

УДК 004.4:004.5:537.876

doi:10.20998/2413-4295.2021.02.11

## ДО ПИТАННЯ РОЗРАХУНКУ ХАРАКТЕРИСТИК СПЕЦІАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ З МАГНІТНОЮ СИСТЕМОЮ НА ОСНОВІ ПОСТІЙНИХ МАГНІТІВ

О. С. КРЯЧОК<sup>1\*</sup>, М. О. РЕУЦЬКИЙ<sup>2</sup>, Д. А. СУШКО<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Кафедра автоматизації проектування енергетичних процесів і систем, Національний технічний університет України «КПІ ім. І. Сікорського», Київ, УКРАЇНА

<sup>2</sup> Кафедра електромеханіки, Національний технічний університет України «КПІ ім. І. Сікорського», Київ, УКРАЇНА  
\*e-mail: alexandrkiachok@gmail.com

**АНОТАЦІЯ** Створення сучасних систем автоматизованого проектування приладів та електричних машин нових поколінь, що побудовані на базі постійних магнітів, обумовлює необхідність розробки нових математичних моделей та ефективних розрахункових алгоритмів. На основі математичних моделей та з використанням ІТ-технологій можна розробити як окремі функціональні блоки САПР, так і комплексну систему з розрахунку параметрів пристрою та моделювання його характеристик. У роботі розглянуто типову конструкцію електромеханічного пристрою з постійними магнітами, що створюють поле з заданими характеристиками у робочій зоні. На першому етапі дослідження не враховувалась неоднорідність оточуючого середовища. Для розрахунку напруженості магнітного поля, що створюється магнітами прямокутної форми, отримано дві математичні моделі. Такий підхід дозволив, по-перше, виконати перевірку отриманих результатів розрахунків і, по-друге, дозволив використати математичні моделі для порівняльного аналізу при виконанні чисельного моделювання характеристик магнітного поля системи, що побудована, наприклад, із використанням магнітів циліндричної форми. На базі розробленої математичної моделі запропоновано алгоритм аналізу вихідних характеристик спеціального пристрою з постійними магнітами. Пристрої даного типу можуть використовуватися для реєстрації малих зміщень. Одночасно сама схема магнітної системи та математичні моделі, що описують властивості магнітного поля можуть бути використані при розробці інших видів електротехнічних пристроїв, що побудовані з використанням постійних магнітів. У роботі проведено низку експериментів з чисельного моделювання картини магнітного поля у робочій зоні приладу. Також подано результати моделювання сигналу датчика при переміщенні пробного тіла.

**Ключові слова:** математична модель; алгоритм; магнітне поле; інформаційна технологія; розрахунок електромагнітного процесу; реєстрація малих переміщень

## TO THE QUESTION OF THE CALCULATING OF THE SPECIAL DEVICES CHARACTERISTICS WITH A MAGNETIC SYSTEM BASED ON THE PERMANENT MAGNETS

A. KRIACHOK<sup>1\*</sup>, M. REUTSKYI<sup>2</sup>, D. SUSHKO<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Automation of Designing of Energy Processes and Systems, National Technical University "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, UKRAINE

<sup>2</sup> Department of Electromechanics, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, UKRAINE

**ABSTRACT** The creation of modern computer-aided design systems for devices and electrical machines of new generation, built on the basis of permanent magnets, necessitates the development of new mathematical models and effective computational algorithms. Based on mathematical models and using IT technologies, it is possible to develop both separate functional CAD blocks and an integrated system for calculating device parameters and modeling its characteristics. The paper considers a typical design of an electromechanical device with permanent magnets, which create a field with specified characteristics in the working area. At the first stage of the study, the heterogeneity of the environment was not taken into account. To calculate the strength of the magnetic field created by rectangular magnets, two mathematical models were obtained. This approach made it possible, first, to check the results of calculations and, secondly, to use mathematical models for comparative analysis when performing numerical modeling of the magnetic field characteristics for a system built, for example, using cylindrical magnets. On the foundation of developed mathematical model, an algorithm for analyzing the initial characteristics of a special device with permanent magnets is proposed. Devices of this type can be used to register small displacements. At the same time, the very scheme of the magnetic system and mathematical models describing the properties of the magnetic field can be used in the development of other types of electrical devices built using permanent magnets. A number of experiments on numerical simulation of the magnetic field pattern in the working area of the device were performed in the work. The results of the sensor signal simulation during the movement of the test body are also presented.

**Keywords:** mathematical model; algorithm; magnetic field; information technology; electromagnetic process computation; registration of the small displacements

### Вступ

Для проектування та побудови сучасних електромеханічних пристроїв (наприклад,

надчутливих вимірювальних приладів) з наперед заданими робочими характеристиками необхідно на етапі конструкторського проектування максимально

точно розраховувати їх електромагнітні характеристики.

Разом із тим, у технічній літературі [1], зазвичай, недостатньо детально описані методики отримання математичних моделей та розрахункових алгоритмів, що застосовуються для розрахунку електромагнітних характеристик пристроїв на основі постійних магнітів. У поєднанні з технічними та технологічними обмеженнями це призводить до необхідності виготовлення певної кількості експериментальних зразків для отримання задовільного результату, що пов'язано зі значними матеріальними та економічними витратами.

### Мета роботи

У статті розглядається приклад отримання математичної моделі для розрахунку магнітного поля у робочій зоні пристрою для вимірювання малих зміщень, який побудовано на основі високоерцитивних магнітів. В умовах постійно зростаючого навантаження на всі компоненти екосистеми подібні вимірювальні системи дозволяють, наприклад, реєструвати мікросейсмічні коливання, що викликані впливом великих промислових підприємств, автомагістралей або зміщенням пластів Земної кори у результаті індустріальної діяльності людини.

### Виклад основного матеріалу

На рис. 1 приведено принципову конструкцію магнітної системи пристрою, що побудована на основі трьох, включених назустріч один одному, постійних магнітів.

Екрануючий вплив інших елементів конструкції (наприклад, контейнера, у якому закріплена вся конструкція) на магнітне поле при побудові даної математичної моделі для розрахунку поля у робочій зоні не враховується.

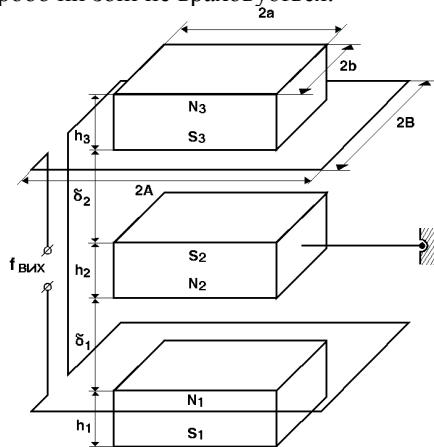


Рис. 1 – Принципова конструкція магнітної системи пристрою

Таким чином, у статті отримано та наведено математичні вирази напруженості магнітного поля у зазорах магнітного підвісу в однорідному та ізотропному середовищі і результати чисельного моделювання характеристик систем.

### Метод розв'язання

Як відомо, загальною задачею розрахунку магнітного поля є визначення напруженості поля у заданих точках простору по заданих зарядах тіл. У випадку магнітостатичного поля задача вирішується знаходженням потенціалу як функції координат. Якщо відомо розподіл магнітних зарядів у кінцевій області однорідної та ізотропної середовищ, то рішення можливо знайти на основі методик, викладених у дослідженнях [2–5].

На основі представлених у [4, 5] математичних моделей рівняння, що описують поле постійних магнітів, можливо записати так:

$$\begin{cases} \text{rot}H'' = 0, & \text{div}(\mu H'') = \rho_m^0, \\ \text{rot}H' = i, & \text{div}(\mu H') = 0, \end{cases} \quad (1)$$

де  $\rho_m^0 = -\text{div}I_0$  – об'ємна густина магнітних зарядів.

Напруженість безвихрового поля постійних магнітів  $H''$  володіє однозначним скалярним потенціалом  $\varphi$ :

$$H''(x,y,z) = -\text{grad} \varphi(x,y,z), \quad (2)$$

де скалярна функція  $\varphi(x,y,z)$  при  $\text{grad} \mu \neq 0$  повинна задовольняти диференційному рівнянню Пуассона:

$$\frac{d}{dx}(\mu d\varphi/dx) + \frac{d}{dy}(\mu d\varphi/dy) + \frac{d}{dz}(\mu d\varphi/dz) = \text{div}I_0, \quad (3)$$

а при  $\text{grad} \mu = 0$  - рівнянню Лапласа:

$$d^2\varphi/dx^2 + d^2\varphi/dy^2 + d^2\varphi/dz^2 = 0. \quad (4)$$

Як відомо, окремим рішенням рівняння (3) є функція

$$\varphi(Q) = \frac{1}{4\pi\mu_0} \int_{V_M} \frac{\rho_m^0(M)}{R_{QM}} dV_M, \quad (5)$$

де  $R_{QM} = \sqrt{(x-x_M)^2 + (y-y_M)^2 + (z-z_M)^2}$  – відстань від елемента об'ємом  $dV_M$ , оточуючого точку  $M(x_M, y_M, z_M)$ , у якій знаходиться заряд  $\rho_m^0 dV_M$ , до точки  $Q(x, y, z)$ , у якій обчислюється значення потенціалу  $\varphi$ .

Якщо припустити, що магніт рівномірно намагнічений (виконується для нових класів високоенергетичних магнітних матеріалів

виготовлених на основі сполучень рідкоземельних елементів з кобальтом та заліза з бором), тоді можна допустити, що всі магнітні заряди зосереджені на поверхні магніту. Такий магніт перетином  $S_M$  можна розглядати як сукупність двох рівних по величині магнітних зарядів  $m_0 = I_0 S_M$  протилежного знаку, розподілених по основам магніту (полюсам магніту).

Таким чином, якщо заряди зосереджені всередині дуже тонкого шару, то, вважаючи  $\rho_m^0 dV_M = \sigma_m^0 dS_M$ , де  $dS_M$  – елемент поверхні шару, можна записати для потенціалу такого «поверхневого» розподілу заряду зі щільністю  $\sigma_m^0$  наступний вираз:

$$\varphi(Q) = \frac{1}{4\pi\mu_0} \int_{S_M} \frac{\sigma_m^0(M)}{R_{QM}} dS_M. \quad (6)$$

Інтегральним рівнянням (6), по суті, формулюється задача розрахунку магнітного поля. Сумарне поле магнітної системи пристрою визначається на підставі принципу суперпозиції полів.

У випадку дослідження плоскопаралельного магнітного поля, що залежить лише від двох просторових координат, диференційне рівняння (3) у декартовій системі координат прийме наступний вигляд:

$$d/dx(\mu d\varphi/dx) + d/dz(\mu d\varphi/dz) = \text{div}I_0, \quad (7)$$

а рішенням (7), після перетворень [3], буде наступне рівняння:

$$\varphi(Q)_i = \frac{1}{2\pi\mu_0} \int_{x_M} \sigma_m^0(M)_i \ln \frac{1}{R_{QM}} dx_M. \quad (8)$$

Таким чином, після виконання інтегрування вираз для скалярного магнітного потенціалу магнітного шару остаточно буде мати вигляд:

$$\begin{aligned} \varphi(Q)_i = & -\frac{\sigma_m^0(M)_i}{4\pi\mu_0} \left\{ (a-x) \ln[(a-x)^2 + z_i^2] \right. \\ & + (a+x) \ln[(a+x)^2 + z_i^2] - 4a \\ & \left. + 2z_i \left[ \arctg \frac{a-x}{z_i} + \arctg \frac{a+x}{z_i} \right] \right\} \end{aligned} \quad (9)$$

Складові напруженості плоскопаралельного магнітного поля можуть бути отримані із співвідношень:

$$H_x = -d\varphi/dx, \quad H_z = -d\varphi/dz, \quad H_y = 0. \quad (10)$$

Після виконання диференціювання та відомих математичних перетворень і спрощень для розрахунку значення складової  $H_x$  отримаємо наступне рівняння:

$$H(Q)_{x,i} = \frac{\sigma_m^0(M)_i}{4\pi\mu_0} \ln \frac{(x+a)^2 + z_i^2}{(x-a)^2 + z_i^2}. \quad (11)$$

Для розрахунку значення складової  $H_z$ , відповідно, отримаємо:

$$H(Q)_{z,i} = \frac{\sigma_m^0(M)_i}{2\pi\mu_0} \left[ \arctg \frac{a-x}{z_i} + \arctg \frac{a+x}{z_i} \right]. \quad (12)$$

Потік, зчеплений з контуром, визначається як

$$\Phi = \int_{S_K} \mu_0 H_z dS_K. \quad (13)$$

Вертикальна складова сили, діючої на  $i$ -й магнітний шар зі сторони  $k$ -го магнітного шару, визначається як

$$F_{z,ki} = \sigma_{m,k}^0 \text{ шару} \int_{-a}^a H_{z,i} dx. \quad (14)$$

Виконавши інтегрування та математичні перетворення, отримаємо:

$$\begin{aligned} F_{z,ki} = & \frac{\sigma_{m,k}^0 * \sigma_{m,i}^0}{2\pi\mu_0} \left\{ 4a * \arctg \frac{2a}{z_{ki}} \right. \\ & \left. - z_{ki} * \ln \left[ 1 + \frac{4a^2}{z_{ki}^2} \right] \right\} * 2b \end{aligned} \quad (15)$$

Жорсткість магнітного підвісу по осі  $OZ$  визначається як

$$G_{z,ki} = \frac{dF_{z,ki}}{dz} = -\frac{\sigma_{m,k}^0 * \sigma_{m,i}^0}{2\pi\mu_0} \ln \left[ 1 + \frac{4a^2}{z_{ki}^2} \right] * 2b. \quad (16)$$

Рівняння (11, 12, 14–16) представляють математичну модель для розрахунку характеристик приладу, який побудовано на базі постійних магнітів.

З метою оцінки точності отриманих результатів чисельного моделювання доцільно виконати розрахунки за кількома математичними моделями.

Тому застосуємо наступний підхід - на основі теоретичних відомостей [4] напишемо вираз для розрахунку напруженості поля магнітного шару в заданих точках простору при відомому розподілі зарядів:

$$H(Q)_i = \frac{1}{4\pi\mu_0} \int_{S_M} \sigma_m^0(M)_i \frac{R_{QM}}{R_{QM}^3} dS_M. \quad (17)$$

Виконав обчислення інтегралу та рутинні математичні перетворення [6, 7], отримаємо загальні аналітичні вирази для складових напруженості поля

$H_x, H_z$  у проміжках магнітного підвісу. Приведемо ці рівняння у розгорнутому вигляді.

Для розрахунку складової  $H_x$  отримаємо:

$$H(Q)_{x,i} = \frac{\sigma_m^0(M)_i}{8\pi\mu_0} \cdot \left\{ \begin{aligned} & * \ln \left| \frac{(y+b) + \sqrt{(x-a)^2 + (y+b)^2 + z_i^2}}{(y+b) - \sqrt{(x-a)^2 + (y+b)^2 + z_i^2}} \right| \\ & - \ln \left| \frac{(y+b) + \sqrt{(x+a)^2 + (y+b)^2 + z_i^2}}{(y+b) - \sqrt{(x+a)^2 + (y+b)^2 + z_i^2}} \right| \\ & - \ln \left| \frac{(y-b) + \sqrt{(x-a)^2 + (y-b)^2 + z_i^2}}{(y-b) - \sqrt{(x-a)^2 + (y-b)^2 + z_i^2}} \right| \\ & + \ln \left| \frac{(y-b) + \sqrt{(x+a)^2 + (y-b)^2 + z_i^2}}{(y-b) - \sqrt{(x+a)^2 + (y-b)^2 + z_i^2}} \right| \end{aligned} \right\}. \quad (18)$$

Та, відповідно, для складової  $H_z$  маємо наступне рівняння:

$$H(Q)_{z,i} = \frac{\sigma_m^0(M)_i}{4\pi\mu_0} \cdot \left\{ \begin{aligned} & * \operatorname{arctg} \frac{(x+a) * (y+b)}{z_i * \sqrt{(x+a)^2 + (y+b)^2 + z_i^2}} \\ & - \operatorname{arctg} \frac{(x-a) * (y+b)}{z_i * \sqrt{(x-a)^2 + (y+b)^2 + z_i^2}} \\ & + \operatorname{arctg} \frac{(x-a) * (y-b)}{z_i * \sqrt{(x-a)^2 + (y-b)^2 + z_i^2}} \\ & - \operatorname{arctg} \frac{(x+a) * (y-b)}{z_i * \sqrt{(x+a)^2 + (y-b)^2 + z_i^2}} \end{aligned} \right\}. \quad (19)$$

Таким чином, для розробки розрахункового алгоритму доповнимо рівняння (11, 12, 14–16) математичними виразами (18, 19) та отримаємо математичну модель для дослідження характеристик приладу на базі постійних магнітів.

### Результати чисельного моделювання

Отримані вирази стали основою для розробки програмного забезпечення [8–10] по розрахунку та дослідженню інтегральних характеристик магнітного підвісу. Алгоритм розрахунку [11–13] передбачає виконання наступних програмних блоків: формування даних, що характеризують електрофізичні та геометричні параметри конструкції; розрахунок координат вузлових точок, у яких необхідно обчислити значення компонент напруженості поля  $H_x, H_z$ ; розрахунок значень  $H_x, H_z$ ; визначення чутливості конструкції до малих зміщень; візуалізація отриманих результатів.

При проведенні чисельних розрахунків у якості базових використовувалися наступні вхідні дані: магнітна індукція –  $B_{\text{зал}} = 1.10 \text{ Т}$ ; величина повітряного проміжку –  $\delta_1 = \delta_2 = 1.0 * 10^{-3} \text{ м}$ ; довжина магнітів –  $2a = 4.0 * 10^{-3} \text{ м}$ ; ширина магнітів –  $2b = 2.0 * 10^{-3} \text{ м}$ ; висота магнітів –  $h_1 = 1.0 * 10^{-3} \text{ м}, h_2 = 0.5 * 10^{-3} \text{ м}, h_3 = 1.0 * 10^{-3} \text{ м}$ .

На рис. 2 наведено картину магнітного поля підвісу у площині  $XOZ$ ; ліва частина рисунки відображає результати розрахунків, що отримані з використанням математичної моделі (18, 19), а права частина - результати для моделі плоскопаралельного поля (11, 12).

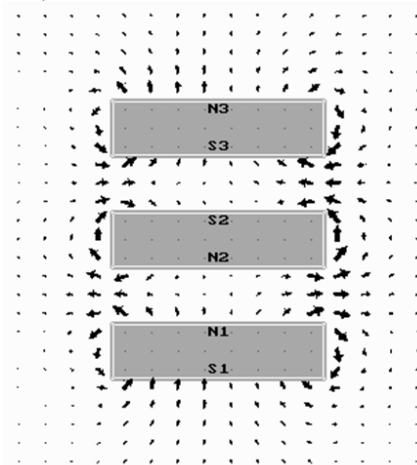


Рис. 2 – Картина магнітного поля у робочій зоні підвісу

На рис. 3 приведено результати моделювання сигналу датчика при переміщенні пробного тіла (графіки залежності  $\Delta\Phi$  від прогину  $\Delta z$ ) для заданих параметрів конструкції.

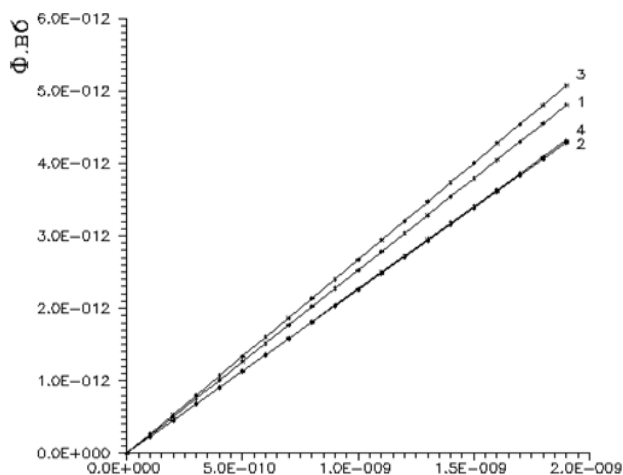


Рис. 3 – Графіки залежності  $\Delta\Phi$  від прогину центрально магніту  $\Delta z$

Аналіз даних чисельного моделювання показує, що алгоритм дає стійке рішення задачі та добре

узгоджується з результатами, що отримано з використанням іншої математичної моделі.

### Висновки

Отримано математичні моделі, що дозволяють обчислити вихідні характеристики магнітного підвісу по заданим електрофізичним та геометричним параметрам конструкції. На їх основі проведено чисельне моделювання параметрів датчика при переміщенні пробного тіла. Отримані дані ефективної жорсткості досліджуваної системи, що дозволяють оцінити роздільну здатність пристрою та його динамічні характеристики.

Запропонований алгоритм аналізу може бути використаний і у інших задачах, коли необхідно розрахувати характеристики системи, що містить постійні магніти прямокутної форми, для створення більш досконалої конструкції.

### Список літератури

1. Татевосян А. С., Андреева Е. Г., Чугулев А. О. *Расчет электрических и магнитных полей методом конечных элементов с применением комплекса программ ELCUT. Учебное пособие.* Омск: Изд-во ОмГТУ, 2010. 84 с.
2. Smythe W. *Static and Dynamic Electricity.* Florida: CRC Press, 1989. 623 с.
3. Buchholz H. *Elektrische und magnetische Potentialfelder.* Берлін: Springer, 2012. 574 с.
4. Binns K. *Analysis and Computation of Electric and Magnetic Field Problems.* Oxford: Pergamon, 2013. 336 с.
5. Тамм И. Е. *Основы теории электричества: Учеб. пособие для вузов.* Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 616 с.
6. Angot A. *Compléments de mathématiques: à l'usage des ingénieurs de l'électrotechnique et des télécommunications.* Paris: Dunod, 1997. 868 с.
7. Двайт Г. Б. *Таблицы интегралов и другие математические формулы.* Москва: Наука, Гос. изд. физ-мат. лит., 1966. 228 с.
8. C language documentation. Microsoft. 2021. URL: <https://docs.microsoft.com/en-us/cpp/c-language/> (дата звернення: 03.12.2020).
9. Seacord R. *Effective C: An Introduction to Professional C Programming.* San Francisco: No Starch Press, 2020. 272 p.

10. Gustedt J. *Modern C.* New York: Manning Publications, 2019. 408 p.
11. Sedgewick R., Wayne K. *Algorithms.* Boston: Addison-Wesley Professional, 2011. 976 p.
12. Brass P. *Advanced Data Structures.* Cambridge University Press, 2019. 472 с.
13. Skiena S. *The Algorithm Design Manual.* New York: Springer, 2011. 730 p.

### References (transliterated)

1. Tatevosjan A.S., Andreeva E.G., Chugulev A.O. *Raschet jelektricheskikh i magnitnyh polej metodom konechnykh jelementov s primeneniem kompleksa programm ELCUT. Uchebnoe posobie* [Calculation of electric and magnetic fields by the finite element method using the ELCUT software package. Tutorial]. Omsk, 2010, 84 p.
2. Smythe W. *Static and Dynamic Electricity.* Florida. CRC Press, 1989, 623 p.
3. Buchholz H. *Elektrische und magnetische Potentialfelder.* Berlin. Springer, 2012, 574 p.
4. Binns K. *Analysis and Computation of Electric and Magnetic Field Problems.* Oxford: Pergamon, 2013, 336 p.
5. Tamm I. E. *Osnovy teorii jelektrichestva: Ucheb. posobie dlya vuzov* [Fundamentals of the theory of electricity: Textbook. manual for universities]. Moscow. FIZMATLIT, 2003, 616 p.
6. Angot A. *Compléments de mathématiques: à l'usage des ingénieurs de l'électrotechnique et des télécommunications.* Paris. Dunod, 1997, 868 p.
7. Dvajt G.B. *Tablicy integralov i drugie matematicheskie formuly* [Integral tables and other mathematical formulas]. Moscow, 1966, 228 p.
8. C language documentation Microsoft. 2021: Available at: <https://docs.microsoft.com/en-us/cpp/c-language/> (accessed 03.12.2020).
9. Seacord R. *Effective C: An Introduction to Professional C Programming.* San Francisco. No Starch Press, 2020, 272 p.
10. Gustedt J. *Modern C.* Shelter Island, New York. Manning Publications, 2019, 408 p.
11. Sedgewick R., Wayne K. *Algorithms.* Boston. Addison-Wesley Professional, 2011, 976 p.
12. Brass P. *Advanced Data Structures.* Cambridge. Cambridge University Press, 2019, 472 p.
13. Skiena S. *The Algorithm Design Manual.* New York City. Springer, 201, 730 p.

### 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: alexandrkiachok@gmail.com.

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

**Реуцький Микола Олександрович** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», доцент кафедри електромеханіки; м. Київ, Україна; ORCID: 0000-0003-1870-2222; e-mail: rmo318@i.ua.

**Mykola Reutskiy** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D), associate professor, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", associate professor at the Department of Electromechanics, Kyiv, Ukraine; ORCID: 0000-0003-1870-2222; e-mail: rmo318@i.ua.

**Сушко Дмитро Анатолійович** – студент, магістрант, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», студент кафедри автоматизації проектування енергетичних процесів та систем; м. Київ, Україна; ORCID: 0000-0003-3065-4470; e-mail: dmytro.a.sushko@gmail.com.

**Dmytro Sushko** – student (masters), National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, student of Computer Aided Design Energy Processes and Systems Department, Kyiv, Ukraine; ORCID: 0000-0003-3065-4470; e-mail: dmytro.a.sushko@gmail.com.

*Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

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 «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». 2021. № 2 (8). С. 77-82. doi:10.20998/2413-4295.2021.02.11.

*Please cite this article as:*

Kriachok O., Reutskiy 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.

*Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

Крячок А. С., Реуцкий Н. А., Сушко Д. А. К вопросу расчета характеристик специальных устройств с магнитной системой на основе постоянных магнитов. *Вестник Национального технического университета «ХПИ». Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». 2021. № 2 (8). С. 77-82. doi:10.20998/2413-4295.2021.02.11.

**АННОТАЦИЯ** Создание современных систем автоматизированного проектирования приборов и электрических машин новых поколений, построенных на базе постоянных магнитов, обуславливает необходимость разработки новых математических моделей и эффективных расчетных алгоритмов. На основе математических моделей и с использованием IT-технологий можно разработать как отдельные функциональные блоки САПР, так и комплексную систему для расчета параметров устройства и моделирования его характеристик. В работе рассмотрено типовую конструкцию электромеханического устройства с постоянными магнитами, которые создают поле с заданными характеристиками в рабочей зоне. На первом этапе исследования не учитывалась неоднородность окружающей среды. Для расчета напряженности магнитного поля, создаваемого магнитами прямоугольной формы, были получены две математические модели. Такой подход позволил, во-первых, выполнить проверку полученных результатов расчетов и, во-вторых, позволяет использовать математические модели для сравнительного анализа при выполнении численного моделирования характеристик магнитного поля системы, построенной, например, с использованием магнитов цилиндрической формы. На базе разработанной математической модели предложен алгоритм анализа выходных характеристик специального устройства с постоянными магнитами. Устройства данного типа могут использоваться для регистрации малых смещений. Одновременно сама схема магнитной системы и математические модели, описывающие свойства магнитного поля могут быть использованы при разработке других видов электротехнических устройств, построенных с использованием постоянных магнитов. В работе проведен ряд экспериментов по численному моделированию картины магнитного поля в рабочей зоне прибора. Также представлены результаты моделирования сигнала датчика при перемещении пробного тела.

**Ключевые слова:** математическая модель; алгоритм; магнитное поле; информационная технология; расчет электромагнитного процесса; регистрация малых перемещений

Надійшла (received) 28.04.2021