

УДК 621.3.013

РОЗРАХУНКОВО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КОМБІНОВАНОГО ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ЕКРАНУВАННЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ

І. В. Бовдуй,

канд. техн. наук

ibovduj@gmail.com

ORCID: 0000-0003-3508-9781

Інститут енергетичних машин і систем

ім. А. М. Підгорного

НАН України,

61046, Україна, м. Харків,

вул. Комунальників, 2/10

Для підвищення ефективності зниження магнітного поля промислової частоти, створюваного повітряними лініями електропередачі в житлових будинках, проведено експериментальні дослідження за результатами 3D моделювання при застосуванні комбінованого електромагнітного екрану, який складається з активної та пасивної частин. Задача проектування комбінованого електромагнітного екрану, який складається з робастної системи активного екранування та електромагнітного пасивного екрану, вирішується на основі багатокритеріальної антагоністичної гри двох гравців. Вектор виграшів гри розраховується з використанням системи кінцево-елементних обчислень COMSOL Multiphysics, а розв'язання гри – з застосуванням алгоритмів оптимізації мультироїв частинок. При проектуванні комбінованих електромагнітних екранів розраховуються координати просторового розташування екрануючої обмотки, струми і фази в екрануючих обмотках робастної системи активного екранування, а також геометричні розміри і товщина електромагнітного пасивного екрану. Наведено результати експериментальних досліджень ефективності екранування магнітного поля з використанням 3D моделювання для житлового будинку та лінії електропередачі, при застосуванні комбінованого електромагнітного екранування, з активною й пасивною частинами. Вперше, з метою підвищення ефективності комбінованого електромагнітного екрану, який складається з активної та пасивної частин, та призначений для зниження магнітного поля промислової частоти, створюваного повітряними лініями електропередачі в житлових будинках, проведено експериментальні дослідження з використанням 3D моделювання. За результатами експериментальних досліджень, визначено ефективність екранування вихідного магнітного поля, встановлено, що коефіцієнт екранування електромагнітного пасивного екрана дорівнює більше двох одиниць, а ефективність системи з активним екраном – більше чотирьох одиниць, а для системи з комбінованим електромагнітним пасивним і активним екраном становить понад 10 одиниць. Доведена можливість зниження рівня індукції магнітного поля в житловому будинку від ліній електропередачі при використанні комбінованого електромагнітного пасивного й активного екранування до безпечного для населення рівня.

Ключові слова: повітряна лінія електропередачі, магнітне поле, 3D моделювання комбінованого електромагнітного пасивного та активного екранування, експериментальні дослідження.

Вступ

Тривала дія достатньо слабких рівнів магнітного поля (МП) промислової частоти на населення, особливо на тих, хто проживає в житлових будинках поблизу ліній електропередачі, призводить до підвищення рівня онкологічних захворювань [1–5]. З огляду на це, пошук методів і засобів нормалізації рівня електромагнітного поля в наявних житлових будинках поблизу ліній електропередачі, без проведення виселення населення та виводу з експлуатації існуючих електричних мереж, визначає економічну й соціальну доцільність таких досліджень. В зв'язку з цим, в світовій практиці інтенсивно розробляються методи зниження рівня МП в наявних житлових будинках зазначеного типу до безпечного для мешканців рівня МП [6–8].

В роботі [9] розглянуто питання синтезу систем комбінованого екранування магнітного поля в двовірній постановці. При такому підході передбачається розгляд ефективності екранування в центральному перетині житлових будинків. Проте, як з'ясувалося при подальших дослідженнях, при екрануванні магнітного поля необхідно зменшувати рівень індукції МП до безпечного рівня за всією протяжністю житлового будинку. Це зумовлює доцільність постановки та розв'язання задачі синтезу комбінованих екранів в тривимірній постановці.

Статтю ліцензовано на умовах Ліцензії Creative Commons «Attribution» («Атрибуція») 4.0 Міжнародна.

© І. В. Бовдуй, 2025

Метою роботи є експериментальне дослідження ефективності комбінованого електромагнітного екранування, яке включає екранування МП системами активного екранування та суцільними пасивними екранами, з метою зменшення рівня МП, яке генерується лініями електропередачі в житлових будинках.

Постановка проблеми

Розглянемо геометричну пряму проблему квазімагнітостатики магнітного поля промислової частоти, що полягає в обчисленні магнітного поля в будь-якій точці простору для заданих його джерел [10–11].

Теоретичною основою розрахунку магнітного поля, що генерується лініями електропередачі в однорідному середовищі, виступає так зване квазістатичне наближення системи рівнянь Максвелла

$$\operatorname{rot} H = j; \quad \operatorname{div} B = 0; \quad B = \mu_0 H,$$

де H і B – вектори напруженості й індукції магнітного поля; j – вектор щільності стороннього струму, що задається зовнішніми джерелами і відмінний від нуля тільки в обмеженій області, зайнятій провідниками.

При цьому передбачається, що даний простір, в якому необхідно екранувати вихідне магнітне поле за допомогою системи активного екранування, вільний від струмопровідних і феромагнітних середовищ і не містить джерел магнітного поля. Будинки і споруди майже не екранують магнітного поля промислової частоти.

Виходячи з цього, розглядаючи область поза провідниками із струмом, можна прийняти, що щільність струму дорівнює нулю ($\operatorname{rot} H = 0$) і, таким чином, поле потенційне

$$H = -\operatorname{grad} U_m; \quad H_x = -\frac{\partial U_m}{\partial x}; \quad H_y = -\frac{\partial U_m}{\partial y}; \quad H_z = -\frac{\partial U_m}{\partial z},$$

де U_m – скалярний магнітний потенціал.

Часто для спрощення математичної моделі високовольтних ліній електропередачі струмопроводи фаз приймають у формі нескінченних довгих і тонких прямолінійних провідників, що дозволяє використовувати двовірну модель магнітного поля, яка містить два просторові компоненти уздовж вісей OX , OY і не залежну від координати Z , уздовж якої розташовані провідники ЛЕП.

Однак у даному випадку вертикальні ділянки керованих обмоток системи активного екранування створюють істотні проекції вектора напруженості магнітного поля по координаті Z , що викликає необхідність застосовувати тривимірну модель магнітного поля, яка, крім того, дозволяє також врахувати складову вектора напруженості магнітного поля по координаті OZ , що створюється проводами ЛЕП через їх провисання між опорами ЛЕП.

При розрахунку магнітного поля для струмів квазістатичне наближення системи рівнянь Максвелла еквівалентне закону Біо-Савара, який може бути записаний у вигляді [10]

$$B(P) = \frac{\mu_0 I_m}{4\pi} \int_L \frac{[dl \times R]}{R^3},$$

де $B(P)$ – індукція МП у точці спостереження P ; dl – елемент контуру L зі струмом I_m ; R – вектор, направлений від елементу контуру dl у точку спостереження P .

Куб модуля вектора R дорівнює

$$R = \sqrt{x_p^2 + y_p^2 + z^2}; \quad R^3 = (x_p^2 + y_p^2 + z^2)^{3/2}.$$

Розглянемо підхід до побудови математичної моделі магнітного поля в заданому просторі, заснований на представленні струмопроводів ЛЕП, а також обмоток магнітних компенсуючих органів у вигляді набору елементарних ділянок струмопроводів. Такий підхід дозволяє розраховувати магнітне поле струмопроводів майже будь-якої форми, відмінної від ідеальних прямих ліній, прямокутників і т.д., а також взяти до уваги провисання струмопроводів ліній електропередачі ЛЕП.

Зупинимося на одному з підходів побудови такої математичної моделі магнітного поля, яке генерує струмопровід із струмом I достатньо складної конструкції, на основі закону Біо-Савара-Лапласа.

Представимо розглянутий струмопровід у вигляді елементарних відрізків достатньо малої довжини. Позначимо координати середини відрізка як C_i . Встановимо вектор B індукції магнітного поля в точці P з координатами (x, y, z) , який був генерований цим елементарним відрізком, розташова-

ним у точці C_i . Представимо елементарний відрізок струмопроводу з врахуванням напрямку струму і розташування самого відрізка в ортогональній системі координат у вигляді ортів a_x, a_y, a_z .

Визначимо компоненти розкладання вектора елементарного відрізка струмопроводу в ортогональній системі координат як різницю координат кінця і початку даного відрізка в наступному вигляді:

$$(x_{i+1} - x_i), (y_{i+1} - y_i), (z_{i+1} - z_i),$$

а вектора ΔL_i – як різницю координат кінця і початку даного відрізка в такому вигляді:

$$\Delta L_i = (x_{i+1} - x_i)a_x + (y_{i+1} - y_i)a_y + (z_{i+1} - z_i)a_z.$$

Введемо вектор R_i , початок якого знаходиться в центрі даного елементарного відрізка струмопроводу, а кінець – у точці $P(x, y, z)$, в якій необхідно визначити вектор індукції магнітного поля, що створюється елементарним відрізком струмопроводу, у вигляді

$$R_i = P - C_i = (x, y, z) - \left(\frac{x_{i+1} + x_i}{2}, \frac{y_{i+1} + y_i}{2}, \frac{z_{i+1} + z_i}{2} \right).$$

Тоді вектор $B(x, y, z)$ сумарної індукції магнітного поля в даній точці $P(x, y, z)$, генерований n елементарними відрізками струмопроводу із струмом I , може бути визначений на підставі закону Біо-Савара-Лапласа у вигляді [10]

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \sum_{i=1}^n \frac{\Delta L_i \times R_i}{|R_i|^3}, \quad (1)$$

де μ_0 – магнітна постійна.

Векторний добуток векторів $\Delta L_i \times R_i$ дорівнює вектору з наступними компонентами

$$\Delta L_i \times R_i = (\Delta L_{iy} R_{iz} - \Delta L_{iz} R_{iy}), (\Delta L_{iz} R_{ix} - \Delta L_{ix} R_{iz}), (\Delta L_{ix} R_{iy} - \Delta L_{iy} R_{ix}).$$

Тут введені позначення ΔL_{ix} і R_{ix} і компоненти розкладання векторів ΔL_i і R_i за віссю OX , аналогічно за осями OY і OZ . Куб модуля вектора R_i позначимо як $|R_i|^3$, він визначається виразом

$$|R_i|^3 = \left(\sqrt{R_{ix}^2 + R_{iy}^2 + R_{iz}^2} \right)^3. \quad (2)$$

Розглянемо розв'язання геометричної прямої проблеми для проводів ЛЕП – з побудови математичної моделі вихідного магнітного поля, що генерується лінією електропередачі. Положення проводів ЛЕП відоме. Задаємо струми в проводах ЛЕП у вигляді синусоїдальних залежностей миттєвих значень залежно від часу, а також амплітуди A_i і фази C_i струмів промислової частоти ω проводів ЛЕП і струми проводів в лініях електропередачі в комплексній формі

$$I_i(t) = A_i \exp j(\omega t + \varphi_i).$$

На підставі отриманого співвідношення (2) може бути обчислена індукція $B_0(P_i, I_0(t), t)$ вихідного магнітного поля в точці P_i , що створюється струмами $I_l(t)$ у струмопроводах l ЛЕП, за такою формулою:

$$B_0(P_i, I_0(t), t) = \sum_{l=1}^L B_{0l}(P_i, I_l(t)). \quad (3)$$

Введено вектор $I_0(t)$ струмів ЛЕП, компонентами якого є струми $I_l(t)$ в струмопроводах l ЛЕП,

$$I_0(t) = \{I_l(t)\}.$$

Зауважимо, що при обчисленні результуючого магнітного поля ЛЕП за формулою (3), для 3D моделювання необхідно взяти до уваги реальне провисання проводів ЛЕП. При цьому кількість елементарних ділянок провідників ЛЕП на кінцях ділянок проводів, що враховуються, треба встановити з необхідною точністю обчислення індукції результуючого магнітного поля, що генерується всіма проводами ЛЕП у даній точці простору екранування.

Розглянемо розв'язання форвард проблеми для обчислення магнітного поля, що генерується компенсаційними обмотками в точках простору екранування. Задаємо поки що невідомі координати розташування компенсаційних обмоток системи активного екранування у вигляді вектора X_a вихідних

геометричних значень розмірів компенсуючих обмоток активного захисту, а також амплітуди A_{ai} і фази струмів φ_{ai} в компенсуючих обмотках [10]. Струми в проводах компенсуючих обмоток знаходимо на основі комплексної форми

$$I_{ai}(t) = A_{ai} \exp j(\omega t + \varphi_{wi}).$$

Тоді для заданої точки $P(x, y, z)$ простору екранування, спираючись на закон Біо-Савара, може бути обчислене елементарне значення індукції магнітного поля, що генерується в заданій точці простору елементарною ділянкою dl проводу компенсаційної обмотки на підставі (1). Аналогічно, за (3), може бути обчислена індукція $B_y(P_i, I_y(t), t)$ магнітного поля в точці P_i , що створюється струмами обмоток магнітних компенсуючих органів у точці в момент часу t , за наступною формулою:

$$B_y(P_i, I_y(t), t) = \sum_{m=1}^M B_{ym}(P_i, I_{ym}(t), t), \quad (4)$$

тут введено вектор $I_y(t)$ струмів у компенсуючих обмотках, компонентами якого є струми $I_l(t)$ в m обмотках

$$I_y(t) = \{I_{ym}(t)\}.$$

Відмітимо, що при обчисленні результуючого магнітного поля, що генерується всіма проводами компенсуючих обмоток, по формулі (4) при 3D моделюванні необхідно враховувати не тільки реальні розміри горизонтальних частин компенсуючих обмоток, але й дійсну довжину компенсуючих обмоток, оскільки саме поблизу кінців горизонтальних ділянок компенсуючих обмоток спостерігається найбільша зміна рівня індукції магнітного поля, що генерується компенсаційними обмотками. Природно, що при 3D моделюванні в формулі (4) слід брати до уваги вертикальні частини компенсуючих обмоток, бо саме вони генерують основну частку індукції магнітного поля.

Тоді, за принципом суперпозиції, результуючий вектор $B(P_i, I_0(t), X_a, t)$ індукції магнітного поля в точці P_i , що генерується струмами $I_0(t)$ проводів ЛЕП $B_0(P_i, I_0(t), t)$ і компенсуючими струмами обмоток $B_y(P_i, X_a, t)$, дорівнює сумі векторів

$$B(P_i, I_0(t), X_a, t) = B_0(P_i, I_0(t), t) + B_y(P_i, X_a, t). \quad (5)$$

Розглянемо розв'язання форвард проблеми для суцільного незамкненого пасивного екрану. При цьому миттєві значення вектора $B(P_i, I_0(t), X_a, t)$ магнітної індукції результуючого магнітного поля, що генерується лініями електропередачі $B_0(P_i, I_0(t), t)$ і обмотками системи активного екранування $B_y(P_i, X_a, t)$ у будь-якій точці простору екранування, вважаються заданим і обчислюються за формулою (5).

Зупинимося на обчисленні магнітного поля в середовищі, в якому розташовані струмопроводи ЛЕП, компенсаційні обмотки і суцільні електромагнітні екрани пасивного екранування. При цьому вважаємо, що середовище, в якому знаходяться струмопроводи і електромагнітний екран, не містить феромагнітних і провідних елементів, а отже, відносну магнітну проникність зовнішнього середовища покладемо рівною одиниці, а питому провідність – рівною нулю.

Вивчатимемо сталі процеси, коли струми в проводах описуються залежностями для сигналів синусоїдальною форми. Отже, розподіл електромагнітного поля в системі можна описувати в термінах комплексних амплітуд. Обчислення магнітної індукції виконувалося в квазістаціонарному наближенні, оскільки частота електричних струмів, що протікають по струмопроводах, дорівнює промисловій. Діаметр струмопроводів ЛЕП і компенсуючих обмоток набагато менший за відстань між ними, тому можна розглядати їх як «струмові нитки». Розподіл щільності струму, який протікає за струмопроводами, представлятимемо в вигляді суми дельта-функцій. Таким чином, сформульовано й обґрунтовано припущення, які прийняті при побудові фізично коректної моделі процесу електромагнітного екранування магнітного поля протяжних струмопроводів.

З врахуванням прийнятих припущень для знаходження розподілу МП, скористаємося законом повного струму в інтегральній формі, записаному в квазістаціонарному наближенні в термінах комплексних амплітуд [6]

$$\oint_l H dl = \int_S \gamma E ds + \int_S J^{ext} ds$$

де H , E – комплексні амплітуди векторів, відповідно, напруженості магнітного і електричного полів; J^{ext} – комплексна амплітуда вектора щільності струму струмопроводів; γ – питома електропровідність; l – контур, що охоплює поверхню інтеграції S .

Щоб описати електромагнітний екран, необхідно задати його розташування відносно струмопроводів, геометричні розміри, магнітну проникність μ і питому електропровідність γ . Система струмів струмопроводів описується частотою ω і вектором розподілу щільності струму J^{ext} .

Розглянемо числові методи розрахунку магнітного поля, що використовуються для розрахунку електромагнітних екранів. Найбільшого поширення при чисельному дослідженні електромагнітного поля, зокрема, і квазістационарного магнітного поля, отримали метод кінцевих різниць, або метод сіток, варіаційні методи, метод кінцевих елементів і метод інтегральних рівнянь [12–15]. Процедура обчислення магнітного поля зводиться до складання і розв'язання системи лінійних рівнянь. Спосіб складання цієї системи, вигляд і розмірність матриць її коефіцієнтів для перерахованих чисельних методів досить різні.

Метод скінченних різниць заснований на чисельному розв'язанні диференціального рівняння, наприклад, рівняння в простому випадку, шляхом заміни тих похідних невідомої функції, що входять в нього, виразами, які містять кінцеві різниці. Зараз, для чисельного розв'язання найбільшого поширення набув метод скінченних елементів. При цьому розрахункова область розбивається на безліч багатокутників, що мають довільний вигляд, а саме криволінійних у загальному випадку, або трикутні осередки в простому. Значення функції в вузлах сітки є вихідними, а в решті точок вводиться апроксимація деякою функцією.

На першому етапі вводяться вихідні параметри системи: геометричні розміри електромагнітного екрану, його фізичні характеристики μ і γ , величина і частота струмів у струмопроводах. Далі задається область, в якій необхідно обчислювати розподіл МП.

Виходячи з цього, за допомогою пакета програм COMSOL Multiphysics може бути розрахований вектор $B_p(P_i, X_p, t)$ миттєвого значення магнітного поля, яке генерується пасивним екраном, для заданого вектора миттєвого значення індукції вихідного магнітного поля $B(P_i, I_0(t), X_a, t)$, яке генерується проводами лінії електропередачі $B_0(P_i, I_0(t), t)$ і компенсуючими обмотками $B_y(P_i, X_a, t)$ системи активного екранування.

Така математична модель дозволяє обчислювати розподіл магнітної індукції струмопроводів при використанні тонкостінних електромагнітних екранів, що складаються з декількох плоских або U-подібних елементів, і визначати їх екрануючі властивості.

За допомогою пакета програм COMSOL Multiphysics для заданого вектору X_a значень геометричних розмірів компенсаційних обмоток, а також струмів A_{wi} і фаз φ_{wi} в компенсаційних обмотках, заданого вектора X_p геометричних розмірів, товщини і матеріалу пасивного контурного екрану, можна обчислити вектор миттєвого значення індукції вихідного магнітного поля $B_R(P_i, X, \delta, t)$, яке генерується проводами лінії електропередачі $B_0(P_i, I_0(t), t)$, та компенсуючими обмотками $B_y(P_i, X_a, t)$ системи активного екранування, а також пасивним екраном $B_p(P_i, X_p, t)$, за формулою

$$B_R(P_i, I_0(t), X_a, X_p, t) = B_0(P_i, I_0(t), t) + B_y(P_i, X_a, t) + B_p(P_i, X_p, t).$$

Метод розв'язання

Розглянемо геометричну обернену задачу магнітостатики, яка полягає в обчисленні просторового розташування і параметрів джерел магнітного поля для генерування компенсуючого магнітного поля, спрямованого протилежно вихідному магнітному полю, із метою проєктування комбінованого електромагнітного екрану. При цьому вихідне магнітне поле генерується проводами ЛЕП, а компенсуюче магнітне поле – одночасно компенсаційними обмотками системи активного екранування і суцільним пасивним екраном.

Введемо вектор параметрів пошуку X , як задачу проєктування комбінованого екрану, компонентами якого є вектор X_a значень геометричних розмірів компенсаційних обмоток, струми A_{wi} і фази φ_{wi} в компенсаційних обмотках, а також вектор X_p геометричних розмірів, товщини і матеріалу паси-

вного контурного екрана [9]. Спираючись на це, задача проєктування комбінованого екрана для заданих вихідних значень вектора пошуку параметрів X і вектора параметрів невизначеності δ розраховується як значення $B_R(P_i, X, \delta)$ ефективної величини миттєвого значення індукції $B_R(P_i, X, \delta, t)$ результуючого магнітного поля в точці P_i простору для екранування з використанням системи розрахунків кінцевих елементів COMSOL Multiphysics, а задача проєктування пасивного екрана зводиться до обчислення розв'язку векторної «гри» [16–17]

$$B_R(X, \delta) = \langle B_R(X, \delta, P_i) \rangle. \quad (6)$$

Компонентами вектора $B_R(X, \delta, P_i)$, тобто «виграшу гри», є ефективні значення індукції результуючого магнітного поля у всіх точках P_i простору для екранування. До того ж у даній векторній «грі» необхідно знайти мінімум вектора «виграшу гри» (6) за вектором X , а його максимум – за вектором δ .

При цьому необхідно враховувати обмеження [12–15] на вектор параметрів пошуку X комбінованого екрана у вигляді векторної нерівності і, можливо, векторної рівності.

Відмітимо, що компоненти векторної «гри» (6) є нелінійними функціями вектора параметрів для пошуку і розраховуються на основі системи кінцевих елементів COMSOL Multiphysics [12–15].

Розглянемо метод розв'язання сформульованої задачі. Вкажемо, що для коректного розв'язання задачі багатокритеріальної оптимізації із Парето-оптимальних розв'язків, крім векторного критерію оптимізації (6) і обмежень, необхідно також мати інформацію про бінарні співвідношення переваг локальних розв'язків одне до одного [18]

$$\max_{i=1,m} \min_X \max_{\delta} B_R(P_i, X_j^*, \delta_j^*) < \max_{i=1,m} \min_X \max_{\delta} B(P_i, X_k^*, \delta_k^*). \quad (7)$$

Виходячи з цього, співвідношення (7), розв'язки X_j^* і δ_j^* є кращими, ніж розв'язки X_k^* і δ_k^* . Фізичний сенс бінарних співвідношень переваг локальних розв'язків один до одного (7) полягає в тому, що саме завдяки бінарним співвідношенням переваг локальних розв'язків одне до одного, максимальне значення індукції в всьому просторі пошуку точок екранування магнітного поля з координатами P_i розв'язки X_j^* і δ_j^* забезпечують менше за розв'язки X_k^* і δ_k^* значення рівня результуючої індукції (7), бо забезпечується пошук розв'язку, за допомогою якого мінімізуються максимальний рівень результуючої індукції за всім простором екранування магнітного поля. Під час розв'язання задачі скалярної мінімаксної оптимізації результуючої індукції в конкретній точці простору екранування з координатами P_i виконується мінімізація величини індукції по вектору параметрів системи комбінованого екранування X , що треба знайти. Для забезпечення робастності системи комбінованого екранування для кожної точки простору екранування виконується максимізація результуючої індукції за вектором невизначеностей δ .

Такий підхід дозволяє істотно зменшити набір можливих оптимальних розв'язків вихідної задачі багатокритеріальної оптимізації і полегшити процес обчислень для особи, яка ухвалює рішення стосовно вибору варіанта оптимального розв'язку із області Парето-оптимальних розв'язків.

Задача пошуку локального мінімуму в одній точці даного простору, як правило, є багатоекстремальною, такою, що містить локальні мінімуми і максимуми, тому для її розв'язання доцільно використовувати алгоритми стохастичної багатоагентної оптимізації. Розглянемо алгоритм пошуку безлічі Парето-оптимальних розв'язків задач багатокритеріального нелінійного програмування на основі стохастичної багатоагентної оптимізації. На сьогодні розроблена значна кількість алгоритмів оптимізації «роєм частинок» – алгоритмів «particle swarm optimization» (PSO), заснованих на ідеї «колективного розуму рою частинок», таких як алгоритми gbest PSO і lbest PSO [18–20].

Застосування стохастичних методів багатоагентної оптимізації для розв'язання багатокритеріальних задач викликає певні труднощі, але даний напрямок продовжує інтенсивно розвиватися. Для розв'язання вихідної багатокритеріальної задачі нелінійного програмування з обмеженнями, побудуємо алгоритм стохастичної багатоагентної оптимізації на основі набору роїв частинок, кількість яких дорівнює кількості компонент вектора критерія оптимізації.

В алгоритмі оптимізації роєм частинок швидкості частинок змінюються за лінійними законами. Із метою підвищення швидкості пошуку глобального розв'язку останнім часом набули поширення спеціальні нелінійні алгоритми стохастичної багатоагентної оптимізації, в яких рух рою частинок описується наступними виразами [18–20]:

$$v_{ij}(t+1) = w_j v_{ij}(t) + c_{1j} r_{1j}(t) H(p_{1j} - \varepsilon_{1j}(t)) [y_{ij}(t) - x_{ij}(t)] + c_{2j} r_{2j}(t) H(p_{2j} - \varepsilon_{2j}(t)) [y_j^*(t) - x_{ij}(t)]$$

$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t+1)$$

де $x_{ij}(t)$, $v_{ij}(t)$ – положення і швидкість частинки i рою j .

Для врахування бінарних відношень переваг (7) під час пошуку розв'язків використали спеціальні еволюційні алгоритми для багатокритеріальної оптимізації [18, 19].

Опис експериментальної установки

Для проведення експериментальних досліджень із визначення ефективності екранування магнітного поля, що генерується повітряними ЛЕП, для комбінованих екранів розроблені лабораторні макети ЛЕП.

На рис. 1 показано зовнішній вигляд макета дволанцюгової ЛЕП із розташуванням проводів типу «діжка».

Зовнішній вигляд макета одноланцюгової ЛЕП із трикутним розташуванням проводів зображено на рис. 2. Струмопроводи макета ЛЕП живляться енергією від регульованого індукційного регулятора.

На рис. 3 надано зовнішній вигляд двох компенсаційних обмоток системи активного екранування, виконаних в вигляді прямокутних рамок, із розташуванням проводів обмоток за торцями поверхонь.

Для живлення компенсаційних обмоток використовуються двоканальні підсилювачі потужності, зовнішній вигляд яких показано на рис. 4. Потужність кожного підсилювача – до 800 Вт на канал. Крім того, підсилювач має можливість мостового підключення, що забезпечує поєднану потужність до 1200 Вт на канал.



Рис. 1. Макет дволанцюгової ЛЕП із розташуванням проводів типу «діжка»



Рис. 2. Макет одноланцюгової ЛЕП із трикутним розташуванням проводів



Рис. 3. Дві компенсаційні обмотки системи активного екранування



Рис. 4. Підсилювачі потужності для живлення компенсаційних обмоток і вимірювально-реєструючі прибори

На рис. 5 представлено зовнішній вигляд системи управління, що складається з датчиків вимірювання рівня магнітного поля; блоків підсилення – формування вхідних сигналів; блоку фазоінверторів; органів керування для оператора системи; вимірювальних приладів для визначення й установи рівня струму в компенсуючих обмотках; осцилографа для оперативного регулювання сигналів управління і реєстрації поточних показників в робочій точці розташування датчиків магнітного поля;

чотириканального підсилювача потужності до 70 Вт на канал; блоку живлення власних потреб і силового блоку живлення підсилювача потужності.

Для оперативного контролю й вимірювання результуючого магнітного поля в середині простору екранування використовується трикоординатний магнітометр типу «TES 1394S triaxial ELF magnetic field meter», зовнішній вигляд якого зображено на рис. 6.

Магнітометр вимірює компоненти вектора індукції магнітного поля за допомогою трьох розташованих ортогонально вимірювальних котушок, які показані на рис. 7. Осі цих вимірювальних котушок ортогональні одна одній і утворюють ортогональну систему координат для вимірювання магнітного поля. Природно, що в ході вимірювання, розташовуючи прибор, вісі цих котушок необхідно встановлювати паралельно вісям вихідного магнітного поля.



Рис. 5. Система управління



Рис. 6. Трикоординатний магнітометр «TES 1394S»

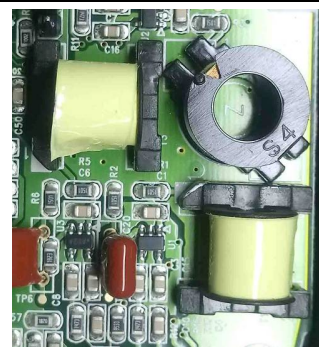


Рис. 7. Розташування вимірювальних котушок магнітометра «TES 1394S»

Експериментальні дослідження комбінованих екранів із суцільними пасивними екранами

Розглянемо експериментальні дослідження комбінованого екрана з суцільним пасивним екраном, в якого бічні поверхні останнього відкриті, а саме П-подібний екран. На рис. 8 показана лабораторна установка для такого типу екрана.

В середині об'єму П-подібного пасивного екрана встановлено два датчики магнітного поля, які використовуються для реалізації двох контурів замкнутого управління з двома компенсаційними обмотками системи активного екранування і зворотними зв'язками за результуючим магнітним полем. Осі датчиків встановлюються так, щоб вимірювати найбільше значення індукції магнітного поля, що генерується компенсаційною

обмоткою відповідного компенсуючого каналу. Така установка осей датчиків магнітного поля дозволяє максимально зменшити вплив каналів один на одного при їх спільній роботі.

В середині об'єму пасивного екрана також встановлено два додаткові датчики магнітного поля, осі яких паралельні координатним осям. Ці датчики використовуються в системі вимірювання просторово-часової характеристики результуючого магнітного поля. Вимірювальна система використовується також для оперативної наладки контурів регулювання системи активного екранування комбінованого екранування магнітного поля.

Розглянемо ефективність екранування магнітного поля, що генерується дволанцюговою ЛЕП із розташуванням проводів типу «діжка». В результаті розв'язання геометричної оберненої задачі квазімагнітостатики обчислено координати розташування двох компенсаційних обмоток системи активного екранування, а також струми і фази в них. На рис. 9 показано розподіл індукції вихідного поля, що генерується дволанцюговою ЛЕП із розташуванням проводів типу «діжка».

На рис. 10 зображено розподіл індукції результуючого поля при роботі тільки П-подібного пасивного екрана.

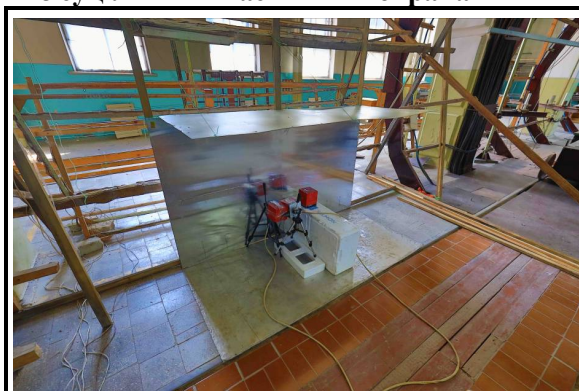


Рис. 8. Суцільний П-подібний пасивний екран

На рис. 11 представлено розподіл індукції результуючого поля при роботі тільки активного екрана.

На рис. 12 показано розподіл індукції результуючого поля при роботі комбінованого екрана.

Ефективність комбінованого екрана становить 2–3 одиниці. Проте по краях пасивного екрана ефективність екранування вихідного магнітного поля істотно зменшується.

Розглянемо ефективність екранування магнітного поля, що генерується одноланцюговою ЛЕП із триангулярним розташуванням проводів. У результаті розв'язання геометричної оберненої задачі квазімагнітостатики обчислено координати розташування двох компенсаційних обмоток системи активного екранування, а також струми і фази в них.

На рис. 13 показано розподіл індукції вихідного поля, що генерується одноланцюговою ЛЕП із триангулярним розташуванням проводів.

На рис. 14 зображено розподіл індукції результуючого поля при роботі тільки П-подібного пасивного екрана.

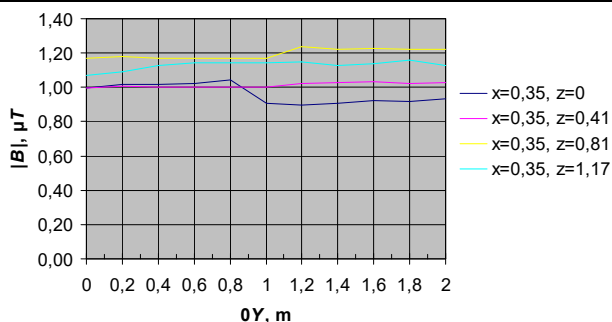


Рис. 9. Розподіл індукції вихідного поля, що генерується дволанцюговою ЛЕП із розташуванням проводів типу «діжка»

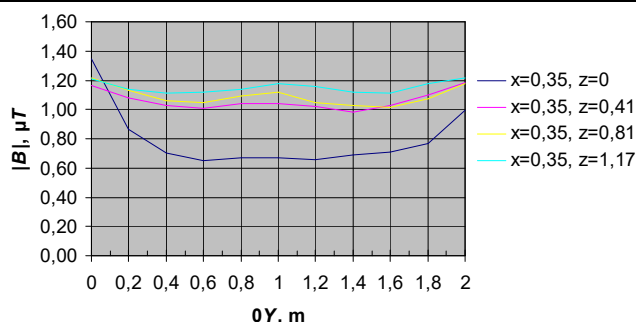


Рис. 10. Розподіл індукції результуючого поля при роботі тільки пасивного П-подібного екрана

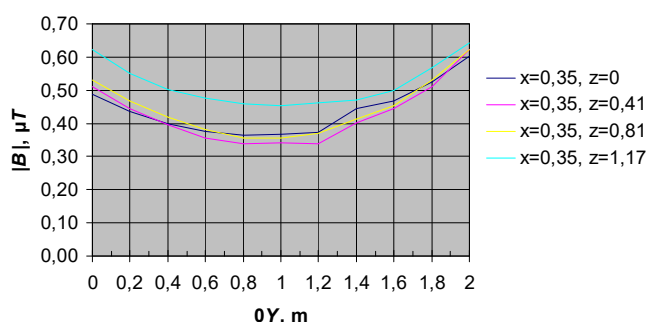


Рис. 11. Розподіл індукції результуючого поля при роботі тільки активного екрана

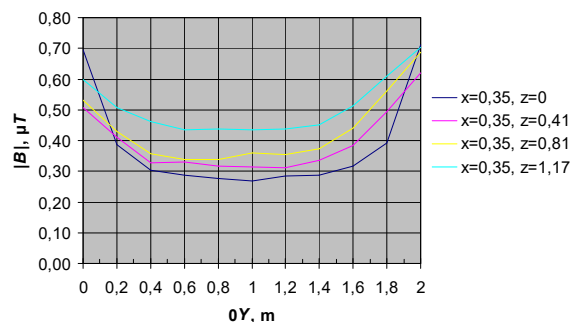


Рис. 12. Розподіл індукції результуючого поля при роботі комбінованого екрана

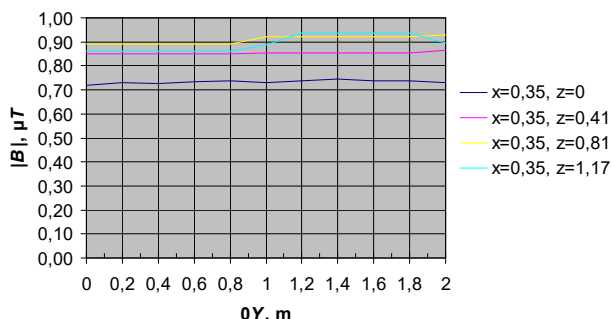


Рис. 13. Розподіл індукції вихідного поля, що генерується одноланцюговою ЛЕП із триангулярним розташуванням проводів

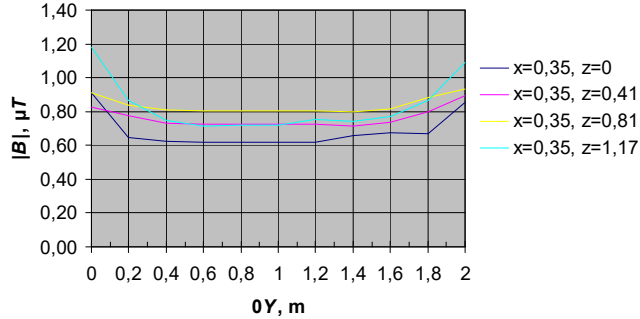


Рис. 14. Розподіл індукції результуючого поля при роботі тільки П-подібного пасивного екрана

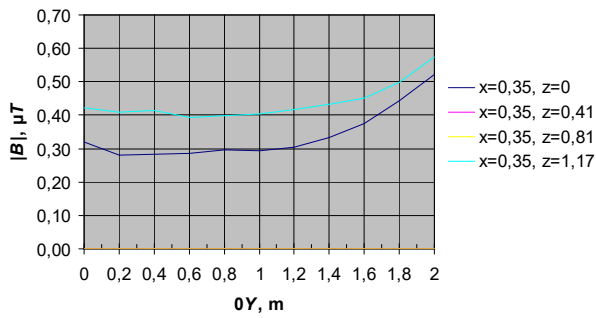


Рис. 15. Розподіл індукції результуючого поля при роботі тільки активного екрана

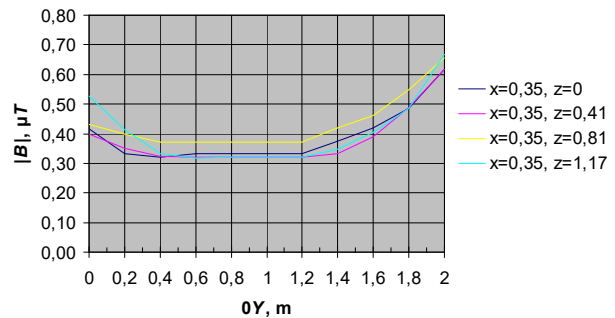


Рис. 16. Розподіл індукції результуючого поля при роботі комбінованого екрана

На рис. 15 показано розподіл індукції результуючого поля при роботі тільки активного екрана.

На рис. 16 наведено розподіл індукції результуючого поля при роботі комбінованого екрана.

Ефективність комбінованого екрана становить 2–3 одиниці. Проте по краях пасивного екрана ефективність екранування вихідного магнітного поля істотно зменшується.

Розглянемо експериментальні дослідження комбінованого екрана, в якого бічні поверхні пасивного екрана закриті листами з алюмінію.

На рис. 17 зображена лабораторна установка екрана з п'ятьма поверхнями екрана.



Рис. 17. Суцільний пасивний екран, в якого бічні поверхні пасивного екрана закриті листами з алюмінію

Розглянемо ефективність екранування магнітного поля, що генерується дволанцюговою ЛЕП із розташуванням проводів типу «діжка». У результаті розв'язання геометричної оберненої задачі квазімагнітостатики обчислено координати розташування двох компенсаційних обмоток системи активного екранування, а також струми і фази в них. Природно, що розподіл індукції вихідного поля, що генерується дволанцюговою ЛЕП із розташуванням проводів типу «діжка» для цього екрана такий самий, як і для суцільного П-подібного екрана, який показано на рис. 9.

На рис. 18 наведено розподіл індукції результуючого поля при роботі тільки пасивного екрана.

На рис. 19 показано розподіл індукції результуючого поля при роботі тільки активного екрана.

На рис. 20 показано розподіл індукції результуючого поля при роботі комбінованого екрана.

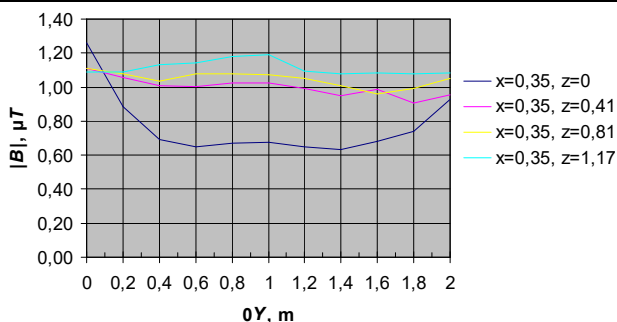


Рис. 18. Розподіл індукції результуючого поля при роботі тільки пасивного екрана з п'ятьма поверхнями екрана

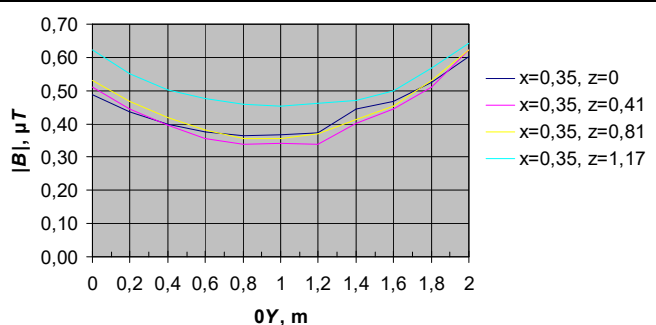


Рис. 19. Розподіл індукції результуючого поля при роботі тільки активного екрана

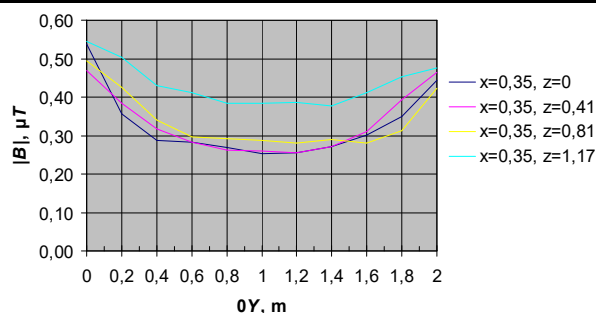


Рис. 20. Розподіл індукції результуючого поля при роботі комбінованого екрана

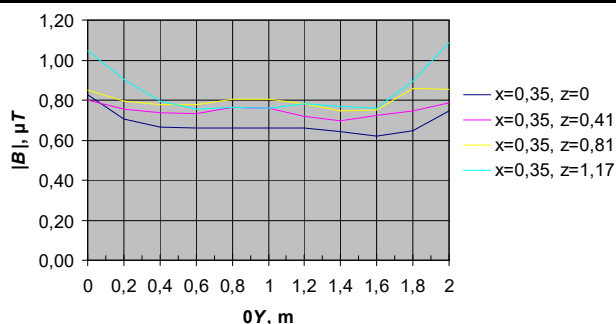


Рис. 21. Розподіл індукції результуючого поля при роботі тільки пасивного екрана з п'ятьма поверхнями екрана

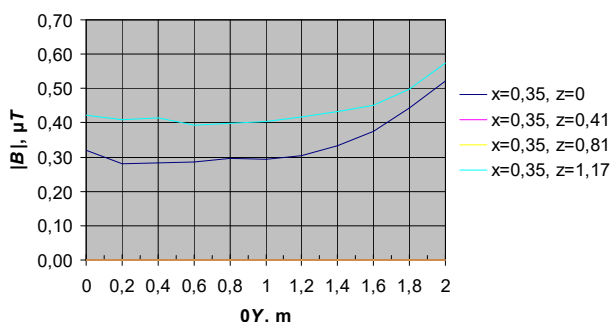


Рис. 22. Розподіл індукції результуючого поля при роботі тільки активного екрана

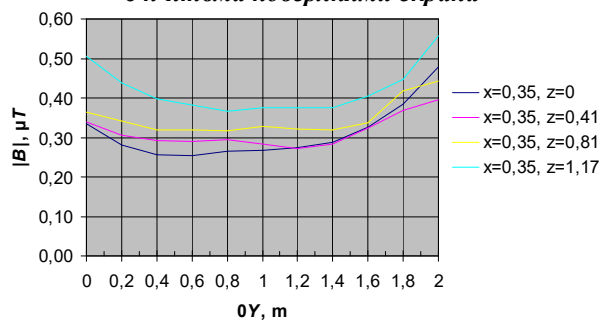


Рис. 23. Розподіл індукції результуючого поля при роботі комбінованого екрана

Ефективність екранування по центру екрана з п'ятьма поверхнями така сама, як і у випадку для екрана без бічних поверхонь і становить 2–3 одиниці. Проте за областями на краях пасивного екрана ефективність екранування вихідного магнітного поля зменшується суттєво менше, ніж у П-подібного екрана, що видно на рис. 8. Таке підвищення ефективності за краями екрана зумовлене наявністю бічних екрануючих поверхонь.

Розглянемо ефективність екранування магнітного поля, що генерується одноланцюговою ЛЕП з триангулярним розташуванням проводів. В результаті розв'язання геометричної оберненої задачі квазімагнітостатики були обчислені координати розташування двох компенсаційних обмоток системи активного екранування, а також струми і фази в цих обмотках.

Природно, що розподіл індукції вихідного поля, що генерується одноланцюговою ЛЕП із триангулярним розташуванням проводів, для цього екрана такий саме, як і для суцільного П-подібного екрана, як показано на рис. 10.

На рис. 21 наведено розподіл індукції результуючого поля при роботі тільки пасивного екрана.

На рис. 22 наведено розподіл індукції результуючого поля при роботі тільки активного екрана.

На рис. 23 показано розподіл індукції результуючого поля при роботі комбінованого екрана.

Ефективність екранування по центру екрана з п'ятьма поверхнями така ж, як і для екрана без бічних поверхонь і становить 2–3 одиниці. Проте по краях пасивного екрана ефективність екранування вихідного магнітного поля знижується значно менше, ніж у П-подібного екрана, що видно на рис. 12. Таке підвищення ефективності по краях екрана зумовлене наявністю бічних екрануючих поверхонь.

Висновки

1. Приведені результати експериментальних досліджень ефективності комбінованих електромагнітних екранування, що включає активне і пасивне екранування за допомогою суцільного екрана, магнітного поля на основі 3D моделювання, що генерується в житлових будинках одноланцюговими лініями електропередачі з трикутним розташуванням проводів, а також і для дволанцюгових ліній електропередачі з розташуванням проводів типу «діжка».

2. Задача проєктування комбінованих екранів зведена до розв'язання векторних «ігор», в яких вектор «вартості гри» обчислюється за допомогою програмного пакета COMSOL Multiphysics. Розв'язки цих векторних «ігор» обчислюються на основі алгоритмів оптимізації мультироєм частинок із безлічі Парето-оптимальних розв'язків із врахуванням бінарних співвідношень переваг розв'язків локальних критеріїв.

3. У ході проєктування комбінованих екранів для зниження рівняМП, яке генерується повітряними лініями електропередачі, обчислено координати просторового розташування двох компенсаційних обмоток, струми і фази в цих обмотках активного екрана, а також параметри суцільних пасивних екранів, П-подібного і з п'ятьма поверхнями.

4. Основні переваги застосування комбінованих електромагнітних екранів, що складаються з активних і суцільних пасивних частин, полягає в зниженні порівняно із застосуванням тільки активного екрана рівня індукції вихідногоМП в значно більшій області простору екранування.

5. Практичне застосування комбінованих електромагнітних екранів дозволяє понизити рівень магнітного поля, що генерується повітрям ЛЕП усередині житлових будинків, до безпечного для населення, яке проживає поблизу таких ЛЕП.

Подяка

Автор висловлює подяку співробітникам відділу магнетизму технічних об'єктів Інституту енергетичних машин і систем ім. А. М. Підгорного НАН України к.т.н., с.н.с. О. О. Ткаченку, інженерам О. В. Соколу та О. П. Шевченку за допомогу в розробці й експериментальних випробуваннях комбінованої системи електромагнітного екранування.

Література

1. Hardell L. World Health Organization, radiofrequency radiation and health – a hard nut to crack (Review). *International Journal of Oncology*. 2017. Vol. 51. P. 405–413. <https://doi.org/10.3892/ijo.2017.4046>.
2. Bray F., Laversanne M., Sung H., Ferlay J., Siegel R. L., Soerjomataram I., Jemal A. Global cancer statistics 2022: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries. *CA: a Cancer Journal for Clinicians*. 2024. Vol. 74. Iss. 3. P. 229–263. <https://doi.org/10.3322/caac.21834>.
3. IARC classifies radiofrequency electromagnetic fields as possibly carcinogenic to humans: Press release No. 2008. International Agency for Research on Cancer. France, Lyon, 2011. 6 p. https://www.iarc.who.int/wp-content/uploads/2018/07/pr208_E.pdf.
4. Directive 2013/35/EU of the European Parliament and of the Council of 26 June 2013 on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (electromagnetic fields). 2013. <http://data.europa.eu/eli/dir/2013/35/oj>.
5. IEEE standard for safety levels with respect to human exposure to electromagnetic fields, 0–3 kHz. In: IEEE Std C95.6-2002. 2002. P. 1–64. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2002.94143>.
6. Ghanim T. H., Kamil J. A., Mutlaq A. H. The influence of the mixed electric line poles on the distribution of magnetic field. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Informatics (IJEI)*. 2022. Vol. 10. No. 2. P. 292–301. <https://doi.org/10.52549/ijeel.v10i2.3572>.
7. Canova A., Giaccone L. Real-time optimization of active loops for the magnetic field minimization. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*. 2018. Vol. 56. P. 97–106. <https://doi.org/10.3233/jac-172286>.
8. Canova A., Giaccone L. High-performance magnetic shielding solution for extremely low frequency (ELF) sources. CIREN International Conference & Exhibition on Electricity Distribution. 2017. Vol. 2017. Iss. 1. P. 686–690. <https://doi.org/10.1049/oap-cired.2017.1029>.
9. Canova A., Giaccone L., Cirimele V. Active and passive shield for aerial power lines. 25th International Conference on Electricity Distribution (3–6 June 2019, Madrid). 2019. Paper 1096. 5 p. <https://www.cired-repository.org/server/api/core/bitstreams/e782355b-54df-4be1-9964-3e614f13bf07/content>.
10. Bravo-Rodríguez J., del-Pino-López J., Cruz-Romero P. A Survey on optimization techniques applied to magnetic field mitigation in power systems. *Energies*. 2019. Vol. 12. Iss. 7. P. 1332–1332. <https://doi.org/10.3390/en12071332>.
11. Canova A., del-Pino-Lopez J. C., Giaccone L., Manca M. Active shielding system for ELF magnetic fields. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2015. Vol. 51. Iss. 3. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/tmag.2014.2354515>.
12. Rusanov A. V., Subotin V. N., Khoryev O. M. Effect of 3D shape of pump-turbine runner blade on flow characteristics in turbine mode. *Journal of Mechanical Engineering – Problemy Mashynobuduvannia*. 2022. Vol. 25. No. 4. P. 6–14. <https://doi.org/10.15407/pmach2022.04.006>.

13. Kostikov A. O., Zevin L. I., Krol H. H. The optimal correcting the power value of a nuclear power plant power unit reactor in the event of equipment failures. *Journal of Mechanical Engineering – Problemy Mashynobuduvannia*. 2022. Vol. 25. No. 3. P. 40–45. <https://doi.org/10.15407/pmach2022.03.040>.
14. Maksymenko-Sheiko K. V., Sheiko T. I., Lisin D. O. Mathematical and computer modeling of the forms of multi-zone fuel elements with plates. *Journal of Mechanical Engineering – Problemy Mashynobuduvannia*. 2022. Vol. 25. No. 4. P. 31–38. <https://doi.org/10.15407/pmach2022.04.032>.
15. Hontarovskiy P. P., Smetankina N. V., Ugrimov S. V. Computational studies of the thermal stress state of multi-layer glazing with electric heating. *Journal of Mechanical Engineering – Problemy Mashynobuduvannia*. 2022. Vol. 25. No. 2. P. 14–21. <https://doi.org/10.15407/pmach2022.02.014>.
16. Sushchenko O., Averyanova Yu., Ostroumov I. V., Kuzmenko N. S., Zaliskyi M., Solomentsev O., Kuznetsov B., Nikitina T., Havrylenko O., Popov A., Volosyuk V., Shmatko O., Ruzhentsev N., Zhyla S., Pavlikov V., Dergachov K., Tserne E. Algorithms for design of robust stabilization systems. In: Gervasi O., Murgante B., Hendrix E. M. T., Taniar D., Apduhan B. O. (eds). *Computational Science and Its Applications – ICCSA 2022. Lecture Notes in Computer Science*. Springer, Cham, 2022. Vol. 13375. P. 198–213. https://doi.org/10.1007/978-3-031-10522-7_15.
17. Ummels M. *Stochastic Multiplayer Games Theory and Algorithms*. Amsterdam: Amsterdam University Press, 2010. 174 p. <https://doi.org/10.5117/9789085550402>.
18. Ray T., Liew K. M. A swarm metaphor for multiobjective design optimization. *Engineering Optimization*. 2002. Vol. 34. No. 2. P. 141–153. <https://doi.org/10.1080/03052150210915>.
19. Xiaohui H., Eberhart R. C., Yuhui S. Particle swarm with extended memory for multiobjective optimization. *Proceedings of the 2003 IEEE Swarm Intelligence Symposium. SIS'03 (Cat. No. 03EX706)*. USA, Indianapolis, 2003. P. 193–197. <https://doi.org/10.1109/sis.2003.1202267>.
20. Hashim F. A., Hussain K., Houssein E. H., Mabrouk M. S., Al-Atabany W. Archimedes optimization algorithm: a new metaheuristic algorithm for solving optimization problems. *Applied Intelligence*. 2021. Vol. 51. P. 1531–1551. <https://doi.org/10.1007/s10489-020-01893-z>.

Надійшла до редакції 10.03.2025