

Пєлєвін Дмитро Євгєнович. Кандидат технічних наук, старший дослідник, завідувач лабораторії магнітних вимірювань відділу магнетизму технічних об'єктів, Інститут енергетичних машин і систем ім. А. М. Підгорного Національної академії наук України, вул. Комунальників 2/10, Харків, Україна, 61046. Тел. (068)88856513. E-mail: pelevindmitro@ukr.net
ORCID (0000-0002-1413-2114).

МАГНІТНЕ ПОЛЕ ДВОЖИЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ КАБЕЛІВ ЖИТЛОВИХ ПРИМІЩЕНЬ

Анотація. Відсутність обґрунтованих розрахункових співвідношень з визначення максимальної індукції магнітного поля двожильних кабелів електроживлення та електрообігріву підлог ускладнює санітарно-гігієнічну оцінку рівня магнітного поля в житлових приміщеннях. Метою роботи є розроблення і обґрунтування простих розрахункових співвідношень з визначення максимального діючого значення індукції магнітного поля прямолінійних двожильних кабелів. Результатом роботи є розроблення на основі закону Біо-Савара та принципів суперпозиції і симетрії, простого розрахункового співвідношення для визначення максимальної індукції магнітного поля двожильних кабелів та його верифікація шляхом співставлення отриманих авторами результатів з результатами комп'ютерного розрахунку за офіційною методикою, та натурального експерименту. Використання результатів роботи буде сприяти скорішому вирішенню проблеми визначення та зменшення магнітного поля в житлових приміщеннях до безпечного для населення рівня.

Ключові слова: двожильні електричні кабелі електроживлення та електрообігріву житлових приміщень, розрахунок магнітного поля.

Pelevin Dmytro Y. PhD, senior researcher, head of laboratory of magnetic measurements, Department of Magnetism of Technical Objects, Anatolii Pidhornyi institute of power machines and systems of the National academy of sciences of Ukraine, Komunalnykiv Str. 2/10, Kharkiv, Ukraine, 61046.
Tel. (068)88856513. E-mail: pelevindmitro@ukr.net
ORCID (0000-0002-1413-2114).

MAGNETIC FIELD OF TWO-WIRE ELECTRIC CABLES OF RESIDENTIAL PREMISES

Abstract. The lack of reasonable calculation relationships for determining the maximum magnetic flux density of two-wire power supply cables and electric heating of the floors complicates the sanitary and hygienic assessment of the magnetic field level in residential premises. The purpose of the work is to develop and substantiate simple calculation relationships for determining the maximum effective value of the magnetic flux density of straight two-wire cables. The result of the work is the development, based on the Bio-Savar's law and the principles of superposition and symmetry, simple calculation relationships for determining the maximum effective value of the magnetic flux density of two-wire cables and its verification comparison of the results obtained by the authors with the results of a computer calculation using the official methodology and a full-scale experiment. The use of the results of the work will contribute to the fastest possible solution to the problem of determining and reducing the magnetic field in residential premises to a level safe for the population.

Keywords: two-wire electric cables of power supply and electric heating of residential premises, calculation of the magnetic field.

Постановка проблеми. Одним із основних джерел небезпечного для населення магнітного поля (МП) промислової частоти в житлових приміщеннях, є прокладені в стінах двожильні електричні кабелі електропроводки (рис. 1,а), та двожильні кабелі систем електрообігріву підлог (рис. 1,б), прокладені під їх покриттям [1, 2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У наукових публікаціях [3-12] є визначення максимального діючого значення МП цих кабелів на основі простих розрахункових співвідношень, використання яких не потребує складних комп'ютерних програм. Надано санітарно-гігієнічну оцінку діючому значенню індукції МП в житлових приміщеннях [3, 4], а також для його подальшого зменшення до безпечного рівня. Однак у відомих публікаціях такі розрахункові співвідношення хоча і наведені [1, 13], але не достатньо обґрунтовані, що робить проблематичним їх використання.

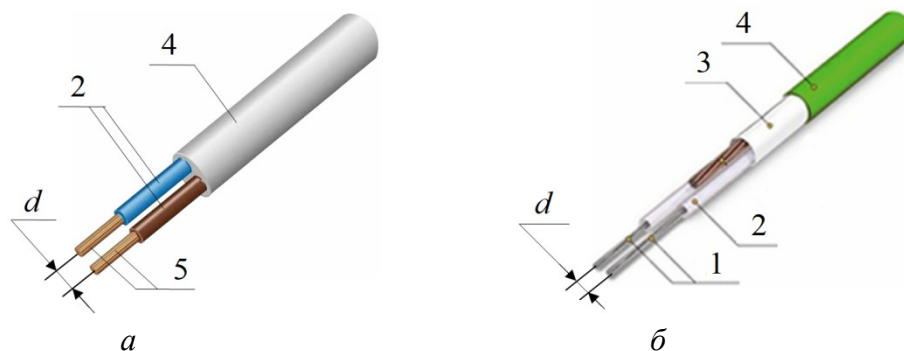


Рис. 1. Конструкція типових двожильних кабелів електроживлення (а) та електрообігріву (б) житлових приміщень (1, 5 – нагрівальні (струмопровідні) жили, 2 – електроізоляція, 3 – електропровідний заземлювальний екран; 4 – зовнішня електроізоляція).

Постановка завдання. Метою цієї статті є розроблення та обґрунтування простих розрахункових співвідношень з визначення максимального діючого значення індукції магнітного поля прямолінійних двожильних кабелів та розробка рекомендацій щодо їх використання у житлових приміщеннях. Результати цього дослідження повинні сприяти скорішому вирішенню проблеми визначення та зменшення магнітного поля в житлових приміщеннях до безпечного для мешканців рівня.

Виклад основного матеріалу дослідження. Розрахунок МП прямолінійного двожильного кабелю. Схема розташування двожильного кабелю в горизонтальній площині представлена на рис. 2. Основними параметрами, що впливають на МП двожильного кабелю є [1] відстань d між осями його жил $Ж1$, $Ж2$, а також діюче значення різноспрямованого струму I ($I_1 = -I_2$) в його жилах.

При побудові розрахункової математичної моделі приймемо наступні припущення: довжина кабелю суттєво (на порядок) більша від відстані h до точки спостереження P , що дозволяє розглядати кабелі як нескінченні; кабель моделюється паралельними прямолінійними провідниками у вигляді струмових ниток, розташованих у горизонтальній (XY) або вертикальній (XZ) площині; МП кабелю є потенційним і плоскопаралельним; впливом зовнішніх феромагнітних (електропровідних) елементів та джерел МП житлового приміщення нехтуємо; напруга мережі живлення кабелю синусоїдальна. Розташування двожильного кабелю із жилами $Ж1$ і $Ж2$ на горизонтальній площині зображено на рис.2. МП в точці P (рис. 2) може бути визначено на основі закону Біо-Савара [14] як суперпозиція МП від окремих жил кабелю. При цьому максимальні діючі значення напруженості МП кабелю відповідно до [1, 14] будуть зосереджені по лінії $O-P$, яка ортогональна площині розташування кабелю і є віссю симетрії для його жил.

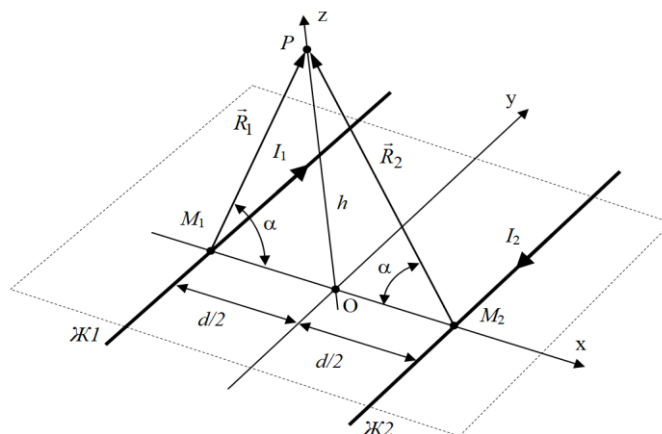


Рис. 2. Розташування двожильного кабелю із жилами $Ж1$ і $Ж2$ на горизонтальній площині.

Модулі векторів \vec{R}_1 і \vec{R}_2 , які спрямовані в точку спостереження P , в силу симетрії будуть однакові і відповідно до рис. 2 дорівнюють:

$$|\vec{R}| = R = \sqrt{\frac{d^2}{4} + h^2}. \quad (1)$$

Модулі напруженості МП кожного із струмів I будуть також однакові і відповідно до [14, 15] складають:

$$|\vec{H}| = H = \frac{I}{2\pi h}. \quad (2)$$

При максимумі МП, вектори \vec{H}_1 (рис. 3,а) і \vec{H}_2 (рис. 3,б), що створюються зустрічними струмами I_1 та I_2 , є ортогональними до відповідних радіус-векторів \vec{R}_1 і \vec{R}_2 . Тут $H_{1,x}$, $H_{1,z}$ – компоненти (проекції) вектору \vec{H}_1 на відповідні координатні осі.

З рис. 3 слідує, що:

$$H_{1,x} = -|\vec{H}| \sin \alpha, \quad H_{1,z} = |\vec{H}| \cos \alpha; \quad (3)$$

$$H_{2,x} = |\vec{H}| \sin \alpha, \quad H_{2,z} = |\vec{H}| \cos \alpha, \quad (4)$$

де $H_{2,x}$, $H_{2,z}$ компоненти (проекції) вектора \vec{H}_2 на відповідні осі.

Визначимо компоненти напруженості МП $H_{0,x}$, $H_{0,z}$ в точці P як суму відповідних компонент із (3, 4):

$$H_{0,x} = -|\vec{H}| \sin \alpha + |\vec{H}| \sin \alpha = 0, \quad (5)$$

$$H_{0,z} = 2|\vec{H}| \cos \alpha. \quad (6)$$

З рис. 2 також слідує, що:

$$\cos \alpha = \frac{d}{2h}. \quad (7)$$

Тоді відповідно до (6) із урахуванням (1), (2) і (7) отримаємо:

$$H_{0,z} = 2 \cdot \frac{I}{2\pi \cdot h} \cdot \frac{d}{2h} = \frac{I}{\pi \cdot h^2} \cdot \frac{d}{2} = \frac{I \cdot d}{2\pi \left(\frac{d^2}{4} + h^2 \right)}. \quad (8)$$

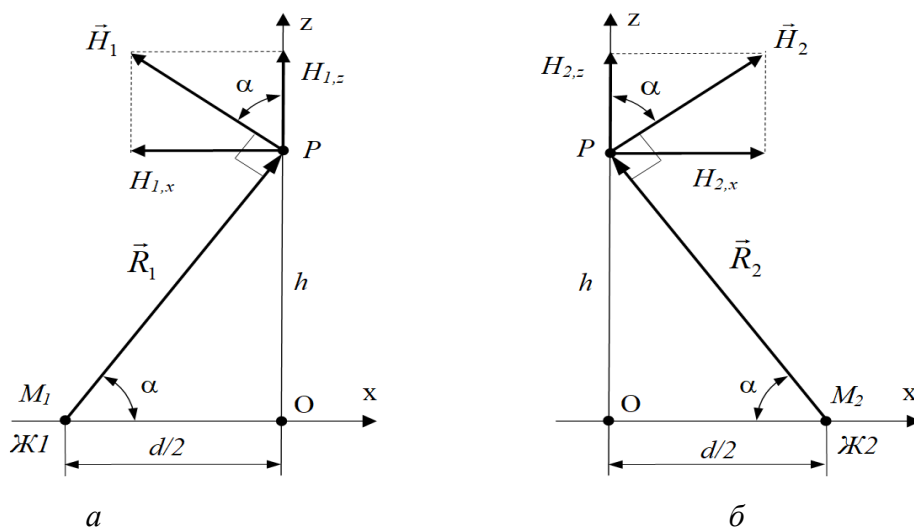


Рис. 3. До визначення максимуму напруженості МП від окремих жил кабелю (а - \vec{H}_1 ; б - \vec{H}_2)

Переходячи в (8) до індукції МП, отримаємо наведене у [1] розрахункове співвідношення для визначення максимального діючого значення індукції МП на відстані h від осі прямолінійного двожильного кабелю, розташованого у площині XY (для нагрівального кабелю), або XZ (для кабелю електропроводки):

$$B_{K \max} = \mu_0 H_{0,z} = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I \cdot d}{\{h^2 + (0,5d)^2\}}, \text{ де } \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м.} \quad (9)$$

За умови $h > 3d$, коли МП кабелю набуває дипольного характеру [12], співвідношення (9) може бути спрощене і представлено як [13]:

$$B_{K \max} \approx \frac{\mu_0 \cdot I \cdot d}{2\pi \cdot h^2}. \quad (10)$$

Таким чином, на основі виконаного вище аналізу, теоретично підтверджена коректність наведеного у [1] розрахункового співвідношення (9). Виконаємо тепер його верифікацію.

Верифікація отриманого розрахункового співвідношення. Верифікацію виконуємо шляхом порівняння результатів розрахунку відповідно до (9), та комп'ютерного розрахунку за діючою в Міненерго верифікованою методикою [4], а також результатами експерименту з вимірювання розподілу МП двожильного кабелю «Arnold Рак 6101-20 ЕС». Експеримент виконувався на магнітовимірювальному стенді інституту [16] за методикою, описаною в [1]. Результати порівняння зведені до табл. 1.

Похибка δ_b, δ_e визначена як:

$$\delta_i = \frac{|B_{K \max i} - B_{K \max s}|}{B_{K \max i}} \cdot 100\%, \quad (11)$$

де $i = (b, e)$; $B_{K \max b}$ – індукція МП отримана за методикою СОУ-Н ЕЕ 20.179; $B_{K \max e}$ – індукція МП отримана за результатами експерименту; $B_{K \max s}$ – індукція МП отримана за співвідношенням (9).

За даними табл. 1 побудовані графіки залежності модуля індукції МП кабелю від відстані h від його осі до точки спостереження, які представлені на рис. 4.

Як слідує з табл. 1, та рис. 4, розрахунок за отриманим співвідношенням (9) повністю співпадає із тестовим розрахунком за методикою СОУ-Н ЕЕ 20.179 [4]. Розрахунок за (9) також співпадає з результатами експерименту в межах

визначеної в [4] похибки вимірювання МП (5 %). Тому отримані результати верифікації повністю підтверджують коректність отриманого розрахункового співвідношення (9).

Таблиця 1. Результати порівняння розрахунку МП двожильного кабелю ($d = 2,2$ мм, $I = 10$ А) за отриманим співвідношенням (9) з розрахунком за діючою методикою [4] та результатами експерименту

№ пп	h , мм	$B_{K\ max\ s}$ за отриманим співвідношенням (9), мкТл	$B_{K\ max\ b}$ за методикою СОУ-Н ЕЕ 20.179, мкТл	$B_{K\ max\ e}$ за результатами експерименту, мкТл	Похибка за результатами тестового розрахунку, δ_b , %	Похибка за результатами експерименту, δ_e , %
5	5,0	167,8749	167,8749	171,1	0	1,88
6	6,0	118,2478	118,2478	113,3	0	4,37
7	7,0	87,63195	87,63195	90,4	0	3,06
8	8,0	67,47431	67,47431	64,7	0	4,29
9	9,0	53,52147	53,52147	52,5	0	1,95
10	10	43,47397	43,47397	42,1	0	3,26
11	20	10,96683	10,96683	10,9	0	0,61
12	30	4,882325	4,882325	5,01	0	2,55
13	40	2,747922	2,747922	2,71	0	1,40
14	50	1,759149	1,759149	1,75	0	0,52
15	60	1,221812	1,221812	1,17	0	4,43
16	70	0,897737	0,897737	0,93	0	3,47
17	100	0,439947	0,439947	0,46	0	4,36
18	150	0,195545	0,195545	0,19	0	2,92
19	200	0,109997	0,109997	0,105	0	4,76

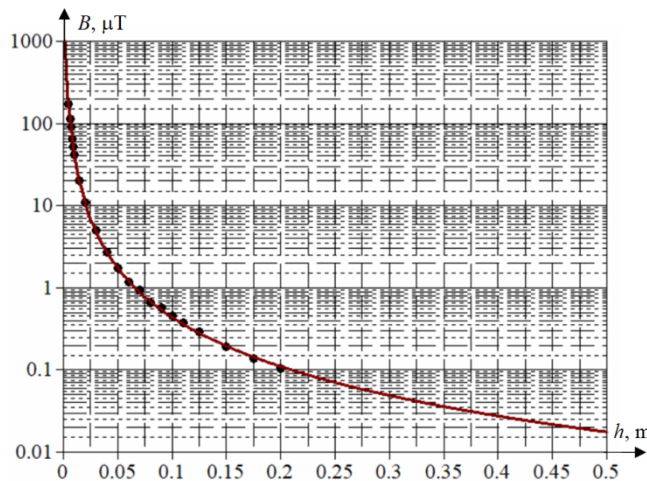


Рис. 4. Розрахункові — та експериментальні ●●● значення індукції МП прямолінійного двожильного кабелю типу «Arnold Rak 6101-20 ЕС», $d = 2,2$ мм, $I = 10$ А (1) при віддаленні на відстань h , (розрахунок за (9))

Таким чином, отримане розрахункове співвідношення (9) теоретично обґрунтоване, успішно верифіковане, і може широко використовуватися для визначення максимальних діючих значень індукції МП прямолінійних двожильних кабелів електропроводки та електрообігріву підлог житлових приміщень. Це буде сприяти скорішому вирішенню проблеми визначення та зменшення магнітного поля в житлових приміщеннях до безпечного для населення рівня.

Висновки.

1. На основі закону Біо-Савара і принципів суперпозиції та симетрії, розроблено просте розрахункове співвідношення для визначення максимальних діючих значень індукції магнітного поля прямолінійного двожильного кабелю. Ці максимальні значення зосереджені по осі симетрії жил кабелю, ортогональній площині його розташування.

2. Здійснено успішну верифікацію отриманого розрахункового співвідношення шляхом співставлення отриманих на його основі результатів з результатами тестового комп'ютерного розрахунку, а також результатами натурного експерименту.

3. Використання отриманого і верифікованого розрахункового співвідношення дозволить спростити оцінку відповідності індукції магнітного поля частотою 50 Гц діючому в Україні нормативному рівню 0,5 мкТл, буде сприяти скорішому вирішенню проблеми зменшення магнітного поля в житлових приміщеннях до безпечного для населення рівня.

Список використаної літератури:

1. Розов В.Ю., Реуцький С.Ю., Пелєвін Д.Є., Кундіус К.Д. Магнітне поле кабельних систем електрообігріву підлог житлових приміщень. *Електротехніка і електромеханіка*, 2024, № 5 С.48-57 <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2024.5.07>.
2. ДБН В.2.5-24:2012: *Державні будівельні норми України. Електрична кабельна система опалення*. Київ: Мінрегіонбуд України, 2012. 81 с.
3. *Правила улаштування електроустановок*. Видання офіційне. Міненерговугілля України. Видавництво «Форт», Харків, 2017, 760 с.
4. *СОУ-Н ЕЕ 20.179: 2008 Розрахунок електричного і магнітного полів ліній електропередавання. Методика (зі змінами) (у редакції наказу Міненерго вугілля від 01 липня 2016 р. №423)*. К.: Міненергвугілля України, 2016. 37 с.
5. Standard of Building Biology Testing Methods: SBM–2015. Germany: Institut fer Baubiologie + Ekologie IBN, 2015, 5 p. URL: <https://buildingbiology.com/building-biology-standard> (01.07.2024).
6. Kuznetsov B.I., Nikitina T.B., Bovdii I.V., Voloshko O.V., Kolomiets V.V., Kobylanskyi B.B. Synthesis of an effective system of active shielding of the magnetic field of a power transmission line with a horizontal arrangement of wires using a single compensation winding. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2022, no. 6, pp. 15–21. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2022.6.03>.
7. Розов В.Ю., Резинкина М.М., Думанский Ю.Д., Гвозденко Л.А. Исследование техногенных искажений геомагнитного поля в жилых и производственных помещениях и определение путей их снижения до безопасного уровня. *Технічна електродинаміка. Тематичний випуск «Проблеми сучасної електротехніки»*, 2008, Ч. 2, С. 3-8.
8. Rozov V.Y., Tkachenko O.O., Yerisov A.V., Grinchenko V.S. Analytical calculation of magnetic field of three-phase cable lines with two-point bonded shields. *Tekhnichna Elektrodynamika*, 2017, no. 2, pp. 13–18. doi: <https://doi.org/10.15407/techned2017.02.013>.
9. Brune D., Hellborg R., Persson B.R.R., Pääkkönen R. Radiation at home, outdoors and in the workplace. *Scandinavian Science Publisher*, 2001, 547 p. ISBN 82-91833-02-8.
10. Non-Ionizing Radiation, Part 1: Static and Extremely Low-Frequency (ELF) Electric and Magnetic Fields. IARC *Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Human*, 2002, 80, p.395
11. World Health Organization. Electromagnetic fields and public health. Exposure to extremely low frequency fields. URL: <https://www.who.int/teams/environment-climate-change-and-health/radiation-and-health/non-ionizing/exposure-to-extremely-low-frequency-field> (01.07.2024)

12. Розов В.Ю. *Внешние магнитные поля силового электрооборудования и методы их уменьшения*. Препр. НАН Украины. Ин-т электродинамики, № 772, Киев, 1995, 42 с.
13. Манілов А.М., Красножон А.В., Товстюк С.О. Оцінювання величини магнітного поля кабельного обігріву житлових та промислових приміщень з точки зору його безпеки для людини. *ПРОМЕЛЕКТРО*. ТОВ "ЕТІН". Київ, 2022, № 3-6, С. 32-36.
14. Стреттон Дж. А. *Теория электромагнетизма*. М.: Гостехиздат, 1948, 520 с.
15. Нестеренко А.Д. *Введение в теоретическую электротехнику*. К.:Наукова думка, 1969. 351с.
16. Баранов М.І., Розов В.Ю., Сокол Є.І.. До 100-річчя національної академії наук України – колиски вітчизняної науки і техніки. *Електротехніка і електромеханіка*, 2018, №5, С. 3-11. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2018.5.01>.

REFERENCES

1. Rozov V.Yu., Reutskiy S.Yu., Pelevin D.Ye., Kundius K.D. Magnetic field of electrical heating cable systems of the floors for residential premises. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2024, no. 5, pp. 48-57. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2024.5.07>.
2. *DBN V.2.5-24:2012. State building regulations of Ukraine. Electrical cable scorching system*. Kyiv, Minrehionbud Publ., 2012. 81 p. (Ukr).
3. *Electrical installation regulations [Pravila ulashtuvannya electroustanovok]*. 2017, Fort Publ. Kharkiv, 760 p.
4. *SOU-NEE 20.179:2008. Calculation of electric and magnetic fields of power lines. Methodology (with changes) (in the edition of the order of the Minenergugillya dated July 1, 2016, no. 423)*. Kyiv, Minenergugillya Ukraine Publ., 2016. 37 p. (Ukr).
5. Standard of Building Biology Testing Methods: SBM–2015. Germany: Institut fer Baubiologie + Ekologie IBN, 2015, 5 p. Available at: <https://buildingbiology.com/building-biology-standard> (Accessed 01 July 2024).
6. Kuznetsov B.I., Nikitina T.B., Bovdui I.V., Voloshko O.V., Kolomiets V.V., Kobylanskyi B.B. Synthesis of an effective system of active shielding of the magnetic field of a power transmission line with a horizontal arrangement of wires using a single compensation winding. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2022, no. 6, pp. 15–21. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2022.6.03>.
7. Rozov V.Yu., Rezinkina M.M., Dumanskiy Yu.D., Gvozdenko L.A. The study of man-caused distortions in the geomagnetic field of residential and industrial buildings and to identify ways to reduce them to a safe level. *Technical Electrodynamics. Thematic Issue «Problems of Modern Electrical Engineering»*, 2008, chapter 2, pp. 3-8. (Rus).
8. Rozov V.Y., Tkachenko O.O., Yerisov A.V., Grinchenko V.S. Analytical calculation of magnetic field of three-phase cable lines with two-point bonded shields. *Tekhnichna Elektrodynamika*, 2017, no. 2, pp. 13–18. doi: <https://doi.org/10.15407/techned2017.02.013>.
9. Brune D., Hellborg R., Persson B.R.R., Pääkkönen R. Radiation at home, outdoors and in the workplace. *Scandinavian Science Publisher*, 2001, 547 p. ISBN 82-91833-02-8.
10. Non-Ionizing Radiation, Part 1: Static and Extremely Low-Frequency (ELF) Electric and Magnetic Fields. *IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Human*, 2002, 80, p.395
11. World Health Organization. Electromagnetic fields and public health. Exposure to extremely low frequency fields. Available at: <https://www.who.int/teams/environment-climate-change-and-health/radiation-and-health/non-ionizing/exposure-to-extremely-low-frequency-field>. (1 July 2024)
12. Rozov, V.Yu., *External magnetic fields of power electrical equipment and methods for reducing them Preprint*. [Vneshnie magnitnie polya silovogo elektrooborudovaniya i metodi ikh umensheniya Preprint], NAS of Ukraine The Institute of Electrodynamics Publ.,1995, K., 772, 42 p.
13. Manilov A.M., Krasnozhon A.V., Tovstiyuk S.O. Assessment of the magnitude of the magnetic field of cable heating of residential and industrial premises from the point of view of its safety for people. *Promelektro*, 2022, 3-6, 32-36.
14. Stratton J.A. *The Theory of Electromagnetism*. М., Gostehizdat Publ., 1948. 520 p. (Rus).
15. Nesterenko A.D. *Introduction to Theoretical Electrical Engineering*. К., Nauk.Dumka.1969. 351 p.
16. Baranov M.I., Rozov V.Y., Sokol Y.I. To the 100th anniversary of the National academy of sciences of Ukraine – the cradle of domestic science and technology. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2018, no. 5, pp. 3-11. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2018.5.01>.

Надійшла до редакції 17.07.2024р.