

В.Ю. Розов, С.Ю. Реуцький, Д.Є. Пелевін, К.Д. Кундіус

Магнітне поле кабельних систем електрообігріву підлог житлових приміщень

Проблема. Для ефективного захисту здоров'я населення від магнітного поля кабельних систем електрообігріву підлог, необхідно його зменшення до безпечного рівня. Однак це потребує ретельного вивчення магнітного поля. **Метою роботи** є розробка математичної моделі і верифікованої методики розрахунку магнітного поля кабельних систем електрообігріву підлог житлових приміщень, та оцінка відповідності магнітного поля нормативному рівню. **Методика.** Розроблено методику розрахунку магнітного поля кабельних систем електрообігріву підлог в житлових приміщеннях. **Наукова новизна.** На основі закону Біо-Савара та принципу суперпозиції створено аналітичну модель магнітного поля кабельних систем електрообігріву підлог та методику його розрахунку. Визначено магнітне поле коаксіального нагрівального кабелю з урахуванням величини його максимального ексцентриситету. Експериментально обґрунтована коректність отриманих теоретичних положень, яка підтверджена їх співпадінням із результатами експерименту з розкидом менше 7%. **Практична значимість.** Запропоновано верифіковану методику розрахунку магнітного поля кабельних систем електрообігріву підлог і виконано оцінку відповідності індукції їх магнітного поля нормативному рівню 0,5 мкТл. Рекомендовано прокладати сучасні двожилінні нагрівальні кабелі на глибині не менше 0,075-0,1 м від підлоги. При меншій глибині прокладання рекомендовано використовувати коаксіальні нагрівальні кабелі, що мають на порядок менше магнітне поле. Бібл. 51, табл. 1, рис. 11.

Ключові слова: кабельні системи електрообігріву підлог, магнітне поле, моделювання та вимірювання, оцінка відповідності нормативному рівню.

Вступ. Безпечне і комфортне проживання населення в житлових будинках неможливо без обмеження в них рівня техногенних фізичних полів [1-3], в тому числі і електромагнітного поля (ЕМП). Одним із найбільш потужних внутрішніх джерел ЕМП є кабельні системи електрообігріву (КСЕ) підлог [4, 5] які зараз інтенсивно розповсюджуються в світі. Також, як і зовнішні електромережі [6-8], КСЕ створюють в житлових приміщеннях квазістаціонарне ЕМП промислової частоти, що характеризується негативно діючими на людину електричною (ЕП) і магнітною (МП) складовими [6, 8-11]. За висновками Всесвітньої організації охорони здоров'я (ВООЗ), довготривала дія МП промислової частоти є більш небезпечною для здоров'я населення, ніж ЕП [12]. Основою для такого висновку стало виявлення наприкінці 20-го сторіччя канцерогенних властивостей МП електромереж при його слабкій, але довготривалій дії на населення, і особливо, на дітей [13-16]. Це обумовило розробку експертами ВООЗ рекомендацій щодо обмеження індукції МП промислової частоти для населення зі 100 мкТл [17] до рівня 0,2-0,3 мкТл для зменшення вірогідності виникнення ракових захворювань [18]. Комфортний для житлових будинків рівень індукції МП промислової частоти рекомендований також міжнародним стандартом [3] і знаходиться у діапазоні 0,02-0,5 мкТл. Реалізація вказаних рекомендацій призвела до введення більш жорстких національних санітарних норм з індукції МП частотою 50-60 Гц [19], стимулювала виконання комплексу робіт із розробки і впровадження нових методів визначення та нормалізації МП [3, 20-29].

В Україні вирішення наукових проблем санітарно-гігієнічного нормування МП для населення виконує Інститут громадського здоров'я ім. О.М. Марзєєва НАМН України (раніше – Інститут гігієни та медичної екології НАМН України ім. О.М. Марзєєва). У ньому, під науковим керівництвом відомих в світі українських вчених-гігієністів академіка Сердюка А.М. та професора Думанського Ю.Д., вже у 1975 р. була визначена необхідність введення гранично допустимого для населення рівня індукції МП [30]. Остаточою цей норматив для МП промислової частоти на рівні 0,5 мкТл був теоретично та експериментально (на тваринах) обґрунтований ними в [31]. Він відповідає сучасним рекомендаціям ВООЗ

і склав наукову основу прийнятого в 2017 р. нормативного документу [32], відповідно до якого (табл. 1) діюче значення індукції МП від кабельних ліній у кожній точці об'єму житлового приміщення, включаючи підлогу (за виключенням простору ближче 0,5 м від стін), не повинно перевищувати безпечний рівень 0,5 мкТл.

Таблиця 1
Тимчасові гранично допустимі (нормативні) рівні магнітного поля над трасою проходження кабельної лінії згідно з табл. 2.3.2 нормативного документу України «Правила улаштування електроустановок» [32]

Територія, на якій регламентують рівень МП промислової частоти	Індукція МП, мкТл
Усередині житлових приміщень	0,5
На відстані 50 см від стін житлових приміщень та побутових електроприладів	3,0* (*застосовується для кабелів і електропроводок, прокладених у стінах)
На території зони житлової забудови	10,0
Населена місцевість поза зоною житлової забудови	20,0
Ненаселена місцевість та сільськогосподарські угіддя	50,0

Основними елементами КСЕ (рис. 1) є резистивні нагрівальні кабелі (НК), які монтуються під поверхнею підлоги на глибині h_k від неї, та терморегулятор з вбудованим термодатчиком [5]. НК живляться від квартирної електромережі і розраховані на номінальний струм, який може досягати 15 А [4].

Аналіз конструктивного виконання НК [5, 33-42] показує, що вони розподіляються на одножилінні та двожилінні (рис. 2). Такі НК мають різні схеми підключення до електромережі (рис. 3), та створюють різний рівень МП. Так, відповідно до [1, 43], індукція МП одножилінних НК істотно (більш ніж на порядок) перевищує МП двожилінних НК. Це обмежує використання одножилінних НК нежитловими приміщеннями.

Для рівномірного прогріву підлоги НК укладаються у вигляді «змійки» із кроком 80-120 мм [5]. Це робить розподіл МП КСЕ відмінним від МП одиночних НК, що обумовлює його окремий аналіз. При аналізі «змійку» представимо у вигляді меандру (рис. 3).

© В.Ю. Розов, С.Ю. Реуцький, Д.Є. Пелевін, К.Д. Кундіус

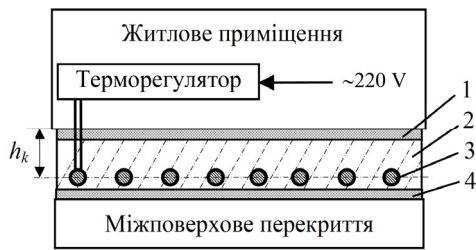


Рис. 1. Типова конструкція КСЕ:
1 – покриття підлоги, 2 – бетонна (клеєва) стяжка, 3 – НК, 4 – теплоізоляція

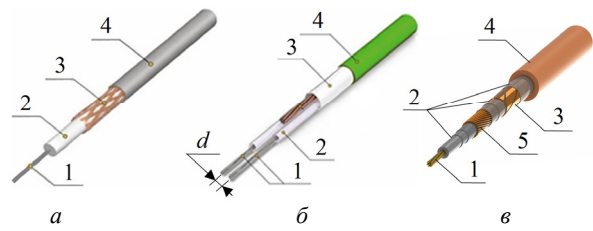
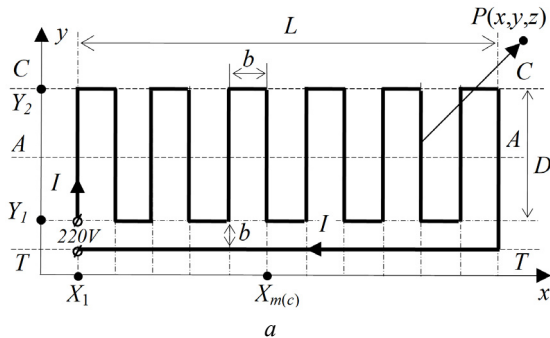


Рис. 2. Конструктивне виконання НК різних типів: одножильний (а), двојильний планарний (б), двојильний коаксіальний (в); (1, 5 – нагрівальні (струмопровідні) жили, 2 – електроізоляція, 3 – електропровідний заземлювальний екран; 4 – зовнішня електроізоляція)

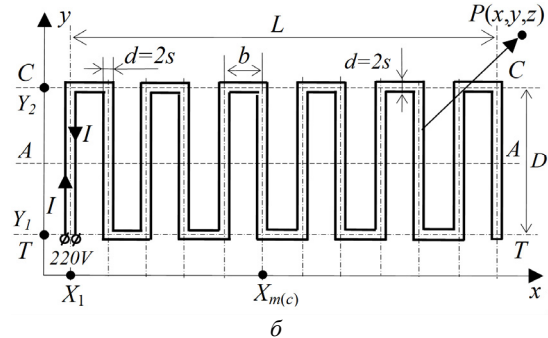


Рис. 3. Геометрія прокладання одножильного (а) та двојильного (б) НК КСЕ в горизонтальній площині XY під підлогою та схеми підключення до квартирної електромережі

Відомо, що індукція МП двојильних НК, як і будь-якої електричної мережі, залежить від відстані d між осями проводів, та струму I в них [6, 8, 43]. Тому двојильні плоскі (планарні) НК (рис. 2,б) виробляються з технологічно мінімально можливо відстанню між його жилами d (1,4 – 2,5 мм). Однак, як буде показано нижче, використання таких НК при стандартній глибині їх прокладання $h_k = 0,03\text{--}0,05$ м (рис. 1) і струмі живлення 10 А, призводить до суттєвого перевищення індукції МП над нормативним рівнем 0,5 мкТл.

Нормалізація МП можлива при використанні коаксіальних [40] НК (рис. 2,в), але їх МП на сьогодні досліджено недостатньо. Також у відомих публікаціях, наприклад [4, 42–45], недостатньо розглянуте МП саме КСЕ з різними НК, відсутні верифіковані методики розрахунку МП КСЕ, не виконана коректна оцінка відповідності індукції їх МП діючим нормативам України та авторитетним міжнародним рекомендаціям.

Метою роботи є розробка математичної моделі і верифікованої методики розрахунку магнітного поля кабельних систем електрообігріву підлог житлових приміщень, та оцінка його відповідності нормативному рівню.

Математичні моделі МП прямолінійних НК. При побудові моделі приймемо наступні припущення, які дозволяють спростити моделювання, але істотно не впливають на його результат:

- довжина L НК суттєво (на порядок) більша від відстані r до точки спостереження P , а також від відстані d між осями жил двојильних кабелів, що дозволяє розглядати НК як нескінченні;
- НК моделюються паралельними прямолінійними провідниками у вигляді струмових ниток, розташованих у горизонтальній площині;
- МП НК є потенційним і плоскопаралельним;
- впливом зовнішніх феромагнітних (електропровідних) елементів та джерел МП житлового приміщення, а також електропровідного екрану 3 (рис. 2) НК нехтуємо;
- напруга мережі живлення НК синусоїдална.

Одножильний НК. Відповідно до закону повного струму в інтегральній формі [46], лінійний інтеграл напруженості H МП уздовж замкнутого контуру дорівнює електричному струму I крізь поверхню, обмежену цим контуром:

$$\oint_L (H, dl) = I. \quad (1)$$

Застосовуючи (1) до кола, що лежить на площині з радіусом r і центром у точці, через яку проходить нескінченний провідник, отримаємо:

$$2\pi r H = I. \quad (2)$$

За допомогою (2) виявимо залежність напруженості МП одиночного нескінченного провідника від його струму, координат осі провідника (x_c, y_c) та координат точки спостереження $P(x, y)$:

$$H(r) = \frac{I}{2\pi r^*}, \quad r^* = \sqrt{(x-x_c)^2 + (y-y_c)^2}. \quad (3)$$

Із (3) за умов $x = r, y = 0$ отримаємо відоме [9, 46] співвідношення, що визначає індукцію МП на відстані r від одиночного одножильного НК:

$$B_{OK} = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}, \quad \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}. \quad (4)$$

Двојильний планарний НК. Очевидно, що максимальне значення індукції МП двојильного планарного кабелю, розташованого в горизонтальній площині XY із відстанню між паралельними жилами d і струмами в них $\pm I$, розподілено по вертикальній осі Z. В загальному випадку задача визначення МП такого НК може бути вирішена виключно чисельними методами. Однак, якщо розглядати МП тільки вздовж осі Z, на висоті r від НК, то задача в силу симетрії суттєво спрощується. Виконуючи закон Біо-Савара та елементарні геометричні побудови, аналогічно [8] отримуємо наступну формулу для розрахунку модуля індукції МП двојильного планарного НК:

$$B_{DPK \max} = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I \cdot d}{\left\{r^2 + (0,5d)^2\right\}}. \quad (5)$$

Двожилльний коаксіальний НК. Відомо, що МП нескінченного циліндричного провідника еквівалентно МП нитки з тим самим струмом, що проходить через вісь симетрії такого провідника [10, 47]. Відповідно, в ідеальному коаксіальному НК осі обох його провідників (рис. 2,б) збігаються, а їх струми різноспрямовані. Тому МП цих струмів взаємно компенсуються і для ідеального коаксіального НК його результуюче МП за межами провідників буде відсутнє. Але при промисловому виробництві НК виникають технологічні відхилення від симетричної форми. При цьому геометрична вісь внутрішньої жили НК може зміщуватися на величину ексцентриситету e [48, 49], що характеризує величину її відхилення від осі симетрії НК. Величина технологічного розкиду ексцентриситету коаксіальних кабелів при серійному виробництві може складати 5-15 % (0,1-0,3 мм) від ідеальної відстані d між віссю його центральної жили і поверхнею циліндричної струмопровідної жили. Тому зовнішнє МП реального коаксіального НК буде збігатися з МП умовного двожилльного планарного НК (5), в якому відстань між його жилами дорівнює величині ексцентриситету ($d = e$). З урахуванням викладеного, індукція МП реального коаксіального НК на основі (5) може бути визначена співвідношенням:

$$B_{DKK \max} = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{Ie}{\left\{r^2 + (0,5e)^2\right\}}. \quad (6)$$

Дослідження МП різних типів НК. Використаємо отримані співвідношення (4-6) для інженерного розрахунку індукції МП НК в функції від відстані r до точки спостереження. Тут величина r відповідає глибині h_k прокладання НК (рис. 1), що визначає відстань від поверхні підлоги до осі жил НК. Результати розрахунку представлені на рис. 4. Так, індукція МП одножилльного НК при рекомендованій виробниками глибині прокладання 0,03-0,05 м складає 40-65 мкТл. Це в 80-130 разів перевищує нормативний рівень 0,5 мкТл, що виключає використання одножилльних НК в житлових приміщеннях.

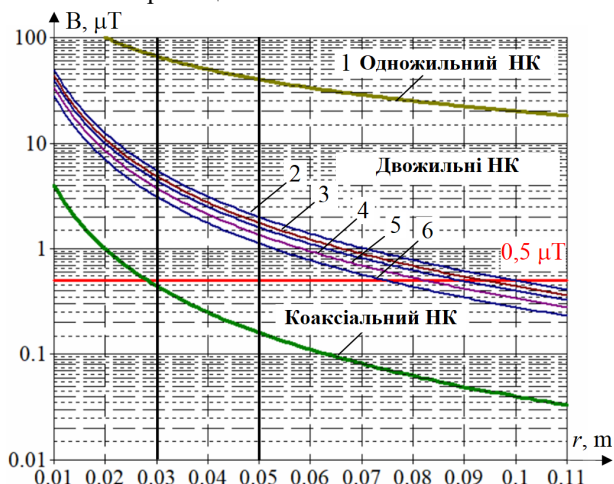


Рис. 4. Розрахункові значення індукції МП різних типів прямолинійних НК при віддаленні на відстань r по осі Z (двожилльний НК з d : 2 – 2,5 мм; 3 – 2,2 мм; 4 – 2 мм; 5 – 1,7 мм; 6 – 1,4 мм; коаксіальний НК з $e = 0,2$ мм); $I = 10$ А

Індукція МП двожилльних НК при глибині прокладання 0,03-0,05 м в залежності від відстані між їх жилами d (рис. 4) складає від 2 до 5,5 мкТл, що перевищує нормативний рівень 0,5 мкТл у 4-11 разів.

Індукція МП коаксіального НК при $e = 0,2$ мм і стандартній глибині прокладання 0,03-0,05 м складає (рис. 4) від 0,16 до 0,45 мкТл, що відповідає нормативному рівню 0,5 мкТл. Тому коаксіальні НК при обмеженні їх ексцентриситету на рівні 0,1 d (приблизно 0,2 мм) можуть безпечно експлуатуватися у житлових приміщеннях при стандартній глибині прокладання.

Результати розрахунку індукції МП реальних НК наведені на рис. 5. Вони представлені планарним двожилльним НК типу «Arnold Rak 6101-20 ЕС» та коаксіальним НК типу «Volterm» при $e = 0,2$ мм і 0,05 мм (криві 2, 3), який був спеціально наданий фірмою «VOLTERM» [40] для випробування на магнітовимірювальному стенді інституту. Аналіз результатів розрахунку (рис. 5) показує, що вони відповідають даним рис. 4 та зробленим вище висновкам.

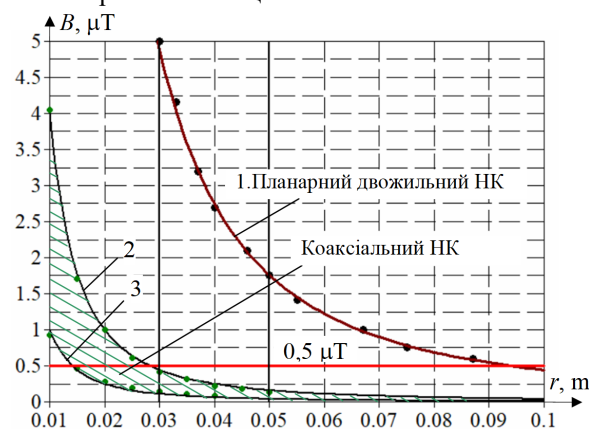


Рис. 5. Розрахункові — та експериментальні ●●● значення індукції МП прямолинійних двожилльного планарного НК типу «Arnold Rak 6101-20 ЕС», $d = 2,2$ мм (1), а також коаксіального НК типу «Volterm» (2, 3) з ексцентриситетом $e = 0,2-0,05$ мм, при віддаленні від них на відстань r по осі Z , $I = 10$ А

Виконаємо тепер дослідження розподілу індукції МП КСЕ з різними НК при схемі їх прокладання відповідно до рис. 3. Таке прокладання змінює просторовий розподіл МП КСЕ у порівнянні з МП одиночного прямолинійного НК завдяки взаємному впливу розташованих поблизу провідників зі струмом за МП.

Математична модель МП КСЕ. При побудові моделі МП приймаємо наступні припущення: НК КСЕ моделюються ламаною лінією (меандром, рис. 3) із прямолинійних паралельних струмових ниток, розташованих у горизонтальній площині; квазістационарне МП КСЕ є тривимірним; впливом зовнішніх феромагнітних (електропровідних) елементів та джерел МП нехтуємо; напруга мережі живлення синусоїдальна.

Моделювання виконаємо аналітичним методом на основі закону Біо-Савара та принципу суперпозиції [9, 10, 46, 47] шляхом визначення результату у вигляді векторної суми індукції МП в точці спостереження $P(x, y, z)$ від окремих провідників зі струмом.

В точці з радіус-вектором \mathbf{R} елемент контуру $d\mathbf{r}$ зі струмом I генерує МП з індукцією:

$$d\mathbf{B}(t) = \frac{\mu_0 I}{4\pi R^3} [d\mathbf{r} \times \mathbf{R}], \quad (7)$$

де вектор \mathbf{R} направлений з точки розташування елемента контуру $d\mathbf{r}$ у точку спостереження $P(x, y, z)$. Повне МП контуру C має індукцію:

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_C \frac{[\mathbf{dr} \times \mathbf{R}]}{R^3}. \quad (8)$$

Розглянемо МП (рис. 6,а), створюване струмом I , який проходить прямолінійною ділянкою між точками $A_n(X_0, Y_1, 0)$ і $A_k(X_0, Y_2, 0)$, тобто, відрізок зі струмом розташований у площині $z = 0$ паралельно осі y на відстані X від осі x (рис. 6,а). У цьому випадку елемент контуру дорівнює:

$$d\mathbf{r} = d\eta \mathbf{e}_y, \quad Y_1 \leq \eta \leq Y_2, \quad (9)$$

а його координати:

$$(X_0, \eta, 0), \quad Y_1 \leq \eta \leq Y_2. \quad (10)$$

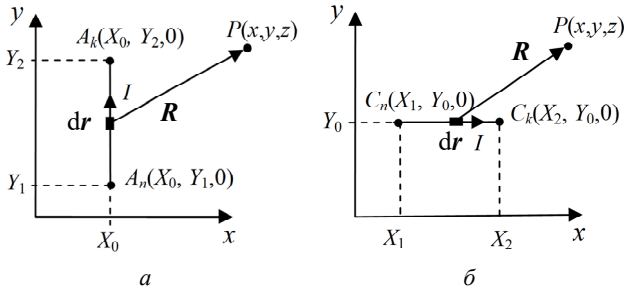


Рис. 6. До визначення індукції МП відрізків зі струмом, розташованих паралельно осям y (а) та x (б)

Тоді вектор, спрямований із точки, в якій розташований елемент струму $d\mathbf{r}$, у точку спостереження $P(x, y, z)$ дорівнює:

$$\mathbf{R} = (x - X_0, y - \eta, z).$$

Куб відстані між елементом контуру та точкою спостереження:

$$R^3 = [(x - X_0)^2 + z^2 + (y - \eta)^2]^{3/2}. \quad (11)$$

Векторний добуток:

$$[d\mathbf{l} \times \mathbf{R}] = \begin{vmatrix} \mathbf{e}_x & \mathbf{e}_y & \mathbf{e}_z \\ 0 & d\eta & 0 \\ x - X_0 & y - \eta & z \end{vmatrix} = z d\eta \mathbf{e}_x - (x - X_0) d\eta \mathbf{e}_z. \quad (12)$$

Компоненти індукції прямолінійного відрізка зі струмом запишуться як:

$$B_x = \frac{\mu_0 I}{4\pi} z \int_{Y_1}^{Y_2} \frac{d\eta}{R^3}; \quad B_y = 0; \quad B_z = -\frac{\mu_0 I}{4\pi} (x - X_0) \int_{Y_1}^{Y_2} \frac{d\eta}{R^3}. \quad (13)$$

У [50] міститься формула для невизначеного інтегралу:

$$\int \frac{dt}{T(t)^{3/2}} = \frac{4at + 2b}{(4ac - b^2)T(t)^{1/2}}; \quad T(t)^{1/2} = [c + bt + at^2]^{1/2}. \quad (14)$$

Використовуючи її, обчислимо інтеграл у (13):

$$\begin{aligned} \int_{Y_1}^{Y_2} \frac{d\eta}{R^3} &= \int_{Y_1}^{Y_2} \frac{d\eta}{[(x - X_0)^2 + z^2 + (y - \eta)^2]^{3/2}} = \\ &= \int_{Y_1}^{Y_2} \frac{d\eta}{[c + (y - \eta)^2]^{3/2}} = \int_{Y_1}^{Y_2} \frac{d\eta}{[c + (\eta - y)^2]^{3/2}} = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= \int_{Y_1-y}^{Y_2-y} \frac{dt}{[c + t^2]^{3/2}} = \left[\frac{1}{c} \frac{t}{[c + t^2]^{1/2}} \right]_{Y_1-y}^{Y_2-y} = \\ &= \frac{1}{(x - X_0)^2 + z^2} \left[\frac{Y_2 - y}{[(x - X_0)^2 + z^2 + (Y_2 - y)^2]^{1/2}} - \right. \\ &\quad \left. - \frac{Y_1 - y}{[(x - X_0)^2 + z^2 + (Y_1 - y)^2]^{1/2}} \right]. \quad (15) \end{aligned}$$

Позначимо:

$$F(X_0, Y) = \frac{Y - y}{[(x - X_0)^2 + z^2][(x - X_0)^2 + z^2 + (Y - y)^2]^{1/2}}.$$

Тоді компоненти МП запишуться у вигляді:

$$BY_x(X_0, Y_1, Y_2) = \frac{\mu_0 I}{4\pi} z [F(X_0, Y_2) - F(X_0, Y_1)];$$

$$BY_z(X_0, Y_1, Y_2) = -\frac{\mu_0 I}{4\pi} (x - X_0) [F(X_0, Y_2) - F(X_0, Y_1)];$$

$$BY_y(X_0, Y_1, Y_2) = 0. \quad (16)$$

Функції $BY_x(X_0, Y_1, Y_2)$, $BY_y(X_0, Y_1, Y_2)$, $BY_z(X_0, Y_1, Y_2)$ дають компоненти індукції МП відрізка провідника, паралельного осі y зі струмом I на відстані X_0 від осі.

Розглянемо МП у напрямку осі x від струму I , що проходить по відрітку між точками $C_n(X_1, Y_0, 0)$ і $C_k(X_2, Y_0, 0)$ (рис. 6,б). Відрізок зі струмом розташований у площині $z = 0$, проходить паралельно осі x на відстані Y_0 від осі y . Виконуючи аналогічні (9–14) обчислення, отримаємо:

$$BX_y(Y_0, X_1, X_2) = -\frac{\mu_0 I}{4\pi} z [G(X_2, Y_0) - G(X_1, Y_0)];$$

$$BX_z(Y_0, X_1, X_2) = \frac{\mu_0 I}{4\pi} (y - Y_0) [G(X_2, Y_0) - G(X_1, Y_0)];$$

$$BX_x(Y_0, X_1, X_2) = 0, \quad (17)$$

де

$$G(X, Y_0) = \frac{X - x}{[(y - Y_0)^2 + z^2][(y - Y_0)^2 + z^2 + (X - x)^2]^{3/2}}.$$

Функції $BX_x(Y_0, X_1, X_2)$, $BX_y(Y_0, X_1, X_2)$, $BX_z(Y_0, X_1, X_2)$ дають просторові компоненти індукції МП відрізка провідника, паралельного осі x зі струмом I на відстані Y_0 від осі.

Використаємо (16, 17) для визначення розрахункових співвідношень МП реальних КСЕ підлог, схеми укладки кабелів для яких представлені на рис. 3.

Розрахункові співвідношення для МП КСЕ з одножильним НК. Індукція МП у точці P від системи одножильних провідників (рис. 3,а) у площині $z = \text{const}$, які паралельні осям координат x і y , визначається векторною сумою індукцій МП від їх прямолінійних відрізків. Тоді, відповідно до (16, 17), компоненти індукції МП КСЕ можуть бути представлені у вигляді:

$$\begin{aligned} B_x &= \sum_{m=1}^{m=K/2} [BY_x(X_{2m-1}, Y_1, Y_2) + BY_x(X_{2m}, Y_2, Y_1)] + \\ &\quad + BY_x(X_K, Y_1, Y_1 - b); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
B_y &= \sum_{c=1}^{c=K/2-1} [BX_y(Y_2, X_{2c-1}, X_{2c}) + BX_y(Y_1, X_{2c}, X_{2c+1})] + \\
&+ BX_y(Y_2, X_{K-1}, X_K) + BX_y(Y_1 - b, X_K, X_1); \\
B_z &= \sum_{m=1}^{m=K/2} [BY_z(X_{2m-1}, Y_1, Y_2) + BY_z(X_{2m}, Y_2, Y_1)] + \\
&+ BY_z(X_K, Y_1, Y_1 - b) + \\
&+ \sum_{c=1}^{c=K/2-1} [BX_z(Y_2, X_{2c-1}, X_{2c}) + BX_z(Y_1, X_{2c}, X_{2c+1})] + \\
&+ BX_z(Y_2, X_{K-1}, X_K) + BX_z(Y_1 - b, X_K, X_1), \quad (18)
\end{aligned}$$

де $X_m, Y_{1,2}, K$ – координати кінців та кількість відрізків паралельних осі y ; $X_c, Y_{1,2}$ – координати кінців відрізків паралельних осі x .

Діюче значення індукції МП КСЕ у точці $P(x, y, z)$ визначається як:

$$\tilde{B}(P) = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2}, \quad (19)$$

де просторові компоненти B_x, B_y, B_z отримані відповідно до (18).

Розрахункові співвідношення для МП КСЕ з дво-жилльним НК. Індукція МП у точці $P(x, y, z)$ від системи двожилльних провідників (рис. 3,б) з відстанню між осями жил $d = 2s$, розкладених у площині $z = \text{const}$ паралельно осям координат x і y , визначається сумою МП від їх прямолінійних відрізків. Тоді, відповідно до (16, 17), компоненти індукції МП КСЕ з двожилльним НК можуть бути представлені у вигляді:

$$\begin{aligned}
B_x &= \sum_{m=1}^{m=K/2} [BY_x(X_{2m-1} - s, Y_1 + s, Y_2 + s) + \\
&+ BY_x(X_{2m} + s, Y_2 + s, Y_1 + s) + \\
&+ BY_x(X_{2m-1} + s, Y_2 - s, Y_1 - s) + \\
&+ BY_x(X_{2m} - s, Y_1 - s, Y_2 - s)] + \\
&+ BY_x(X_K + s, Y_1 + s, Y_1 - s_1); \\
B_y &= \sum_{c=1}^{c=K/2-1} [BX_y(Y_2 + s, X_{2c-1} - s, X_{2c} + s) + \\
&+ BX_y(Y_1 + s, X_{2c} + s, X_{2c+1} - s) + \\
&+ BX_y(Y_2 - s, X_{2c} - s, X_{2c-1} + s) + \\
&+ BX_y(Y_1 - s, X_{2c+1} + s, X_{2c} - s)] + \\
&+ BX_y(Y_2 + s, X_{K-1} - s, X_K + s) + \\
&+ BX_y(Y_2 - s, X_K - s, X_{K-1} + s) + \\
&+ BX_y(Y_1 - s, X_K + s, X_K - s); \\
B_z &= \sum_{m=1}^{m=K/2} [BY_z(X_{2m-1} - s, Y_1 + s, Y_2 + s) + \\
&+ BY_z(X_{2m} + s, Y_2 + s, Y_1 + s) + \\
&+ BY_z(X_{2m-1} + s, Y_2 - s, Y_1 - s) + \\
&+ BY_z(X_{2m} - s, Y_1 - s, Y_2 - s)] + \\
&+ BY_z(X_K + s, Y_1 + s, Y_1 - s_1) + \\
&+ \sum_{c=1}^{c=K/2-1} [BX_z(Y_2 + s, X_{2c-1} - s, X_{2c} + s) +
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&+ BX_z(Y_1 + s, X_{2c} + s, X_{2c+1} - s) + \\
&+ BX_z(Y_2 - s, X_{2c} - s, X_{2c-1} + s) + \\
&+ BX_z(Y_1 - s, X_{2c+1} + s, X_{2c} - s)] + \\
&+ BX_y(Y_2 + s, X_{K-1} - s, X_K + s) + \\
&+ BX_y(Y_2 - s, X_K - s, X_{K-1} + s) + \\
&+ BX_y(Y_1 - s, X_K + s, X_K - s). \quad (20)
\end{aligned}$$

Діюче значення індукції МП визначається з (19).

Отримані співвідношення (18–20) дозволяють розраховувати розподіл індукції МП КСЕ у разі виконання їх НК із прямолінійних відрізків – у вигляді прямокутного меандру (рис. 3). Однак фактична форма розкладання НК може виконуватися як із практично прямолінійних відрізків [33], так і у вигляді «змійки» [35] із радіусом вигину НК на рівні $0,5b$ (рис. 10), або меншим. За рамками цієї статті авторами вивчено вплив форми розкладання вершини НК на рівень МП КСЕ, та показано, що розкладання у вигляді прямокутного меандру (рис. 3) дає максимальні значення МП. Підтвердженням цього є верифіковані криві 1, 3 на рис. 8, 9. Це дозволяє використовувати запропоновані співвідношення (18–20) як універсальні, без урахування форми вершин розкладки, для визначення індукції МП КСЕ в найгіршому випадку.

Дослідження МП КСЕ з НК різних типів. Використаємо співвідношення (18–20) для визначення індукції МП КСЕ з одножилльними та двожилльними НК. При цьому маємо на увазі, що максимальні значення індукції потенційного МП КСЕ у всьомі об'ємі приміщення зосереджені на його підлозі.

На рис. 7 представлена карта розподілу МП над КСЕ з одножилльним НК, виконаного з розмірами $1,2 \times 0,8$ м та кроком $0,1$ м (рис. 3,а). Максимальний рівень індукції МП (42 мкТл) має місце на вершині меандру (рис. 3,а) – на лінії СС, та над зворотнім провідом (лінія ТТ). Ці значення практично співпадають з МП від одиночного прямолінійного НК (рис. 4), що дозволяє оцінювати максимальні значення МП цієї КСЕ за співвідношенням (4). У зв'язку із істотним перевищенням нормативного рівня МП, КСЕ з одножилльним НК в подальшому не розглядаються.

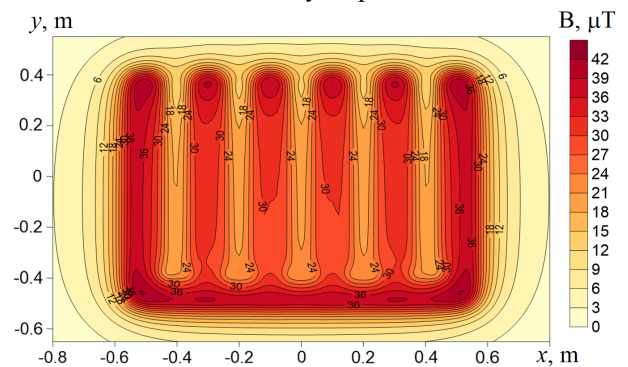
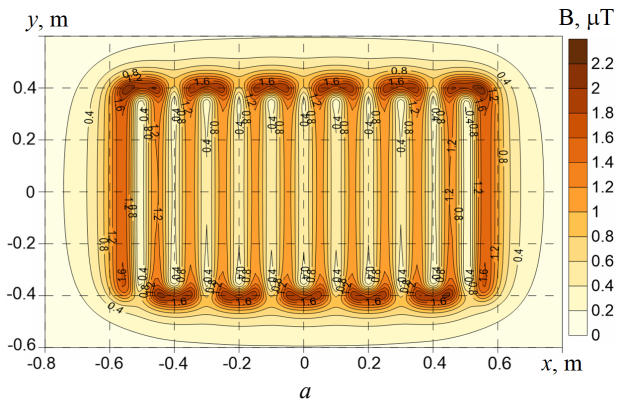


Рис. 7. Розрахункові значення розподілу індукції МП від КСЕ з одножилльним НК типу Fenix ASL1P 18 на поверхні підлоги при $h_k = 0,05$ м, $I = 10$ А

Розрахована карта розподілу МП КСЕ з промисловим зразком двожилльного планарного НК (рис. 3,б) при $h_k = 0,05$ м з $d = 2,2$ мм, представлена на рис. 8,а. На рис. 8,б наведені характерні графічні залежності. Як видно з рис. 8, максимальні значення індукції КСЕ складають $2,16$ мкТл. Вони мають місце на вершинах розкладання –

по лініях ТТ та СС (рис. 3,б). Ці значення є більшими від МП одиночного НК (рис. 4) приблизно на 15 %.

Розрахована карта розподілу МП КСЕ з промисловим зразком коаксіального НК з $e = 0,2$ мм при $h_k = 0,05$ м, виконаного відповідно до рис. 3,б,



представлена на рис. 9,а. На рис. 9,б наведені розраховані графічні залежності. Як видно з рис. 9, максимальні значення індукції КСЕ складають 0,196 мкТл, що істотно менше нормативного рівня 0,5 мкТл.

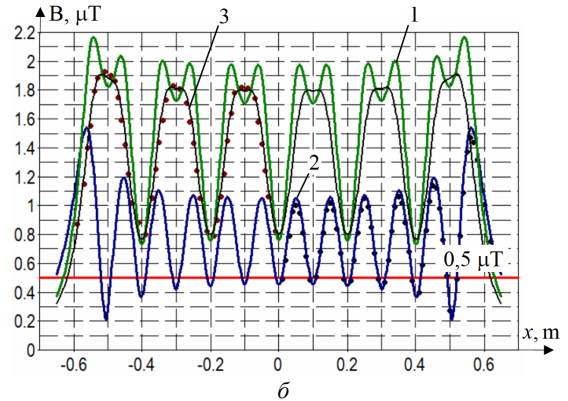


Рис. 8. Розподіл МП від КСЕ з двожилиним планарним НК типу Arnold Rak 6101-20 ЕС ($I = 10$ А, $d = 2,2$ мм), на поверхні підлоги при $h_k = 0,05$ м (КСЕ з прямокутним розкладанням НК (рис. 3,б): 1 – по лінії СС; 2 – по лінії АА); 3 – КСЕ з розкладанням НК «змієюю» (рис. 10) по лінії СС (рис. 3,б), (— розрахунок ••• експеримент)

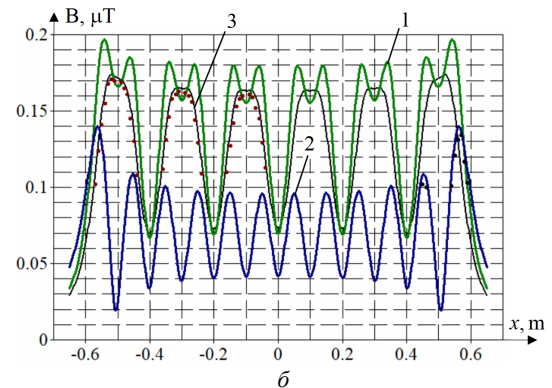
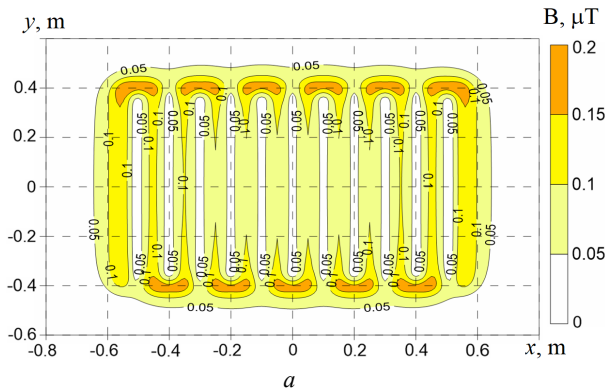


Рис. 9. Розподіл МП від КСЕ з коаксіальним НК типу «Volterm HR18» ($I = 10$ А, $e = 0,2$ мм), на поверхні підлоги при $h_k = 0,05$ м (КСЕ з прямокутним розкладанням НК (рис. 3,б): 1 – по лінії СС; 2 – по лінії АА); 3 – КСЕ з розкладанням НК «змієюю» (рис. 10) по лінії СС (рис. 3,б), (— розрахунок ••• експеримент)

Експериментальні дослідження МП різних типів НК та КСЕ на їх основі. Дослідження виконувались на промислових зразках НК і лабораторних макетах КСЕ на їх основі на унікальному магнітовимірювальному стенді ІПМаш НАН України [26, 27]. Досліджувались промислові зразки планарного двожиливого НК типу «Arnold Rak 6101-20 ЕС» і коаксіального НК типу «Volterm HR18», а також лабораторні макети КСЕ на їх основі, виконані відповідно до рис. 3 з розмірами $1,2 \times 0,8$ м та розкладанням НК з кроком 0,1 м змієюю (рис. 10). Вимірювання індукції МП проводились сертифікованим векторним магнітометром типу Magnetoscor 1.069 фірми Foerster (діапазон вимірювань індукції МП 1 нТл-600 мТл, похибка 2,5 %).

Вимірювання МП окремих НК. Результати вимірювань індукції МП представлені на рис. 5.

Для планарного НК розкид результатів розрахунку та експерименту не перевищує 5 %, що підтверджує коректність розроблених математичних моделей і розрахункових співвідношень (18–20).

В процесі експериментальних досліджень коаксіального НК типу «Volterm HR18», виявлена неоднорідність розподілу індукції МП за його довжиною, яка при $r = 0,03$ м змінюється від 0,16 мкТл до 0,44 мкТл. При цьому максимальні значення індукції МП згідно

(6) відповідають величині ексцентриситету e на рівні 0,2 мм, а мінімальні значення e на рівні 0,05 мм. Розкид експериментальних значень індукції МП за довжиною цього НК представлений на рис. 5 у вигляді заштрихованої зони між кривими 2 і 3. Він є значним і свідчить про нестабільність ексцентриситету цього НК, що указує на необхідність удосконалення технології виробництва коаксіального НК фірми «Volterm».

Вимірювання МП КСЕ. Вимірювання індукції МП КСЕ виконувались на їх лабораторних макетах (рис. 10) з вказаними типами НК. Результати вимірювань представлені на рис. 8, 9. Розкид результатів розрахунку та експерименту не перевищує 7 %.

Найбільший розкид має місце на вершинах КСЕ (лінії СС, рис 3,б), що пов'язаний із відмінністю форми вершин макету (напівколо, рис. 10) і розрахункової моделі (прямокутник, рис. 3). Однак, розкид результатів експерименту в порівнянні із додатково виконаними авторами розрахунком індукції МП КСЕ для випадку розкладання вершин КСЕ відповідно до рис. 10 у формі напівкола із радіусом 50 мм (крива 3 на рис. 8, 9), також не перевищує 7 %. Тому результати експерименту цілком підтверджують коректність розроблених математичних моделей МП КСЕ (7–17) і отриманих на їх основі співвідношень (18–20).



Рис. 10. Дослідження розподілу індукції МП лабораторного макету КСЕ з коаксialними НК типу «VOLTERM» на магнітовимірювальному стенді ІПМаш НАН України

Оцінка відповідності МП КСЕ нормативному рівню. На основі верифікованих розрахункових співвідношень (18–20), виконаний розрахунок максимальних значень індукції МП, що створюються КСЕ з сучасними двожильними планарними НК з d від 1,4 до 2,5 мм, та коаксialними НК з ексцентриситетом $e = 0,2$ мм і $e = 0,1$ мм. Розрахунок виконаний на поверхні підлоги житлового приміщення при різній глибині h_k прокладання НК і струмі 10 А. Результати розрахунку у вигляді графіків представлені на рис. 11.

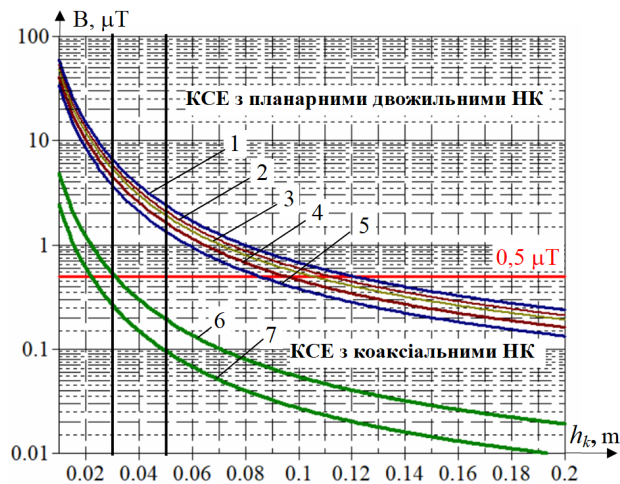


Рис. 11. Розраховані за верифікованими співвідношеннями (19, 20) максимальні значення індукції МП КСЕ, що створюються на поверхні підлоги з двожильними планарними НК (d : 1 – 2,5 мм; 2 – 2,2 мм; 3 – 2 мм; 4 – 1,7 мм; 5 – 1,4 мм) та коаксialними НК (6 – $e = 0,2$ мм; 7 – $e = 0,1$ мм) при різній глибині їх прокладання h_k , $I = 10$ А

Аналіз рис. 11 дозволяє констатувати наступне. При виконанні КСЕ на основі сучасних двожильних НК з мінімальною відстанню між жилами 1,4 мм, максимальне значення індукції МП на підлозі житлових приміщень складає 3,75–1,3 мкТл при глибині прокладання 0,03–0,05 м та струмі 10 А. Це в 7,5–2,6 разів перевищує гранично допустимий рівень індукції МП 0,5 мкТл. Тому безпечно використання КСЕ на основі

сучасних двожильних НК досягається тільки при глибині їх прокладання більш 0,085–0,1 м, або в разі обмеження їх струму і, відповідно, теплової потужності.

Зменшення МП КСЕ також можливо шляхом встановлення між КСЕ і підлогою приміщення суцільного електромагнітного екрану, наприклад, із зварних електропровідних алюмінієвих листів завтовшки 1,5–2 мм. Але при очікуваному коефіцієнті екранування МП на рівні 1,5–2,5 одиниць [51], вартість такого екрану буде перевищувати вартість КСЕ.

Виконання КСЕ на основі коаксialних НК з ексцентриситетом $e \leq 0,2$ мм при глибині прокладання 0,03–0,05 м дозволяє зменшити індукцію їх МП до нормативного рівня 0,5 мкТл. Тому широке запровадження коаксialних НК є ефективним методом вирішення проблеми зменшення можливих ризиків для здоров'я населення та забезпечення його комфортного проживання в житлових приміщеннях.

Доцільним також є подальше удосконалення конструкції та технології виробництва коаксialних НК для обмеження їх максимального ексцентриситету на рівні 0,1 мм та забезпечення його стабільності в умовах експлуатації.

Висновки.

1. На основі закону Біо-Савара та принципу суперпозиції розроблено аналітичну модель магнітного поля кабельних систем електрообігріву підлог житлових приміщень та методику розрахунку індукції магнітного поля на її основі.

2. Здійснено верифікацію розроблених математичної моделі та методики розрахунку магнітного поля шляхом експериментальних досліджень лабораторних макетів кабельних систем електрообігріву з промисловими зразками різних типів нагрівальних кабелів. Вимірювання підтвердили співпадіння результатів розрахунку та експерименту з розкидом не більше 7 %.

3. Досліджено магнітне поле коаксialного нагрівального кабелю та запропоновано методику його розрахунку з урахуванням максимальної величини ексцентриситету його центральної жили.

4. Виконано оцінку відповідності магнітного поля в житловому приміщенні нормативному рівню 0,5 мкТл при використанні кабельних систем електрообігріву з різними нагрівальними кабелями, на основі якої:

а) виявлено перевищення гранично допустимого рівня індукції магнітного поля на підлозі житлових приміщень в 2,6–7,5 разів при використанні сучасних планарних двожильних нагрівальних кабелів які мають мінімальну відстань між жилами 1,4 мм при глибині їх прокладання 0,05–0,03 м і струмі 10 А;

б) показано, що безпечно використання в житлових приміщеннях сучасних планарних двожильних нагрівальних кабелів при струмі 10 А потребує збільшення глибини їх прокладання до 0,085–0,1 м.

в) для зменшення можливих ризиків для здоров'я населення та забезпечення його комфортного проживання рекомендується використання в житлових приміщеннях коаксialних нагрівальних кабелів, які створюють на порядок менше магнітне поле, ніж сучасні планарні двожильні нагрівальні кабелі.

Конфлікт інтересів. Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Brune D., Hellborg R., Persson B.R.R., Pääkkönen R. Radiation at home, outdoors and in the workplace. *Scandinavian Science Publisher*, 2001, 547 p.
2. *Non-Ionizing Radiation, Part 1: Static and Extremely Low-Frequency (ELF) Electric and Magnetic Fields*. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 2002, no. 80, p. 395.
3. *Standard of Building Biology Testing Methods: SBM-2015*. Germany: Institut für Baubiologie + Ekologie IBN, 2015, 5 p. Режим доступу: <https://buildingbiology.com/building-biology-standard> (Дата звернення: 01.02.2024).
4. Milutinov M., Juhas A., Pekarić-Nad N. Magnetic field of electrical radiant heating system. *Safety Engineering*, 2017, vol. 7, no. 2, pp. 61-65. doi: <https://doi.org/10.7562/SE2017.7.02.03>.
5. ДБН В.2.5-24:2012: Державні будівельні норми України. Електрична кабельна система опалення. Київ: Мінрегіонбуд України, 2012. 81 с.
6. COV-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.
7. Conti R., Giorgi A., Rendina R., Sartore L., Sena E.A. Technical solutions to reduce 50 hz magnetic fields from power lines. *2003 IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings*, 2003, vol. 2, pp. 1016-1021. doi: <https://doi.org/10.1109/PTC.2003.1304685>.
8. COV-Н МЕВ 40.1-37471933-49:2011 Проектування кабельних ліній напружено до 330 кВ. Наставова (у ред. наказу Міненерго вугілля від 26.01.2017 № 82). К.: Міненергвугілля України, 2017. 168 с.
9. Нестеренко А.Д. Введение в теоретическую электротехнику. Київ: Наукова думка, 1969. 351 с.
10. Шимони К. Теоретическая электротехника (пер. с нем.). М.: Мир, 1964. 774 с.
11. ДСНІП 3.3.6.096-2002. Державні санітарні норми і правила при роботі з джерелами електромагнітних полів (затв. наказом МОЗ України від 18.12.2002 р. № 476). К.: МОЗ, 2003. 16 с.
12. World Health Organization. *Electromagnetic fields and public health. Exposure to extremely low frequency fields*. Режим доступу: <https://www.who.int/teams/environment-climate-change-and-health/radiation-and-health/non-ionizing/exposure-to-extremely-low-frequency-field> (Дата звернення: 01.02.2024).
13. Tognola G., Chiaramello E., Bonato M., Magne I., Souques M., Fiocchi S., Parazzini M., Ravazzani P. Cluster Analysis of Residential Personal Exposure to ELF Magnetic Field in Children: Effect of Environmental Variables. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, vol. 16, no. 22, art. no. 4363. doi: <https://doi.org/10.3390/ijerph16224363>.
14. Wertheimer N., Leeper E. Electrical wiring configurations and childhood cancer. *American Journal of Epidemiology*, 1979, vol. 109, no. 3, pp. 273-284. doi: <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aje.a112681>.
15. Kheifets L., Ahlbom A., Crespi C.M., Draper G., Hagihara J., Lowenthal R.M., Mezei G., Oksuzyan S., Schüz J., Swanson J., Tittarelli A., Vinceti M., Wunsch Filho V. Pooled analysis of recent studies on magnetic fields and childhood leukaemia. *British Journal of Cancer*, 2010, vol. 103, no. 7, pp. 1128-1135. doi: <https://doi.org/10.1038/sj.bjc.6605838>.
16. Green L.M., Miller A.B., Villeneuve P.J., Agnew D.A., Greenberg M.L., Li J., Donnelly K.E. A case-control study of childhood leukemia in Southern Ontario, Canada, and exposure to magnetic fields in residences. *International Journal of Cancer*, 1999, vol. 82, no. 2, pp. 161-170. doi: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0215\(19990719\)82:2<161::AID-IJC2>3.0.CO;2-X](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0215(19990719)82:2<161::AID-IJC2>3.0.CO;2-X).
17. Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric and Magnetic Fields (1 Hz to 100 kHz). *Health Physics*, 2010, vol. 99, no. 6, pp. 818-836. doi: <https://doi.org/10.1097/HP.0b013e3181f06c86>.
18. Sage C., Carpenter D.O. *BioInitiative Report: A Rationale for Biologically-based Exposure Standards for Low-Intensity Electromagnetic Radiation*. BioInitiative Working Group. 2012. 1479 p. Режим доступу: https://www.infrastructure.gov.au/sites/default/files/submissions/BioInitiative_Working_Group.pdf (Дата звернення: 01.02.2024).
19. World Health Organization. *Exposure limits for low-frequency fields (public). Data by country*. Режим доступу: <https://apps.who.int/gho/data/node.main.EMFLIMITSPUBLICLOW?lang=en> (Дата звернення: 01.02.2024).
20. 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>.
21. Kuznetsov B.I., Kutsenko A.S., Nikitina T.B., Bovdui I.V., Kolomiets V.V., Kobylanskyi B.B. Method for design of two-level system of active shielding of power frequency magnetic field based on a quasi-static model. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2024, no. 2, pp. 31-39. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2024.2.05>.
22. Rozov V.Y., Reutskiy S.Y., Kundius K.D. Protection of workers against the magnetic field of 330-750 kV overhead power lines when performing work without removing the voltage under load. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2024, no. 4, pp. 70-78. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2024.4.09>.
23. Rozov V.Y., Reutskiy S.Y., Pelevin D.Y., Kundius K.D. Approximate method for calculating the magnetic field of 330-750 kV high-voltage power line in maintenance area under voltage. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2022, no. 5, pp. 71-77. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2022.5.12>.
24. Rozov V.Y., Pelevin D.Y., Kundius K.D. Simulation of the magnetic field in residential buildings with built-in substations based on a two-phase multi-dipole model of a three-phase current conductor. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2023, no. 5, pp. 87-93. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2023.5.13>.
25. 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.
26. Розов В.Ю. К 40-летию Научно-технического центра магнетизма технических объектов НАН Украины. История, достижения, перспективы. *Технічна електродинаміка*, 2010, № 3, С. 74-80.
27. Баранов М.І., Розов В.Ю., Сокол Є.І. До 100-річчя Національної академії наук України – колись вітчизняної науки і техніки. *Електротехніка і Електромеханіка*, 2018, № 5, С. 3-11. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2018.5.01>.
28. Розов В.Ю., Гетьман А.В., Петров С.В. Магнетизм космических аппаратов. *Технічна електродинаміка. Тематичний випуск «Проблеми сучасної електротехніки»*, 2010, Ч. 2, С. 144-147.
29. Rozov V., Grinchenko V., Tkachenko O., Yerisov A. Analytical Calculation of Magnetic Field Shielding Factor for Cable Line with Two-Point Bonded Shields. *2018 IEEE 17th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET)*, 2018, pp. 358-361. doi: <https://doi.org/10.1109/MMET.2018.8460425>.
30. Думанський Ю.Д., Сердюк А.М., Лось І.П. Влияние электромагнитных излучений на человека. К: Здоровье, 1975. 180 с.
31. Сердюк А.М., Думанський В.Ю., Біткін С.В., Дідик Н.В., Думанський Ю.Д., Нікітіна Н.Г., Мізюк М.І., Безверха А.П., Зотов С.В., Томашевська Л.А., Семашко П.В., Ляшенко В.І., Галак С.С., Медведєв С.В. Гігієнічне обґрунтування вимог до розміщення та експлуатації кабельних ліній електропередачі та їх обладнання в умовах сучасної міської забудови. *Гігієна населених місць*, 2015, № 66, С. 20-29.
32. *Правила улаштування електроустановок*. Видання офіційне. Міненергвугілля України. Х.: Видавництво «Фор»», 2017. 760 с.
33. *SunTouch Heating Mat Kits*. Режим доступу: <https://www.flooringsupplyshop.com/category/suntouch-heating-mats-kits-119> (Дата звернення: 01.02.2024).
34. *Arnold Rak*. Режим доступу: www.rak-waermetechnik.de (Дата звернення: 01.02.2024).
35. *Hemstedt*. Режим доступу: <https://www.hemstedt.de> (Дата звернення: 01.02.2024).
36. *Handbook for Comfortable Warm Floors. nVent Raychem*. 2022. 48 p. Режим доступу: https://www.nvent.com/sites/default/files/acquidam_assets/2022-08/RAYCHEM-TH-EU1001-Floorheating-EN.pdf (Дата звернення: 01.02.2024).
37. *ELEKTRA Heating Cables. Installation manual*. 72 p. Режим доступу: https://elektra.pl/download/ru/electrical-heating-systems/floor-heating/heating-cables-VCD/vcd7_vcd10_vcd17_heating_cables_manual.pdf (Дата звернення: 01.02.2024).
38. *Woks. ПАТ «Одескабель»*. Режим доступу: <https://woks.ua/ua> (Дата звернення: 01.06.2024).
39. *Indoor Cable Floor Heating Systems. Application manual*. 2016. 52 p. Режим доступу:

<https://assets.danfoss.com/documents/89845/AB213486470188en-010101.pdf> (Дата звернення: 01.02.2024).

40. VOLTERM Coaxial Heating system. Режим доступу: <https://volterm.com.ua> (Дата звернення: 01.02.2024).

41. 3HeatTech. Radiant Floor Heating Cable. Режим доступу: <https://www.heattechproducts.com/electric-radiant-floor-heating-cable-kits> (Дата звернення: 01.02.2024).

42. Амбарцумянц К. *Нагревательные кабели: конструкция и применение*. Режим доступу: <https://aw-therm.com.ua/hagrevatelnye-kabeli-konstrukciya-i-primeneniye/>. (Дата звернення: 01.06.2024).

43. 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*, 2022, № 3-6, С. 32-36. Режим доступу: <https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2022/EP/Promelektro-3-6-2022.pdf> (Дата звернення: 01.06.2024).

44. Thieblemont H., Haghighat F., Moreau A. Thermal Energy Storage for Building Load Management: Application to Electrically Heated Floor. *Applied Sciences*, 2016, vol. 6, no. 7, art. no. 194. doi: <https://doi.org/10.3390/app6070194>.

45. Gołębiowski J., Forenc J. The influence of side thermal insulation on distribution of the temperature field in an electrical floor heater. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2016, no. 12, pp. 271-277. doi: <https://doi.org/10.15199/48.2016.12.68>.

46. Стреттон Дж.А. *Теория электромагнетизма*. М.: Гостехиздат, 1948. 520 с.

47. Smythe W.R. *Static and Dynamic Electricity*. McGraw-Hill, New York, 1968. 623 p.

48. Кессаев О.Г. Вплив на параметри передачі ексцентриситету та еліптичності коаксіальних радіочастотних кабелів. *Вісник НТУ «ХПИ»*. Серія: *Енергетика: надійність та енергоефективність*, 2013, № 59, С. 62-69.

49. Безпрозванних Г.В., Бойко А.М., Кессаев О.Г. Вплив конструктивних та технологічних неоднорідностей на хвильовий опір коаксіальних радіочастотних кабелів. *Електротехніка і Електромеханіка*, 2013, № 2, С. 57-61.

50. Dwight H.V. *Tables of Integrals and Other Mathematical Data*. 4th ed. The Macmillan Company, 1972. 336 p.

51. Del Pino López J.C., Cruz Romero P., Dular P. Parametric analysis of magnetic field mitigation shielding for underground power cables. *Renewable Energy and Power Quality Journal*, 2007, vol. 1, no. 5, pp. 519-526. doi: <https://doi.org/10.24084/repqj05.326>.

REFERENCES

1. Brune D., Hellborg R., Persson B.R.R., Pääkkönen R. Radiation at home, outdoors and in the workplace. *Scandinavian Science Publisher*, 2001, 547 p.

2. *Non-Ionizing Radiation, Part 1: Static and Extremely Low-Frequency (ELF) Electric and Magnetic Fields*. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 2002, no. 80, p. 395.

3. *Standard of Building Biology Testing Methods: SBM-2015*. Germany: Institut für Baubiologie + Ekologie IBN, 2015, 5 p. Available at: <https://buildingbiology.com/building-biology-standard> (Accessed 01 February 2024).

4. Milutinov M., Juhas A., Pekarić-Nad N. Magnetic field of electrical radiant heating system. *Safety Engineering*, 2017, vol. 7, no. 2, pp. 61-65. doi: <https://doi.org/10.7562/SE2017.7.02.03>.

5. *DBN V.2.5-24:2012. State building regulations of Ukraine. Electrical cable scorching system*. Kyiv, Minrehionbud Publ., 2012. 81 p. (Ukr).

6. *SOU-N EE 20.179:2008. Calculation of electric and magnetic fields of power lines. Methodology (with changes) (in the edition of the order of the Minenergvugillya dated July 1, 2016, no. 423)*. Kyiv, Minenergvugillya Ukraine Publ., 2016. 37 p. (Ukr).

7. Conti R., Giorgi A., Rendina R., Sartore L., Sena E.A. Technical solutions to reduce 50 hz magnetic fields from power lines. *2003 IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings*, 2003, vol. 2, pp. 1016-1021. doi: <https://doi.org/10.1109/PTC.2003.1304685>.

8. *SOU-N MEV 40.1-37471933-49:2011. Design of cable lines up to 330 kV. Guideline (in the edition of the order of the Minenergvugillya dated January 26, 2017 no. 82)*. Kyiv, Minenergvugillya Ukraine Publ., 2017. 168 p. (Ukr).

9. Nesterenko A.D. *Introduction to Theoretical Electrical Engineering*. Kyiv, Naukova Dumka Publ., 1969. 351 p. (Rus).

10. Shimonі K. *Theoretical Electrical Engineering (translation from German)*. Moscow, Mir Publ., 1964. 774 p. (Rus).

11. *DSNiP 3.3.6.096-2002. State sanitary standards and rules for working with sources of electromagnetic fields (order of the Ministry of Health (MoH) of Ukraine dated December 18, 2002 no. 476)*. Kyiv, MoH Publ., 2003. 16 p. (Ukr).

12. 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> (Accessed 01 February 2024).

13. Tognola G., Chiaramello E., Bonato M., Magne I., Souques M., Fiocchi S., Parazzini M., Ravazzani P. Cluster Analysis of Residential Personal Exposure to ELF Magnetic Field in Children: Effect of Environmental Variables. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, vol. 16, no. 22, art. no. 4363. doi: <https://doi.org/10.3390/ijerph16224363>.

14. Wertheimer N., Leeper E. Electrical wiring configurations and childhood cancer. *American Journal of Epidemiology*, 1979, vol. 109, no. 3, pp. 273-284. doi: <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aje.a112681>.

15. Kheifets L., Ahlbom A., Crespi C.M., Draper G., Hagihara J., Lowenthal R.M., Mezei G., Oksuzyan S., Schüz J., Swanson J., Tittarelli A., Vinceti M., Wunsch Filho V. Pooled analysis of recent studies on magnetic fields and childhood leukaemia. *British Journal of Cancer*, 2010, vol. 103, no. 7, pp. 1128-1135. doi: <https://doi.org/10.1038/sj.bjc.6605838>.

16. Green L.M., Miller A.B., Villeneuve P.J., Agnew D.A., Greenberg M.L., Li J., Donnelly K.E. A case-control study of childhood leukemia in Southern Ontario, Canada, and exposure to magnetic fields in residences. *International Journal of Cancer*, 1999, vol. 82, no. 2, pp. 161-170. doi: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0215\(19990719\)82:2<161::AID-IJC2>3.0.CO;2-X](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0215(19990719)82:2<161::AID-IJC2>3.0.CO;2-X).

17. Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric and Magnetic Fields (1 Hz to 100 kHz). *Health Physics*, 2010, vol. 99, no. 6, pp. 818-836. doi: <https://doi.org/10.1097/HP.0b013e3181f06c86>.

18. Sage C., Carpenter D.O. *BioInitiative Report: A Rationale for Biologically-based Exposure Standards for Low-Intensity Electromagnetic Radiation*. BioInitiative Working Group, 2012. 1479 p. Available at: https://www.infrastructure.gov.au/sites/default/files/submissions/BioInitiative_Working_Group.pdf (Accessed 01 February 2024).

19. World Health Organization. *Exposure limits for low-frequency fields (public). Data by country*. Available at: <https://apps.who.int/gho/data/node.main.EMFLIMITSPUBLICLOW?lang=en> (Accessed 01 February 2024).

20. 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>.

21. Kuznetsov B.I., Kutsenko A.S., Nikitina T.B., Bovdii I.V., Kolomiets V.V., Kobylanskyi B.B. Method for design of two-level system of active shielding of power frequency magnetic field based on a quasi-static model. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2024, no. 2, pp. 31-39. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2024.2.05>.

22. Rozov V.Y., Reutskiy S.Y., Kundius K.D. Protection of workers against the magnetic field of 330-750 kV overhead power lines when performing work without removing the voltage under load. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2024, no. 4, pp. 70-78. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2024.4.09>.

23. Rozov V.Y., Reutskiy S.Y., Pelevin D.Y., Kundius K.D. Approximate method for calculating the magnetic field of 330-750 kV high-voltage power line in maintenance area under voltage. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2022, no. 5, pp. 71-77. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2022.5.12>.

24. Rozov V.Y., Pelevin D.Y., Kundius K.D. Simulation of the magnetic field in residential buildings with built-in substations based on a two-phase multi-dipole model of a three-phase current conductor. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2023, no. 5, pp. 87-93. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2023.5.13>.

25. 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).

26. Rozov V.Yu. To the 40th anniversary of the Science and Technology Center of Magnetism of Technical Objects of the NAS of Ukraine. *Technical Electrodynamics*, 2010, no. 3, pp. 74-80. (Rus).

27. 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>.
28. Rozov V.Yu., Getman A.V., Petrov S.V. Magnetism of space-craft. *Technical Electrodynamics. Thematic Issue «Problems of Modern Electrical Engineering»*, 2010, chapter 2, pp. 144-147. (Rus).
29. Rozov V., Grinchenko V., Tkachenko O., Yerisov A. Analytical Calculation of Magnetic Field Shielding Factor for Cable Line with Two-Point Bonded Shields. *2018 IEEE 17th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET)*, 2018, pp. 358-361. doi: <https://doi.org/10.1109/MMET.2018.8460425>.
30. Dumanskiy V.Yu., Serdyuk A.M., Los' I.P. *The influence of electromagnetic radiation on humans*. Kyiv, Zdorovye Publ., 1975. 180 p. (Rus).
31. Dumanskiy V., Bitkin S., Didyk N., Dumanskiy Yu., Nikitina N., Mizyuk M., Bezverkha A., Zotov S., Tomashevskaya L., Semashko P., Lyashenko V., Galak S., Medvedev S. Hygienical ground of requirements to placing and exploitation of cable busses of electricity transmission and their equipment in the conditions of modern municipal building. *Hygiene of populated places*, 2015, no. 66, pp. 20-29. (Ukr).
32. *Electrical installation regulations*. Kharkiv, Fort Publ., 2017. 760 p. (Ukr).
33. *SunTouch Heating Mat Kits*. Available at: <https://www.flooringsupplyshop.com/category/suntouch-heating-mats-kits-119> (Accessed 01 February 2024).
34. *Arnold Rak*. Available at: www.rak-waermetchnik.de (Accessed 01 February 2024).
35. *Hemstedt*. Available at: <https://www.hemstedt.de> (Accessed 01 February 2024).
36. *Handbook for Comfortable Warm Floors*. nVent Raychem. 2022. 48 p. Available at: https://www.nvent.com/sites/default/files/acquiadam_assets/2022-08/RAYCHEM-TH-EU1001-Floorheating-EN.pdf (Accessed 01 February 2024).
37. *ELEKTRA Heating Cables. Installation manual*. 72 p. Available at: https://elektra.pl/download/ru/electrical-heating-systems/floor-heating/heating-cables-VCD/vcd7_vcd10_vcd17_heating_cables_manual.pdf (Accessed 01 February 2024).
38. *Woks. PJSC «Odeskabel»*. Available at: <https://woks.ua/ua> (Accessed 01 February 2024).
39. *Indoor Cable Floor Heating Systems. Application manual*. 2016. 52 p. Available at: <https://assets.danfoss.com/documents/89845/AB213486470188en-010101.pdf> (Accessed 01 February 2024).
40. *VOLTERM Coaxial Heating system*. Available at: <https://volterm.com.ua> (Accessed 01 February 2024).
41. *3HeatTech. Radiant Floor Heating Cable*. Available at: <https://www.heattechproducts.com/electric-radiant-floor-heating-cable-kits> (Accessed 01 February 2024).
42. Ambartsumyants K. Heating cables: construction and applications. (Rus). Available at: <https://aw-therm.com.ua/nagrevatelnye-kabeli-konstrukciya-i-primeneniye> (Accessed 01 June 2024).
43. 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, no. 3-6, pp. 32-36. (Ukr). Available at: <https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2022/EP/Promelektro-3-6-2022.pdf> (Accessed 01 February 2024).
44. Thieblemont H., Haghighat F., Moreau A. Thermal Energy Storage for Building Load Management: Application to Electrically Heated Floor. *Applied Sciences*, 2016, vol. 6, no. 7, art. no. 194. doi: <https://doi.org/10.3390/app6070194>.
45. Gołębowski J., Forenc J. The influence of side thermal insulation on distribution of the temperature field in an electrical floor heater. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2016, no. 12, pp. 271-277. doi: <https://doi.org/10.15199/48.2016.12.68>.
46. Stratton J.A. *The Theory of Electromagnetism*. Moscow, Gostehizdat Publ., 1948. 520 p. (Rus).
47. Smythe W.R. *Static and Dynamic Electricity*. McGraw-Hill, New York, 1968. 623 p.
48. Kyessayev A.G. Impact on the transmission parameters eccentricity and ellipticity RF coaxial cables. *Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series: Energy: Reliability and Energy Efficiency*, 2013, no. 59, pp. 62-69. (Ukr).
49. Bezprozvannykh G.V., Boyko A.M., Kessaev O.G. Influence of constructive and technological defects on coaxial radio-frequency cable impedance. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2013, no. 2, pp. 57-61. (Ukr).
50. Dwight H.B. *Tables of Integrals and Other Mathematical Data*. 4th ed. The Macmillan Company, 1972. 336 p.
51. Del Pino López J.C., Cruz Romero P., Dular P. Parametric analysis of magnetic field mitigation shielding for underground power cables. *Renewable Energy and Power Quality Journal*, 2007, vol. 1, no. 5, pp. 519-526. doi: <https://doi.org/10.24084/repqj05.326>.

Надійшла (Received) 27.03.2024
 Прийнята (Accepted) 22.05.2024
 Опублікована (Published) 20.08.2024

Розов Володимир Юрійович¹, д.т.н., проф., чл.-кор. НАНУ,
 Реуцький Сергій Юрійович¹, к.т.н., с.н.с.,
 Пелевін Дмитро Євгенович¹, к.т.н., ст. досл.,
 Кундіус Катерина Дмитрівна¹, доктор філософії,
¹ Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного
 НАН України,
 61046, Харків, вул. Пожарського, 2/10,
 e-mail: vyurozov@gmail.com (Corresponding Author);
 sergiyruetskiy@gmail.com; pelevindmitro@ukr.net;
 kundiuickateryna@ukr.net

V.Yu. Rozov¹, S.Yu. Reutskiy¹, D.Ye. Pelevin¹, K.D. Kundius¹
¹ Anatolii Pidhornyi Institute of Mechanical Engineering
 Problems of the National Academy of Sciences of Ukraine,
 2/10, Pozharskogo Str., Kharkiv, 61046, Ukraine.

Magnetic field of electrical heating cable systems of the floors for residential premises.

Problem. In order to effectively protect public health from the magnetic field of electric heating cable systems of the floors, it is necessary to reduce it to a safe level. However, this requires careful study of the magnetic field. **The purpose** of the work is to develop a mathematical model and a verified methodology for calculating the magnetic field of electric heating cable systems of the floors in residential premises, and assessment of compliance of the magnetic field with the normative level. **Method.** A methodology for calculating the magnetic field of electric heating cable systems of the floors in residential premises has been developed. **Scientific novelty.** Based on Bio-Savar's law and the principle of superposition, an analytical model of the magnetic field of electric heating cable systems of the floors and its calculation method was created. The magnetic field of the coaxial heating cable is determined, taking into account the value of its maximum eccentricity. The experimentally substantiated correctness of the obtained theoretical statements, which is confirmed by their coincidence with the results of the experiment with a spread of less than 7%. **Practical significance.** A verified methodology for calculating the magnetic field of electric heating cable systems of the floors was proposed and an assessment of compliance of their magnetic flux density with the normative level of 0.5 μT was performed. It is recommended to lay modern two-wire heating cables at a depth of at least 75–100 mm from the floor. With a smaller laying depth, it is recommended to use coaxial heating cables, which have an order of magnitude smaller magnetic field. References 51, tables 1, figures 11.

Key words: electric heating cable systems of the floors, magnetic field, modeling and measurement, assessment of compliance with the normative level.

How to cite this article:

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>