

УДК 004.4:004.5:537.876

doi:10.20998/2413-4295.2022.03.03

МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ У РОБОЧІЙ ЗОНІ СПЕЦІАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ З УРАХУВАННЯМ ВПЛИВУ МАГНІТНОГО ЕКРАНУ

О. С. КРЯЧОК^{1*}, Д. А. СУШКО²

¹ Кафедра цифрових технологій в енергетиці, Національний технічний університет України «КПІ ім. І. Сікорського», Київ, УКРАЇНА

² Інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова, Київ, УКРАЇНА

*e-mail: alexandrkiachok@gmail.com

АНОТАЦІЯ Робота присвячена створенню сучасної веб-орієнтованої програмної платформи для проектування магнітних систем спеціальних приладів та електричних машин нових поколінь, що побудовані на базі постійних магнітів. Розв'язання задачі підвищення точності виконуваних розрахунків обумовлює необхідність розробки нових математичних моделей, що враховують екрануючий вплив елементів конструкції на фізичні процеси в електромеханічних пристроях. Для отримання математичних виразів з розрахунку складових напруженості магнітного поля в заданих точках кусково-однорідного простору застосовано метод вторинних джерел. У якості досліджуваної системи обрано узагальнену конструкцію магнітного підвісу, що побудована на базі включених назустріч один одному постійних магнітів. Уся конструкція розміщена в корпусі-екрані. Оскільки електромагнітна система пристрою в своїй конструкції містить деталі складної форми та має нелінійні характеристики середовища, для отримання математичної моделі запропоновано підхід, який базується на тому, що для кусково-однорідного середовища задачу розрахунку магнітного поля можна сформулювати у вигляді системи лінійних інтегральних рівнянь Фредгольма другого роду. У відповідності до методу вторинних джерел, розв'язок задачі розрахунку поля розділено на два етапи: спочатку знаходиться розподіл додаткових джерел, для яких еквівалентна впливу неоднорідного середовища на фізичні процеси в робочій зоні, а на наступному етапі за принципом суперпозиції полів розраховується сумарне магнітне поле, що спричинене присутністю первинних та вторинних джерел. На основі отриманої математичної моделі розроблено розрахунковий алгоритм та створено веб-орієнтовану програмну систему для моделювання характеристик магнітного поля. З використанням розробленого програмного застосування проведено чисельні експерименти по моделюванню магнітного поля у робочій зоні електротехнічного пристрою за заданими електрофізичними та геометричними параметрами конструкції. Запропонований підхід може бути використаний для розв'язання інших подібних задач, коли необхідно розрахувати характеристики системи, що містить постійні магніти в умовах кусково-однорідного середовища.

Ключові слова: магнітне поле; математична модель; метод вторинних джерел; розрахунок електромагнітного процесу; алгоритм; інформаційна технологія

SIMULATION OF ELECTROMAGNETIC PROCESSES IN THE WORKING AREA OF SPECIAL DEVICES CONSIDERING THE INFLUENCE OF THE MAGNETIC SCREEN

O. KRIACHOK^{1*}, D. SUSHKO²

¹ Department of Digital Technologies in Energy, IATE, National Technical University "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, UKRAINE

² V.M. Glushkov Institute of Cybernetics of the National Academy of Sciences (NAS) of Ukraine, Kyiv, UKRAINE

ABSTRACT The work is devoted to the creation of a modern web-oriented software platform for designing magnetic systems of special devices and electric machines of new generations that are built on the basis of permanent magnets. To solve the problem of increasing the accuracy of the performed calculations it is necessary to develop new mathematical models that take into account the shielding effect of structural elements on physical processes in electromechanical devices. To obtain mathematical expressions for the calculation of strength components of the magnetic field at given points of piecewise homogeneous space, the method of secondary sources is applied. The studied system is of a generalized design of a magnetic suspension built on the basis of the connected permanent magnets that are facing each other. The entire structure is placed in the shielded housing. Since the electromagnetic system of the device contains parts of a complex shape in its design and has non-linear characteristics of the environment, in order to obtain a mathematical model, an approach is suggested that is based on that a task of calculating the magnetic field for a piecewise homogeneous medium can be formulated in the form systems of Fredholm linear integral equations of the second kind. In accordance with the method of secondary sources, the solution to the field calculation problem is divided into two stages: first the distribution of additional sources is found, the effect of which is equivalent to the influence of a heterogeneous environment on physical processes in work zone, and, at the next stage, based on the principle of superposition of fields, the total magnetic field caused by the presence of primary and secondary sources is calculated. Based on the obtained mathematical model, a calculation algorithm was developed and a web-oriented software system for modeling magnetic field characteristics was created. Using the developed software application, numerical experiments were conducted to simulate the magnetic field in the work zone of an electrical device according to the given electrophysical and geometric design parameters. The proposed approach can be used to

solve other similar problems when it is necessary to calculate the characteristics of a system containing permanent magnets in the conditions of a piecewise homogeneous environment.

Keywords: magnetic field; mathematical model; method of secondary sources; electromagnetic process computation; algorithm; information technology

Вступ

Сучасний рівень технологічного розвитку суспільства зумовлює широке використання автономних роботизованих систем різноманітного базування. Як відомо, кінцевими елементами таких систем є виконуючі пристрої, що побудовані на базі електромеханічних пристроїв різноманітних типів.

При проектуванні нових типів високоточних виконуючих пристроїв необхідно виконати розрахунки електромагнітних полів у робочій зоні. В роботі [1] було отримано математичні моделі для проведення таких розрахунків з метою моделювання параметрів магнітного поля. При цьому було вказано, що для математичного опису реальних фізичних процесів екрануючий вплив елементів конструкції на магнітне поле в робочій зоні не враховувався.

Необхідно підкреслити, що корпус та інші складові є важливими конструктивними елементами і, звичайно, для підвищення точності виконуваних розрахунків необхідно враховувати їх вплив на фізичні процеси всередині (а в деяких задачах і ззовні) електромеханічних пристроїв. Враховуючи вищевикладені міркування, в даній статті буде розглянуто підхід щодо отримання математичної моделі для розрахунку параметрів магнітного поля у робочій зоні виконуючого пристрою з урахуванням екрануючих властивостей елементів конструкції. При цьому математичні рівняння, що були отримані в попередній роботі [1], будуть теж частково використані, наприклад, для порівняння результатів моделювання з використанням кількох математичних моделей.

Мета роботи

В даній статті розглядається один із можливих підходів для отримання кінцевих виразів з розрахунку складових напруженості магнітного поля в заданих точках кусково-однорідного простору.

Таким чином, у статті отримано та наведено математичні вирази напруженості магнітного поля у зазорах магнітного підвісу в кусково-однорідному середовищі і результати чисельного моделювання характеристик систем. На базі кінцевих математичних виразів розроблено алгоритм моделювання параметрів магнітного поля у робочій зоні пристрою та реалізовано сучасний програмний застосунок на основі клієнт-серверної архітектури.

Виклад основного матеріалу

Узагальнена конструкція пристрою приведена на рис. 1. Як можна побачити, вона складається з 3-х

постійних магнітів циліндричної форми, які розташовано в корпусі-екрані теж циліндричної форми.

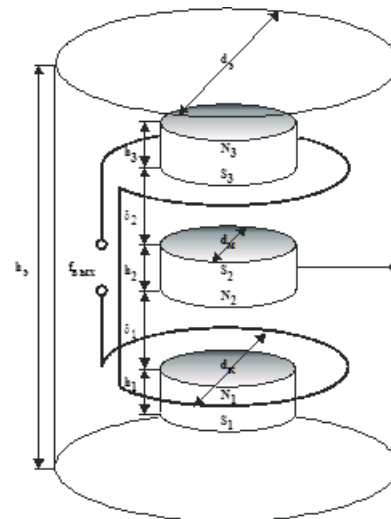


Рис. 1 – Узагальнена конструкція пристрою

Головною частиною електромагнітного пристрою є магнітна система, призначена для створення та концентрації магнітного поля у заданому обмеженому просторі. Оскільки електромагнітним полем, створюваним магнітною системою, визначаються основні властивості та характеристики механізму, то для розрахунку поля у робочій зоні необхідно отримати математичну модель, що враховує екрануючі властивості елементів конструкції.

У статті розглядаються математичні вирази для розрахунку напруженості магнітного поля у робочій зоні пристрою з постійними магнітами для кусково-однорідного середовища та наводяться результати чисельного моделювання характеристик систем.

Метод розв'язання

Оскільки електромагнітна система пристрою в своїй конструкції містить деталі складної форми та має нелінійні характеристики середовища, запропоновано підхід, який базується на тому, що для кусково-однорідного середовища задачу розрахунку магнітного поля можна сформулювати у вигляді системи лінійних інтегральних рівнянь Фредгольма другого роду [2].

У відповідності до методу вторинних джерел [3], розв'язок задачі розрахунку поля може бути розділений на два етапи: спочатку знаходиться розподіл додаткових (вторинних) джерел q_N , дія яких еквівалентна впливу неоднорідного середовища на

фізичні процеси в робочій зоні, а на наступному етапі за принципом суперпозиції полів розраховується сумарне магнітне поле, що спричинене присутністю первинних q_N та вторинних q_m джерел. У випадку канонічних форм граничних поверхонь (наприклад, площина, циліндр, сфера) можна отримати безпосередньо розв'язувані рівняння для визначення додаткових джерел, що призводить до вичерпного розв'язку поставленої задачі.

У разі неможливості отримання аналітичних виразів, що описують поле в кінцевому вигляді, для деяких окремих випадків задача може бути вирішена із застосуванням чисельних методів. У цьому випадку розрахунок поля ускладнюється відсутністю ефективних методик, а сама задача проектування магнітної системи вирішується застосуванням напівемпіричних методів та багаторазовими лабораторними експериментами, що пов'язано з суттєвими економічними витратами.

Для статичних процесів за наявності, в загальному випадку, будь-яких магнетиків, згідно з [4], можна записати основні рівняння поля у диференціальній формі у вигляді:

$$\text{rot } \vec{H} = \text{rot} (\vec{H}' + \vec{H}'') = \vec{j}; \text{div } \vec{B} = 0, \quad (1)$$

де \vec{H}' – вихрова складова напруженості магнітного поля; \vec{H}'' – безвихрова складова поля; \vec{j} – вектор густини струму; \vec{B} – вектор магнітної індукції.

Для формулювання граничних умов будемо виходити з того, що надпровідний стан речовини відрізняється від звичайного тим, що магнітне поле не проникає вглиб надпровідника (точніше кажучи, магнітне поле дуже швидко експоненційно спадає від поверхні в глиб). Виходячи з цього краєві умови можна представити у вигляді:

$$(\vec{n}, \vec{H}_-) = 0. \quad (2)$$

Оскільки для вихрової складової напруженості магнітного поля маємо:

$$\text{rot } \vec{H}' = \vec{j}; \text{div } \mu \vec{H}' = 0, \quad (3)$$

тоді, виходячи з рівнянь (1) та (3), запишемо:

$$\text{rot } \vec{H}'' = 0. \quad (4)$$

Таким чином, вторинне поле носить потенційних характер:

$$\vec{H}'' = -\text{grad } \varphi_N. \quad (5)$$

Тоді скалярний магнітний потенціал φ_N для кусково-однорідного середовища можна визначити наступним чином:

$$\varphi_N = \frac{1}{4\pi} \int_{S_N} (\vec{H}_{n+}'' - \vec{H}_{n-}'') \frac{1}{R_{QN}} dS. \quad (6)$$

Для того щоб описати поведінку магнітного поля на границі надпровідника, скористаємося дельта-функцією Дірака [5], яка визначена на всій осі $(-\infty, +\infty)$ наступним чином:

$$\theta(x) = \begin{cases} 0 & \text{при } x \leq x_0 - \delta; \\ 1/2 & \text{при } x = x_0; \\ 1 & \text{при } x \geq x_0 + \delta. \end{cases} \quad (7)$$

Виходячи з рівнянь (2) та (7) для нормальної складової магнітного поля на границі розділу середовища можна написати наступний вираз:

$$\vec{H}_- = \vec{H}_+ * \theta(x). \quad (8)$$

Отримаємо рівняння з розрахунку стрибка напруженості магнітного поля на поверхні надпровідника. Оскільки $\vec{H} = \vec{H}' + \vec{H}''$, то можна записати:

$$(H_{n+}'' + H_n') * \theta(x) = H_{n-}'' + H_n'. \quad (9)$$

Враховуючи, що $H_n'' = (H_{n+}'' + H_{n-}'') / 2$, після очевидних перетворень отримуємо шукане рівняння (10) для розрахунку стрибка напруженості магнітного поля на поверхні надпровідника:

$$H_{n+}'' - H_{n-}'' = 2 \frac{1-\theta(x)}{1+\theta(x)} (H_n'' + H_n'). \quad (10)$$

В рівнянні (10) H_n'' знаходиться на основі (5) та (6), а значення H_n' – на основі закону Біо-Савара, а саме:

$$\vec{H}'(Q) = -\frac{1}{4\pi} \int_{V_M} \frac{[\vec{J}_M R_{QM}]}{R_{QM}^3} dV, \quad (11)$$

де \vec{J}_M – це вектор щільності струму, що знаходиться в об'ємі V .

Виконавши рутинні перетворення на базі рівнянь (10) та (11), отримуємо інтегральне рівняння для вектора щільності поверхневих струмів \vec{J}_N :

$$\vec{J}_N + \frac{\lambda_{СП}}{2\pi} \int_{V_N} \frac{[\vec{J}_N R_{QN}]}{R_{QN}^3} \vec{n} dV = -\frac{\lambda_{СП}}{2\pi} \int_{V_M} \frac{[\vec{J}_M R_{QM}]}{R_{QM}^3} \vec{n} dV, \quad (12)$$

де $\lambda_{СП} = \frac{1-\theta(x)}{1+\theta(x)}$; $J_N = H_{n+}'' - H_{n-}''$; \vec{R}_{QN} , \vec{R}_{QM} – це радіус-вектори між, відповідно, точками спостереження поля Q та точками N і M , де розташовані джерела поля.

Таким чином, у відповідності до запропонованого способу вирішення поставленої задачі, можна сказати, що стрибок нормальної складової напруженості магнітного поля для надпровідного екрана обумовлено фіктивними струмами з поверхневою густиною J_N .

Після знаходження розподілу вторинних джерел j_N вектор напруженості магнітного поля $\vec{H}(Q)$ визначається за принципом суперпозиції полів (13), що обумовлені всіма джерелами:

$$\vec{H}(Q) = -\frac{1}{4\pi} \int_{V_M} \frac{[j_M R_{QM}]}{R_{QM}^3} dV - \frac{1}{4\pi} \int_{V_N} \frac{[j_N R_{QN}]}{R_{QN}^3} dV. \quad (13)$$

Усі подальші викладки базуються на інтегральному рівнянні (12), яке можна розглядати як математичну модель для розрахунку стаціонарного магнітного поля у кусково-однорідному середовищі.

Для розробки алгоритму програмного застосунку, що призначений для проведення чисельних розрахунків параметрів магнітного поля

$$\vec{j}_N + \frac{\lambda_{СП}}{2\pi} \int_{l_N} \frac{2}{\sqrt{(R_Q+R_N)^2+(z_Q-z_N)^2}} * \left\{ \frac{z_Q-z_N}{R_Q} \left[\frac{R_Q^2+R_N^2+(z_Q-z_N)^2}{(R_Q-R_N)^2+(z_Q-z_N)^2} * E(k) - K(k) \right] * \vec{e}_\rho + \left[\frac{R_N^2-R_Q^2-(z_Q-z_N)^2}{(R_Q-R_N)^2+(z_Q-z_N)^2} * E(k) + K(k) \right] * \vec{e}_z \right\} * \vec{j}_N dl_N = -\frac{\lambda_{СП}}{2\pi} \int_0^{h_M} \frac{2}{\sqrt{(R_Q-R_M)^2+(z_Q-z_M)^2}} * \left\{ \frac{z_Q-z_M}{R_Q} \left[\frac{R_Q^2+R_M^2+(z_Q-z_M)^2}{(R_Q-R_M)^2+(z_Q-z_M)^2} * E(k) - K(k) \right] * \vec{e}_\rho + \left[\frac{R_M^2-R_Q^2-(z_Q-z_M)^2}{(R_Q-R_M)^2+(z_Q-z_M)^2} * E(k) + K(k) \right] * \vec{e}_z \right\} * \vec{j}_M dh_M, \quad (14)$$

де $K(k)$ та $E(k)$ – це повні еліптичні інтеграли, відповідно, 1-го та 2-го роду.

В скороченій операторній формі рівняння має наступний вигляд:

$$j_N + \lambda_{СП} S j_N = -F. \quad (15)$$

Для знаходження рішення інтегрального рівняння виконаємо його заміну кінцевою системою лінійних алгебраїчних рівнянь [3]. Таким чином, для $j - zO$ інтервалу зі щільністю $j_{N,j}$ можна записати наступне співвідношення:

$$j_{N,j} + \frac{\lambda_{СП}}{2\pi} \sum_{j=1}^N j_{N,j} \int_{\Delta l_{N,j}} K(Q, N) dl_{N,j} = -F(Q). \quad (16)$$

Надавши індексу j значення від 1 до N , отримаємо систему алгебраїчних рівнянь з N невідомими. Іншими словами, ми отримали систему алгебраїчних рівнянь 1-го ступеня, що має такий вигляд:

$$A[i][j] * X[j] = P[i]. \quad (17)$$

Співвідношення (17) використовується для знаходження розподілу вторинних джерел.

Таким чином, ми отримали всі основні рівняння, що являють собою шукану математичну модель для розрахунку магнітного поля у робочій зоні електротехнічного пристрою. Зрозуміло, що для реалізації програмного застосунку, було також проведено спеціальний аналіз математичної моделі з метою унеможливлення виникнення помилок, які пов'язані з виконанням розрахунків в «особливих точках».

для запропонованої конструкції магнітної системи, необхідно виконати перетворення рівняння (12) з метою отримання розгорнутих аналітичних рівнянь.

Вочевидь, для запропонованої конструкції пристрою (рис. 1) магнітне поле буде осесиметричним. З цієї причини було використано циліндричну систему координат (ρ, φ, z) з ортами $\vec{e}_\rho, \vec{e}_\varphi, \vec{e}_z$. Це припущення дозволяє виконати розрахунки поля в одній меридіанній площині.

Виконавши для рівняння (12) інтегрування ядра по новій змінній $\alpha = \pi - 2\beta$ та провівши достатньо об'ємні математичні перетворення [6, 7] та спрощення отримаємо наступне співвідношення:

Результати чисельного моделювання

На основі отриманої математичної моделі було розроблено розрахунковий алгоритм та створено сучасну платформу [8, 9] для моделювання характеристик магнітного поля [10], у якій, завдяки використанню клієнт-серверної архітектури вдалося перенести ресурсомісткі обчислення з персонального комп'ютера або портативного пристрою користувача у хмару, яка має значно більші обчислювальні можливості та які можливо досить легко масштабувати.

На стороні користувача, у веб-браузері, виконується лише та частина програмного коду, що відповідає за обмін даними між користувачем та сервером та виконує графічне відображення отриманих результатів. Таке виконання коду у вікні браузера додає новий рівень абстракції, завдяки якому програма не залежить від операційної системи і може використовуватись на будь-яких пристроях, де встановлений один з поширених веб-браузерів. Завдяки тому, що більша частина логіки знаходиться на стороні серверу, оновлення компонентів системи може бути виконане в незалежному від кінцевого користувача режимі у час низької активності системи.

При проектуванні програмного комплексу для виконання чисельних розрахунків поля було додатково розроблено наступні основні підпрограми:

- модуль введення/перевірки вхідної інформації та формування масивів даних;
- модуль розрахунку значень правої частини інтегрального рівняння;
- модуль розв'язання системи алгебраїчних рівнянь 1-го ступеня;
- модуль розрахунку еквівалентного поля від усіх (первинних та вторинних) джерел;

- модуль розрахунку електромагнітних характеристик пристрою;
- модуль, що здійснює читання/запис результатів розрахунків з/в спеціальні файли параметрів;
- модуль графічного відображення результатів.

З використанням розробленого програмного застосунку [10] було проведено низку чисельних експериментів. На рис. 2 приведено результати розрахунків, що демонструють (ліва частина рисунку) магнітне поле від вторинних джерел та (права частина) картину магнітного поля в робочій зоні пристрою. Зрозуміло, що масштаби обиралися з міркувань наочності відображення отриманих результатів.

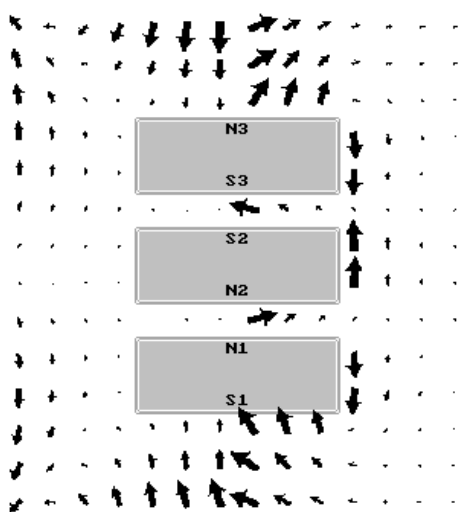


Рис. 2 – Результати моделювання картини магнітного поля

За допомогою програмного комплексу можна також виконати розрахунки магнітного поля у робочій зоні для довільної конструкції магнітної системи. Варіанти таких розрахунків показано на рис. 3 та рис. 4.

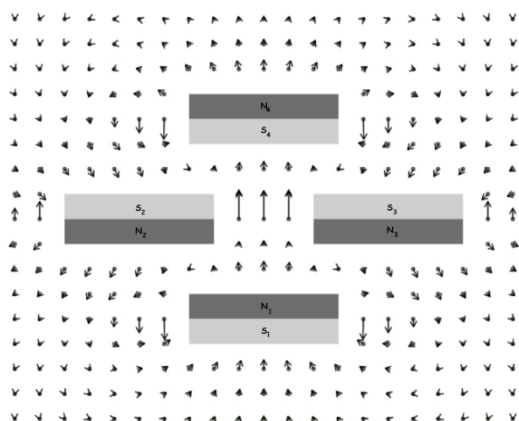


Рис. 3 – Картина магнітного поля для конструкції «ромб»

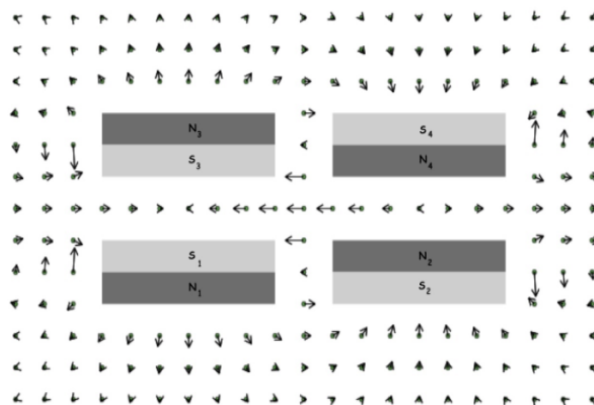


Рис. 4 – Картина магнітного поля для конструкції «квадрат»

Аналіз результатів чисельного моделювання з використанням розробленого програмного застосунку показує, що запропонований алгоритм дає стійке рішення задачі по розрахунку картини магнітного поля у кусково-однорідному середовищі.

Висновки

В роботі приведено математичні моделі, які дозволяють виконати розрахунок магнітного поля у робочій зоні пристрою за заданими електрофізичними та геометричними параметрами конструкції. При отриманні математичних моделей було враховано неоднорідність параметрів середовища. На їх основі розроблено сучасний програмний застосунок на клієнт-серверній архітектурі та проведено чисельне моделювання магнітного поля. Отримано результати, що в базових своїх складових повністю узгоджуються з результатами розрахунків з використанням інших математичних моделей.

Запропонований підхід може бути використаний для розв'язання інших подібних задач, коли необхідно розрахувати характеристики системи, що містить постійні магніти в умовах кусково-однорідного середовища. А застосування обчислювального комплексу дозволяє знаходити рішення для класу завдань, що описуються інтегральними рівняннями, які можуть бути приведені до системи лінійних алгебраїчних рівнянь.

Список літератури

1. Крячок О. С., Реуцький М. О., Сушко Д. А. До питання розрахунку характеристик спеціальних пристроїв з магнітною системою на основі постійних магнітів. *Вісник Національного технічного університету «ХП»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХП». 2021. № 2 (8). С. 77-82. doi: 10.20998/2413-4295.2021.02.11.
2. Гринберг Г. А. *Избранные вопросы математической теории электрических и магнитных явлений*. М.: Издательство АН СССР, 1948. 727 с.

3. Тозони О. В. *Метод вторичных источников в электротехнике*. М.: Энергия, 1975. 296 с.
4. Тамм И. Е. *Основы теории электричества: Учеб. пособие для вузов*. 11-е изд. испр. и доп. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 616 с.
5. Корн Г., Корн Т. *Справочник по математике для научных работников и инженеров*. М.: Наука, 1974. 832 с.
6. Андре Анго. *Математика для электро- и радиоинженеров*. М.: Наука, 1967. 780 с.
7. Двайт Г. Б. *Таблицы интегралов и другие математические формулы*. М.: Наука, 1973. 228 с.
8. Schildt H. *Java: The Complete Reference*. Herbert Schildt, 2021. 1280 с.
9. Allamaraju S. *RESTful Web Services Cookbook: Solutions for Improving Scalability and Simplicity*. Subbu Allamaraju, 2010. 316 с.
10. Крячок О. С., Сушко Д. А. Комп'ютерна програма «Electro-Magnetic Laboratory»: Свідчення про реєстрацію авторського права на твір № 111491. Україна. Дата реєстрації 01.02.2022. 1 с.
11. Kriachok O., Reutskyi M., Sushko D. To the question of the calculating of the special devices characteristics with a magnetic system based on the permanent magnets. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2021, no. 2 (8), pp. 77-82, doi: 10.20998/2413-4295.2021.02.11.
12. Grinberg G. A. *Izbrannyye voprosy matematicheskoy teorii elektricheskikh i magnitnykh yavleniy*. M., Izdatelstvo AN SSSR, 1948. 727 p.
13. Tozoni O. V. *Metod vtorichnykh istochnikov v elektrotehnike*. M., Energiya, 1975. 296 p.
14. Tamm I. E. *Osnovy teorii jelektrichestva: Ucheb. posobie dlja vuzov*. – 11-e izd ispr. i dop. M., FIZMATLIT, 2003. 616 p.
15. Korn G., Korn T. *Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov*. M., Nauka, 1974. 832 p.
16. Andre Ango. *Matematika dlya elektro- i radioinzhenerov*. M., Nauka, 1967. 780 p.
17. Dvajt G. B. *Tablicy integralov i drugie matematicheskie formuly*. M., Nauka, 1973. 228 p.
18. Schildt H. *Java: The Complete Reference*. Herbert Schildt, 2021. 1280 p.
19. Allamaraju S. *RESTful Web Services Cookbook: Solutions for Improving Scalability and Simplicity*. Subbu Allamaraju, 2010. 316 p.
20. Kriachok O. S., Sushko D. A. Kompiuterna prohrama «Electro-Magnetic Laboratory»: Svidotstvo pro reiestratsiiu avtorskoho prava na tvir № 111491. Ukraina. Data reiestratsii 01.02.2022. 1 p.

References (transliterated)

Відомості про авторів (About authors)

Крячок Олександр Степанович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», доцент кафедри автоматизації проектування енергетичних процесів та систем; м. Київ, Україна; ORCID: 0000-0003-4829-635X; e-mail: alexandr.kriachok@gmail.com.

Kriachok Oleksandr – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), associate professor, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Associate Professor of Department of Computer Aided Design Energy Processes and Systems, Kyiv, Ukraine; ORCID: 0000-0003-4829-635X; e-mail: alexandr.kriachok@gmail.com.

Сушко Дмитро Анатолійович – аспірант, Інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова. м. Київ, Україна; e-mail: dmytro.a.sushko@gmail.com.

Sushko Dmytro – graduate student, V.M. Glushkov Institute of Cybernetics of the National Academy of Sciences (NAS) of Ukraine, Kyiv, Ukraine; e-mail: dmytro.a.sushko@gmail.com.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Крячок О. С., Сушко Д. А. Моделювання електромагнітних процесів у робочій зоні спеціальних пристроїв з урахуванням впливу магнітного екрану. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2022. № 3 (13). С. 18-23. doi:10.20998/2413-4295.2022.03.03.

Please cite this article as:

Kriachok O., Sushko D. Simulation of electromagnetic processes in the working area of special devices considering the influence of the magnetic screen. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2022, no. 3(13), pp. 18–23, doi:10.20998/2413-4295.2022.03.03.

Надійшла (received) 03.09.2022