проведення експериментального дослідження фізичної моделі застосовують з метою перевірки адекватності отриманих при теоретичних розрахунках математичних моделей ІМП.

З аналізу наукових публікацій випливає, що широкого застосування отримали експериментальні методи дослідження МС різних конструктивних виконань. Ці методи засновані на використанні фізичних моделей, явища в яких мають однакову фізичну природу з оригіналом. Такий підхід знайшов застосування в дослідженнях дискового МС [3], в результаті чого запропоновані напрямки подальших конструктивних удосконалень пристрою. В роботі [4] зроблено висновок, що результативність запропонованої вдосконаленої конструкції сепараторного каналу магнітогідродинамічного сепаратора необхідно перевірити дослідним шляхом. В роботі [5] шляхом спостереження за фізичною моделлю високоградієнтного МС отримана необ-

хідна інформація для моделювання таких пристроїв, а саме, необхідна швидкість потоку ФЕ та відстань між магнітами. В роботі [6] проведено експериментальне дослідження статора ТАД з новою конфігурацією його обмотки, за рахунок чого збільшено його енергетичні параметри.

Експериментальне дослідження фізичної моделі ІМП на базі ТАД, яка розглядається в даній роботі, в режимі неробочого ходу вже представлялось в [7]. В результаті роботи був підтверджений необхідний для робочого режиму розподіл магнітного поля.

Постановка задачі. Завданням цієї роботи є представлення результатів експериментального дослідження фізичної моделі ІМП на базі ТАД в робочому режимі, згідно якого передбачалось:

- виготовити експериментальний зразок (фізичну модель) ІМП з РК для його дослідження у робочому режимі;
- зафіксувати характер руху ФЕ в РК в робочому режимі роботи ІМП;
- провести вимірювання електричних величин ІМП залежно від об'ємного коефіцієнта заповнення камери ферромагнітними елементами;
- провести оцінку обробки різних речовин за допомогою ФЕ.

Об'єкт дослідження. У якості ІМП використаний статор ТАД серії А51/2. Він розрахован на номінальні лінійні напругу $U_{IN} = 220$ В і струм статора $I_{IN} = 24$ А при частоті $f_s = 50$ Гц. Він має кількість фаз $m_s = 3$ і пар

полюсів $p = 1$, зовнішній $d_{se} = 0,245$ м і внутрішній $d_s = 0,14$ м діаметри осердя статора і його активну довжину $l_a = 0,09$ м, активний опір фазної обмотки статора $R_{s\phi a} = 0,575$ Ом, схема з'єднання – «зірка».

В просторі, де знаходився ротор ТАД, розміщена РК з полівінілхлориду, яка має форму полого, пустотілого циліндра з зовнішнім діаметром $d_{che} = 0,14$ м і товщиною стінки $s_{ch} = 0,005$ м, тобто його внутрішній діаметр

$$d_{ch} = d_{che} - 2 \cdot s_{ch} = 0,14 - 2 \cdot 0,005 = 0,13 \text{ м.} \quad (1)$$

Зовнішній вигляд ІМП з РК представлений на рис. 1.



Рис. 1 – Фізична модель ІМП з РК

Для розміщення у внутрішньому просторі статора зовнішній діаметр РК проточений до розміру, який дозволив помістити її в ІМП, таким чином щоб забезпечити посадку, що не допускала обертання РК. З одного торця до РК прикріплена захисна прозора стінка з оргскла, а іншого боку – знімна пластикова заглушка. У зв'язку з тим, що РК значно перевищувала довжину осердя статора, то довжина активної частини внутрішнього простору камери, в якому має відбуватися робочий процес, обмежувалась додатково картонною заглушкою. І, таким чином, довжина РК відповідала активній довжині осердя статора, тобто $l_{ch} = l_a = 0,09$ м. Тоді, з урахуванням (1) внутрішній об'єм РК склав:

$$V_{ch} = \frac{\pi \cdot d_{ch}^2 \cdot l_{ch}}{4} = \frac{\pi \cdot 0,13^2 \cdot 0,09}{4} = 0,001194 \text{ м}^3. \quad (2)$$

Цей об'єм РК заповнювався ФЕ, що показано на рис. 2.

ФЕ були виготовлені з магнітного сталевго дроту діаметром $d_{Fe} = 0,0007$ мм шляхом нарізання її на відрізки довжиною $l_{Fe} = 0,025$ мм. Фотографія сталевих відрізків дана на рис. 3.

Об'єм ФЕ розраховувався як:

$$V_{Fe} = m_{Fe} / \rho_{Fe}, \quad (3)$$

де ρ_{Fe} – питома маса матеріалу ФЕ зі сталі, $\rho_{Fe} = 7874$ кг/м³; m_{Fe} – маса ФЕ, кг.

При вимірюванні електричних величин ІМП маса ФЕ m_{Fe} змінювалась і становила 0; 0,05; 0,1; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3; 0,35 кг.

З урахуванням (1) та залежно від (2) визначався об'ємний коефіцієнт заповнення камери феромагнітними елементами

$$k_{FeV} = V_{Fe} / V_{ch}. \quad (4)$$



Рис. 2 – Заповнення робочої зони камери



Рис. 3 – ФЕ, виготовлені зі сталевго дроту

Опис експериментального дослідження фізичної моделі ІМП на базі ТАД в робочому режимі, згідно розробленої програми.

При живленні трифазної обмотки статора змінною напругою, з діючим значенням фазної напруги U_{sN} по ній протікали фазні струми з діючим значенням I_s , які створювали обертове магнітне поле. Під його дією ФЕ, розміщені в РК, приводились до руху, орієнтуючись за магнітним полем. ФЕ в РК розташовувались по силових лініях магнітного поля, тобто розвивався електромагнітний момент, що впливає на них за аналогією з синхронними машинами, тобто цей електромагнітний момент, як було описано в [8], є реактивним, а принцип дії ІМП відповідає принципу дії синхронного реактивного двигуна [9].

На рис. 4 показаний кадр з відзнятого відео камерою смартфона Xiaomi Mi 9T Pro в режимі сповільненої зйомки з фіксацією 960 кадрів в секунду, що підтверджує описаний процес.

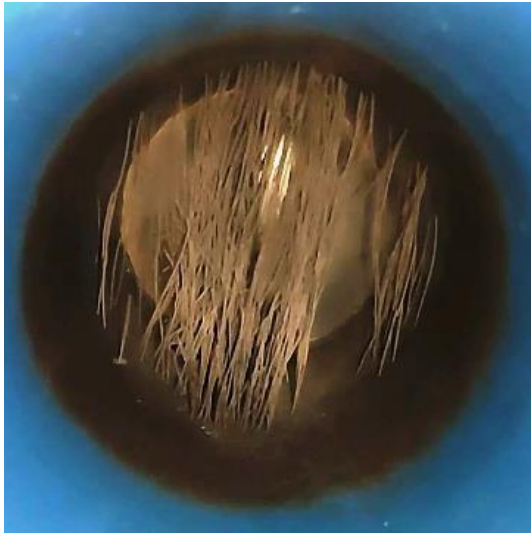


Рис. 4 – ФЕ в РК у робочому режимі роботи ІМП

У робочому режимі роботи ІМП в РК феромагнітними елементами можуть оброблятися різні речовини, що можуть потребувати різної кількості ФЕ, яка може бути виражена об'ємним коефіцієнтом заповнення камери. Для аналізу електричних величин ІМП залежно від маси ФЕ проведено відповідне дослідження. На обмотку статора з мережі було подано змінну трифазну напругу $U_{IN} = 220$ В, тоді згідно рис. 5 в фазних обмотках статора U_1-U_2 , V_1-V_2 , W_1-W_2 при з'єднанні їх за схемою «зірка», фазна напруга $U_s = U_1 / \sqrt{3} = 127$ В, а значення струму кожної фази обмотки I_{sA} , I_{sB} і I_{sC} та споживані фазні потужності P_{inA} , P_{inB} і P_{inC} фіксувались універсальним вимірювальним комплексом типу К50.

Об'ємний коефіцієнт заповнення камери феромагнітними елементами визначений за (4) при різній масі ФЕ і відповідні значення вимірюваних струмів та потужностей кожної фази обмотки представлені в табл. 1.

За вимірними значеннями струмів та потужностей були розраховані:

– усереднений фазний струм обмотки статора

$$I_s = \frac{I_{sA} + I_{sB} + I_{sC}}{3}; \quad (5)$$

– споживана потужність ІМП

$$P_{in} = P_{inA} + P_{inB} + P_{inC}; \quad (6)$$

– коефіцієнт потужності ІМП

$$\cos \varphi = \frac{P_{in}}{3U_s I_s}; \quad (7)$$

– електричні втрати потужності

$$p_{els} = 3I_s^2 R_{s\sigma a}. \quad (8)$$

Результати розрахунків за (5)–(8) надані в табл. 2 та представлені на рис. 6 у вигляді залежностей відповідних величин ІМП.

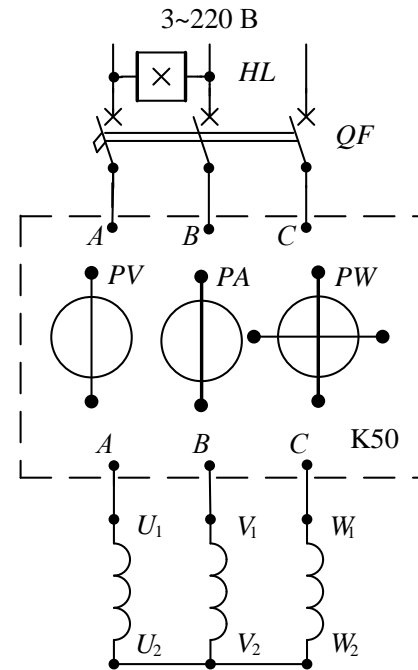


Рис. 5 – Електрична схема проведення експерименту

Таблиця 1 – Виміряні електричні величини ІМП залежно маси ФЕ

m_{Fe} , кг	0	0,05	0,1	0,15
k_{FeV} , в. о.	0	0,0053	0,0106	0,016
I_{sA} , А	50	49	48	47
I_{sB} , А	49	48	47	46
I_{sC} , А	49	47,5	46	45
P_{inA} , Вт	1900	1900	1800	1850
P_{inB} , Вт	1750	1700	1750	1750
P_{inC} , Вт	1700	1700	1900	1900
m_{Fe} , кг	0,2	0,25	0,3	0,35
k_{FeV} , в. о.	0,0213	0,0266	0,0319	0,0372
I_{sA} , А	46	45	44	43
I_{sB} , А	45	44	43,5	42,5
I_{sC} , А	44	43,5	43	42,5
P_{inA} , Вт	1900	1850	1900	1900
P_{inB} , Вт	1800	1900	1800	1800
P_{inC} , Вт	1850	1800	1800	1900

Таблиця 2 – Розраховані величини ІМП залежно від об'ємного коефіцієнта

k_{FeV} , в. о.	0	0,0053	0,0106	0,016
I_s , А	49,33	48,17	47	46
P_{in} , Вт	5350	5300	5450	5500
$\cos \varphi$, в. о.	0,285	0,289	0,304	0,314
p_{els} , Вт	4198	4003	3811	3650
k_{FeV} , в. о.	0,0213	0,0266	0,0319	0,0372
I_s , А	45	44,17	43,5	42,67
P_{in} , Вт	5550	5550	5500	5600
$\cos \varphi$, в. о.	0,324	0,33	0,332	0,344
p_{els} , Вт	3493	3365	3264	3141

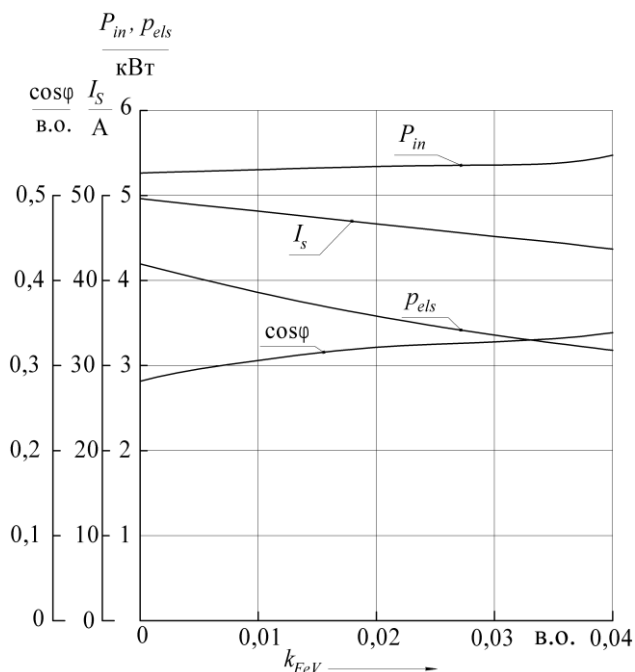


Рис. 6 – Характеристики ІМП у робочому режимі залежно від об'ємного коефіцієнта

Без ФЕ (при $k_{FeV} = 0$) індуктором споживається струм I_s , необхідний для проведення магнітного потоку по РК, простір якої, за даних умов, є немагнітним. При збільшенні маси ФЕ, а відповідно і об'ємного коефіцієнта заповнення ними РК, струм зменшувався за рахунок зменшення його намагнічувальної складової, що було обумовлено зменшенням магнітного опору у камері. У зв'язку з цим, пропорційно струму (8) зменшувались електричні втрати потужності p_{els} і збільшився коефіцієнт потужності $\cos \varphi$.

Також спостерігалось деяке збільшення споживаної потужності P_{in} , не зважаючи на зменшення електричних втрат. Це відбувалося через збільшення втрат потужності на тертя ФЕ о стінку РК, враховуючи збільшення маси цих ФЕ. Магнітними втратами у розглянутому експерименті можна було знехтувати, тому що рівень магнітного поля в РК і, відповідно, в сталевому осерді статора був достатньо низким [7].

Також була проведена оцінка подрібнення речовини за допомогою ФЕ. У цьому досліді у якості оброблювальної речовини використаний гранульований природний матеріал – бентоніт. Тривалість процесу подрібнення, який відбувався при $k_{FeV} = 0,0372$ та масі бентоніту $m_{pr} = 1,05$ кг складала 5 с. Фотографія оброблювальної речовини до та після її подрібнення за даних умов представлена на рис. 7 а та б у загальному вигляді та її збільшений фрагмент. Діаметр фракції бентоніту до обробки становив 0,8 – 1,5 мм, а після їх подрібнення матеріал став практично пилоподібним.

Але, тут треба зауважити, що струм I_s , який фіксувався амперметром вимірювального комплексу, у робочому режимі за наявності окрім ФЕ в РК оброблювального матеріалу (реального режиму навантаження для ІМП) та без нього (при наявності в РК тільки ФЕ) практично не змінювався. Хоча, як пояснювалось в [8], різниця струмів у цих двох режимах і має

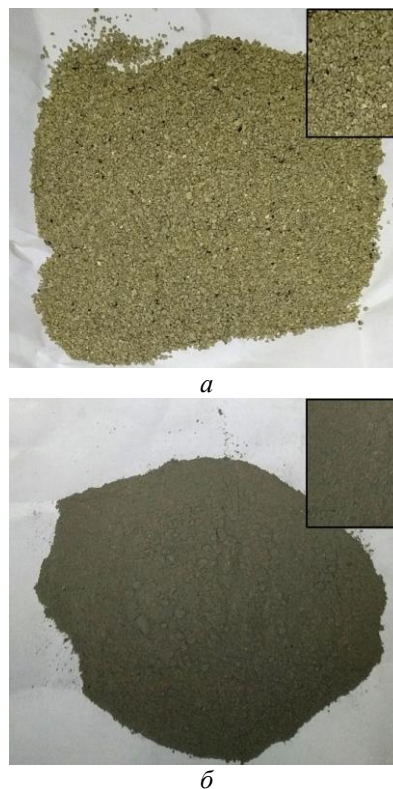


Рис. 7 – Оброблювальна речовина до (а) та після (б) її подрібнення у камері ІМП

відрізняти характеристики ІМП. Тут відсутність цієї різниці струмів пояснюється тим, що тривалість подрібнення матеріалу була досить незначною, а амперметр фіксував вже усталений струм, при якому оброблювальний матеріал вже не чинив опору для обертання феромагнітних елементів. Тобто можна зробити висновок, що для експериментального дослідження ІМП у режимі навантаження повинні бути використані прилади, які фіксують зміну струму і потужності у динамічному режимі.

Висновки.

1. Представлений експериментальний зразок ІМП дозволив провести дослідження згідно розробленої програми.
2. Підтверджено, що ФЕ представленої форми в робочому режимі орієнтуються за силовими лініями магнітного поля при його обертанні, і при цьому вони розподіляються по всьому об'єму РК.
3. За отриманими залежностями електричних величин ІМП можна проводити оцінку його стану в усталеному робочому режимі.
4. Надані практичні рекомендації можуть бути враховані при проведенні подальших уточнюючих експериментальних досліджень.

Список літератури

1. Загирняк М. В., Бранспиз Ю. А., Шведчикова И. А. Магнитные сепараторы. Проблемы проектирования: Монография / М. В. Загирняк, Ю. А. Бранспиз, И. А. Шведчикова. – К.: Техніка, 2011. – 224 с.
2. Логвиненко Д. Д., Шеляков О. П. Интенсификация технологических процессов в аппаратах с вихревым слоем / Д. Д. Логвиненко, О. П. Шеляков. – К.: Техніка, 1976. – 144 с.

3. Шведчикова І. О. Експериментальна перевірка працездатності дискового магнітного сепаратора нової конструкції / І. О. Шведчикова, І. В. Мелконова // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – 2018. – № 1 (249). – С. 125-130. doi: <https://doi.org/10.15407/techned2018.01.047>
4. Кондратенко І. П. Исследование магнитогидродинамического сепаратора / И. П. Кондратенко, А. В. Некрасов, Е. Е. Волканин // Электромеханические и энергосберегающие системы. – 2011. – № 3/2011 (15). – С. 107-109.
5. Zeinab K. Study and optimization of a high-gradient magnetic separator using flat and lattice plates / K. Zeinab, H. Shadi, G. Koorosh Azodi // IEEE Transactions on Magnetics. – 2018, vol. 55, no. 2. – pp. 1–8. – doi: 10.1109/TMAG.2018.2883624.
6. Kishor S. Design and development of three phase induction motor using written pole technology / S. Kishor, Dr. Prof. K. Bansal, Dr. A. Killedar // JOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering. – Sep-Oct 2016. – vol. 11, is. 5, ver. III. – pp. 49-56. – doi: 10.9790/1676-1105034956.
7. Мілих В. І. 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". – 2018. – № 5 (1281). – С. 104–109.
8. Мілих В. І. Численно-полевой анализ характеристик трехфазного индуктора магнитного поля для обработки различных веществ при стабилизации его тока / В. И. Милых, Л. В. Шилкова // Электротехника і Електромеханіка. – 2019. – № 6. – С. 21-28. – doi: 10.20998/2074-272X.2019.6.03.
9. Вольдек А. И., Попов В. В. Электрические машины. Машины переменного тока / А. И. Вольдек, В. В. Попов. – СПб.: Питер, 2010. – 356 с.
3. Shvedchikova I. O., Melkonova I. V. Eksperymental'na perevirka pracezdatnosti dy'skovogo magnitnogo separatora novoyi konstrukciyi [Experimental verification of operability of new construction disc magnetic separator]. *Visnyk Svidnoukrayins'kogo nacional'nogo univertytetu imeni Volodymyr'a Dalya – Bulletin East Ukrainian National University of Volodymyr Dahl*. 2018, no. 1 (249), pp. 125-130. (Ukr) doi: <https://doi.org/10.15407/techned2018.01.047>
4. Kondratenko I. P. Nekrasov A. V., Volkanin Ye. Ye. Issledovaniye magnetogidrodinamicheskogo separatora [Research of magnetogidrodinamic separator] *Yeletromekhanichni i yenergosberegayuchi sistemi– Electromechanical and energy-saving system*. 2011, no. 3 (15), pp. 107-109. (Rus)
5. Kheshti Zeinab, Hassanajili Shadi, Ghajar Koorosh Azodi. Study and optimization of a high-gradient magnetic separator using flat and lattice plates. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2018, vol. 55, no. 2. pp. 1–8. doi: 10.1109/TMAG.2018.2883624.
6. Kishor S. Dr. Prof. Bansal K., Dr. Killedar A. Design and development of three phase induction motor using written pole technology. *JOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering*, Sep - Oct 2016, vol. 11, is. 5, ver. III., pp. 49-56, doi: 10.9790/1676-1105034956.
7. Milykh V. I., Shilkova L. V. Chy'sel'no-eksperymental'ny'j analiz magnitnogo polya induktora magnitnogo separatora na bazi asynxronnogo dvy'guna [Numerical-experimental analysis of the magnetic field of a magnetic separator inductor on the basis of an asynchronous motor]. *Visnyk Nacional'nogo texnichnogo univertytetu «XPI». Seriya: "Elektrychni mashyny` ta elektromexanichne peretvorenniya energiyi"* – *Bulletin of NTU "KhPI". Series: "Electric machines and electromechanical energy conversion"*. 2018, no.5 (1281), pp. 104-109. (Ukr)
8. Milykh V., Shilkova L. Chislenno-polevoj analiz harakteristik trehfaznogo induktora magnitnogo polja dlja obrabotki razlichnyh veshhestv pri stabilizacii ego toka [Numerical-field analysis of the characteristics of a three-phase magnetic field inductor for the treatment of various substances with current stabilization]. *Elektrotexnika i Elektromexanika – Electrical engineering & electromechanics*. 2019, no. 6, pp. 21-28. (Rus) doi: 10.20998/2074-272X.2019.6.03.
9. Voldek A. I., Popov V. V. *Elektricheskie mashiny. Mashiny peremennogo toka* [Electrical Machines. Machines of alternating current], SPb, Piter Publ, 2010, 356 p. (Rus)

References (transliterated)

1. Zahrynyak M. V., Branspiz Ju. A., Shvedchikova I. A. *Magnitnye separatory. Problemy proektirovaniya* [Magnetic separators. Design issues]. Kiev, Tehnika Publ, 2011, 224 p. (Rus)
2. 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. (Rus)

Надійшла (received) 12.01.2020

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Мілих В. І. Експериментальне дослідження фізичної моделі трифазного індуктора магнітного поля в робочому режимі при обробці сипучого матеріалу / В. І. Мілих, Л. В. Шилкова // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: «Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії». – 2020. – № 3 (1357). – С. 3-7. – doi:10.20998/2409-9295.2020.3.01.

Милых В. И. Экспериментальное исследование физической модели трехфазного индуктора магнитного поля в рабочем режиме при обработке сыпучего материала / В. И. Милых, Л. В. Шилкова // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: «Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії». – 2020. – № 3 (1357). – С. 3-7. – doi:10.20998/2409-9295.2020.3.01.

Milykh V. Experimental research of the three-phase physical model of the magnetic field inductor in the working mode when processing bulk material / V. I. Milykh, L. V. Shilkova // Bulletin of NTU "KhPI". Series: "Electric machines and electromechanical energy conversion." – 2020. – No. 3 (1357). – P. 3-7. – doi:10.20998/2409-9295.2020.3.01.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Мілих Володимир Іванович (Милых Владимир Иванович, Milykh Vladimir Ivanovych) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри електричних машин, м. Харків, Україна, тел. (057)707-65-14; ORCID: 0000-0002-6176-3103; e-mail: mvikemkpi@gmail.com.

Шилкова Лариса Василівна (Шилкова Лариса Васильевна, Shilkova Larisa Vasilivna) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший викладач кафедри електричних машин, м. Харків, Україна, тел. (057)707-68-44, ORCID: 0000-0003-0009-3502; e-mail: larisa_lv@ukr.net.