УДК 621.3.01 DOI: https://doi.org/10.15407/techned2026.04.075

БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНЕ ПРОЕКТУВАННЯ КОМБІНОВАНОГО ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО АКТИВНОГО ТА СУЦІЛЬНОГО ПАСИВНОГО ЕКРАНУ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ

Б.І. Кузнецов[1*], докт.техн.наук, **Т.Б. Нікітіна**[2**], докт.техн.наук, **І.В. Бовдуй**[1***], канд.техн.наук, **К.В. Чуніхін**[1****], канд.техн.наук, **В.В. Коломієць**[2*****], канд.техн.наук, **Б.Б. Кобилянський**[2******], канд.техн.наук

[1] **Інститут енергетичних машин і систем ім. А.М. Підгорного НАН України, вул. Комунальників, 2/10, Харків, 61046, Україна.**
E-mail: kuznetsov.boris.i@gmail.com.

[2] **Бахмутський навчально-науковий професійно-педагогічний інститут Харківського національного університету ім. В.Н. Каразіна, вул. Носакова, 9а, Бахмут, 84511, Україна.**
E-mail: nnppiuipa@ukr.net.

Розглянуто для житлового будинку задачу підвищення ефективності екранування магнітного поля (МП) повітряних ліній електропередачі (ПЛЕП) за допомогою комбінованого активного та суцільного пасивного екрану (КАПСЕ). Розроблено метод багатокритеріального проектування (МБП) КАПСЕ з невизначеностями задля підвищення ефективності екранування. Задача МБП КАПСЕ сформульована як геометрична обернена задача магнітостатики (ГОЗМ) для результуючого МП, що генерується ПЛЕП, компенсаційними обмотками системи активного екранування та суцільним пасивним екраном. ГОЗМ сформульовано як векторна мінімаксна задача нелінійного програмування (ВЗНП), в якій компоненти векторної цільової функції (ВЦФ) є результуюче МП в житловому будинку. Розрахунок ВЦФ – це геометрична пряма задача магнітостатики (ГПЗМ) для результуючого МП, яка розрахована на основі методу скінчених елементів (МСЕ) тривимірного (3D) квазістаціонарного наближення рішень рівнянь Максвелла з використанням програмного забезпечення COMSOL Multiphysics. Розв'язок ВЗНП виконано за допомогою стохастичного алгоритму оптимізації, заснованого на поведінці кровососних п'явок (ПКП) з Парето оптимальних рішень з урахуванням бінарних співвідношень переваг. Під час проектування КАПСЕ розраховуються просторові координати розташування суцільного пасивного екрану та компенсуючих обмоток, а також струми обмоток та фази активного екрану. Нові наукові результати – це теоретичні та експериментальні дослідження ефективності екранування розробленою КАПСЕ МП, що генерується ПЛЕП. Представлено комп'ютерне моделювання та експериментальні дослідження КАПСЕ для тривимірної моделі МП ПЛЕП. Бібл. 3, рис. 3.

Ключові слова: повітряні лінії електропередачі, магнітне поле, комбінований активний та суцільний пасивний екран, комп'ютерне моделювання, експериментальні дослідження.

Вступ. Багато житлових будинків розташовані поблизу ПЛЕП, тому рівень МП всередині цих житлових будинків у багато разів перевищує санітарні норми. Задля зниження рівня МП найпоширенішим методом є пасивні контурні або пасивні суцільне екрани (ПСЕ). Однак ці екрани мають низьку ефективність екранування. Системи активного екранування (САЕ) мають вищу ефективність екранування. Для підвищення ефективності екранування використовуються КАПСЕ [1]. Розглянемо підвищення ефективності екранування за допомогою КАПСЕ.

Метою роботи є розробка методу МБП КАПСЕ, що складаються з активних та суцільних пасивних частин, на основі алгоритму оптимізації МБП задля підвищення ефективності екранування МП ПЛЕП у житловому будинку.

Постановка задачі. Екранування МП, що генерується ПЛЕП, досягається шляхом генерування компенсуючого МП за допомогою КАПСЕ, яке спрямоване протилежно вихідному МП.

Під час роботи КАПСЕ, ПСЕ та САЕ впливають один на одного. Для ПСЕ вихідним МП є результуюче МП, що генерується ПЛЕП та САЕ. ПСЕ генерує вторинне компенсуюче МП, яке, згідно

© Кузнецов Б.І., Нікітіна Т.Б., Бовдуй І.В., Чуніхін К.В., Коломієць В.В., Кобилянський Б.Б., 2026
ORCID: * https://orcid.org/0000-0002-1100-095X; ** https://orcid.org/0000-0002-9826-1123;
*** https://orcid.org/0000-0003-3508-9781; **** https://orcid.org/0000-0001-9822-5870;
***** https://orcid.org/0000-0002-9073-5793; ****** https://orcid.org/0000-0003-3226-5997
© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2026
Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0
https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk

зі законом Фарадея, спрямоване протилежно вихідному результуючому МП. ГПЗМ для КАПСЕ розраховане за допомогою програмного забезпечення COMSOL Multiphysics для квазістаціонарного наближення рішень рівнянь Максвелла за допомогою МСЕ для 3D-моделей МП у вигляді закону Гауса для електричного поля, закону Гауса для магнетизму, закону Фарадея для електромагнітної індукції та закону Ампера.

Цифрове моделювання електромагнітних процесів у системах з протяжними струмопровідними елементами та тонкостінними розімкнутими провідними екрануючими елементами базується на комбінованому використанні методів скінченних різниць та поглинаючих граничних умов, розділенні обчислювальної області на ряд додаткових піддоменів, що містять тонкостінні елементи, та використанні неоднорідної обчислювальної сітки для розрахунку поля в товщі стінок екрану з подальшим «зшиванням» отриманих у кожній піддомені рішень [2].

3D-модель МП, що генерується ПЛЕП та компенсаційними обмотками (КО) САЕ, розраховується як набір струмопровідників і при цьому вплив інших елементів не враховується. Загальний метод розрахунку 3D-моделі МП базується на законі Біо-Савара. Суть методу полягає в тому, що провідники замінюються ламаною лінією, що складається з прямих відрізків. Через кожен нескінченно тонкий відрізок провідника довжиною *dl* протікає струм $i(t)$. Згідно із законом Біо-Савара, струм $i(t)$, що протікає через відрізок *dl*, генерує МП з індукцією

$$d\boldsymbol{B}(t)=\frac{\mu_0\, \mathrm{i}(t)}{4\pi R^3}\left(d\boldsymbol{l}\times\boldsymbol{R}\right). \tag{1}$$

Компенсуюче МП САЕ генерується за допомогою КО. Початкове МП для ПСЕ – це результуюче МП, що генерується ПЛЕП та САЕ. Як правило, вектор просторово-часової характеристики початкового МП поляризований, тому за допомогою однієї КО САЕ можливо ефективно компенсувати початкове МП, просторово-часова характеристика якого має сильно витягнуту форму.

Однак, МП ПЛЕП з трикутним розташуванням провідників має майже кругову поляризацію. Для компенсації такого МП необхідно використовувати щонайменше дві КО. У деяких випадках для ефективного екранування вихідного МП може знадобитися три або більше КО САЕ.

Струми в КО САЕ генеруються за допомогою системи з двома ступенями вільності (ДСВ) [1]. Ця система використовує як розімкнуте, так і замкнуте керування зі зворотним зв'язком по керованій координаті. Розімкнуте керування початковим МП для САЕ реалізується за допомогою датчика магнітного поля (ДМП), встановленого поза екрануючим простором. Замкнуте керування зі зворотним зв'язком за результуючим МП реалізується за допомогою ДМП, встановленого всередині екрануючого простору. Крім того, замкнуте керування для такої системи зворотного зв'язку реалізується на основі результуючого МП, що генерується ПЛЕП, ПСЕ та КО САЕ. Кількість ДМП, необхідних для реалізації замкнутого керування зі зворотним зв'язком на основі результуючого МП, зазвичай дорівнює кількості КО САЕ.

ГПЗМ для положень ДМП САЕ полягає в обчисленні вихідного сигналу ДМП, що необхідно для реалізації керування струмом у розімкнутому та замкнутому контурах САЕ. В цьому випадку, природно, передбачається, що просторові координати та кути просторової орієнтації цих ДМП задані. Природно, що MF у місці розташування цих ДМП також вважається відомим. Розглянемо ГПЗМ для положень ДМП САЕ. Введемо вектор $\boldsymbol{B}_R(t)$, компонентами якого $\boldsymbol{B}_R(Q_i,t)$ є вектори результуючого МП у точках Q_i встановлення ДМП. Також введемо вектори φ кутових положень ДМП та вектор-стовпець $\boldsymbol{K}_M$ коефіцієнтів посилення ДМП, враховуючи кількість витків їх вимірювальних котушок та коефіцієнти посилення передпідсилювачів.

Тоді вектор $\boldsymbol{y}_s(t)$ вихідної напруги ДМП набуде наступного вигляду:

$$\boldsymbol{y}_s(t)=\boldsymbol{B}_R(t)\otimes\varphi\otimes\boldsymbol{K}_M+\boldsymbol{w}(t)\,. \tag{2}$$

Тут знак $\otimes$ позначає тензорний (Кронекерівський) добуток векторів-стовпців, $\boldsymbol{w}(t)$ – вектор шуму ДМП.

Компонентами вектора $\boldsymbol{y}_s(t)$ вихідної напруги є миттєві значення проекцій компонент векторів $\boldsymbol{B}_R(Q_i,t)$ результуючого МП у встановлених точках Q_i ДМП на компоненти одиничних векторів $\boldsymbol{\varphi}$ кутових положень ДМП з урахуванням компонентів вектора-стовпця $\boldsymbol{K}_M$ коефіцієнтів підсилення ДМП. Визначимо вектор $\boldsymbol{X}_{asp}$ положень ДМП для САЕ, компонентами якого є вектор просторових координат Q_i та вектор $\boldsymbol{\varphi}$ кутових положень ДМП. Тоді для заданого вектора $\boldsymbol{X}_{asp}$,, на основі (1), можна розв'язати ГПЗМ для положень ДМП САЕ – можна обчислити вектор миттєвих значень вихідної напруги ДМП.

Розглянемо тепер задачу прямого керування САЕ для розрахунку струмів $\boldsymbol{I}_w(t)$ у КО САЕ на основі вектора $\boldsymbol{y}_s(t)$ вихідних напруги ДМП. Введемо вектор $\boldsymbol{X}_{ars}$, компоненти якого є параметрами розімкненого та замкненого регуляторів $\boldsymbol{R}(\boldsymbol{X}_{ars})$, за допомогою яких реалізується керування КО. Тоді на основі вектору $\boldsymbol{y}_s(t)$ миттєвих значень вихідних напруг ДМП з використанням регуляторів розімкненого та замкненого керування САЕ з ДСВ, можна обчислити вектор $\boldsymbol{I}_w(t)$ миттєвих значень струмів $\boldsymbol{I}_w$(t) у КО

$$\boldsymbol{I}_w(t+1) = \boldsymbol{R}(\boldsymbol{X}_{ars})\boldsymbol{y}_s(t). \tag{3}$$

Метод розв'язання. Введемо вектор $\boldsymbol{X}$ необхідних параметрів проектованої КАПСЕ, компонентами якого є вектори параметрів ПСЕ, геометричні параметри КО САЕ, положення ДМП САЕ та параметри регулятора САЕ з ДСВ. Потім обчислюється вектор $\boldsymbol{B}_R(\boldsymbol{X},\boldsymbol{\delta},P_i,t)$ миттєвих значень результуючого МП для точки P_i та вектора невизначеностей $\boldsymbol{\delta}$ початкового МП, яке генерується ПЛЕП, ПСЕ та КО САЕ із ДСВ. На основі вектора $\boldsymbol{B}_R$ $(\boldsymbol{X},\boldsymbol{\delta},P_i,t)$ миттєвих значень МП обчислюється вектор $\boldsymbol{B}_R(\boldsymbol{X},\boldsymbol{\delta},P_i)$. ефективних значень результуючого МП.

Тоді метод БКП КАПСЕ з вектором невизначеності $\boldsymbol{\delta}$ для покращення ефективності екранування початкового МП ПЛЕП є ГОЗМ та формулюється як розв'язок ВЗНП [1]:

$$\begin{aligned}&\boldsymbol{B}_R(\boldsymbol{X},\boldsymbol{\delta}) = \left(\boldsymbol{B}_R(\boldsymbol{X},\boldsymbol{\delta},P_1),\right.\\ &\left.\boldsymbol{B}_R(\boldsymbol{X},\boldsymbol{\delta},P_2),\ldots\boldsymbol{B}_R(\boldsymbol{X},\boldsymbol{\delta},P_n)\right)^T.\end{aligned} \tag{4}$$

Задля вирішення цієї нелінійної, неопуклої та багатопікової нелінійної та багатовимірної ВЗНП одним із найдосконаліших метаевристичних алгоритмів групового інтелекту є алгоритм стохастичної оптимізації на основі ПКП [3]. Цей алгоритм використовує адаптацію швидкості руху п'явок як функції розрахункової відстані до оптимуму – цілі п'явок. Цей алгоритм ПКП дає змогу адаптивно змінювати значення кроку пошуку в міру наближення до майже стаціонарної області пошуку. На початкових етапах пошуку далеко від крайньої області – в режимі дослідження та в майже стаціонарній області – в режимі роботи, значення кроку руху суттєво змінюється.

Коли п'явки розташовані далеко від оптимуму – на великій відстані, рух п'явок відбувається в режимі дослідження з високою швидкістю згідно з виразом

$$x_{(i,j)}^{t+1} = \begin{cases} x_{(i,j)}^t + C\times x_{(i,j)}^t - L_1, & if\ \ r<a\ \ and\ \ \left|x_{prey(j)}\right| > \left|x_{(i,j)}^t\right| \\ x_{(i,j)}^t + C\times x_{(i,j)}^t + L_1, & if\ \ r<a\ \ and\ \ \left|x_{prey(j)}\right| < \left|x_{(i,j)}^t\right| \\ x_{(i,j)}^t + C\times x_{(i,j)}^t - L_2, & if\ \ r>a\ \ and\ \ \left|x_{prey(j)}\right| > \left|x_{(i,j)}^t\right| \\ x_{(i,j)}^t + C\times x_{(i,j)}^t + L_2, & if\ \ r>a\ \ and\ \ \left|x_{prey(j)}\right| < \left|x_{(i,j)}^t\right| \end{cases}. \tag{5}$$

Довжини L_1 та L_2 обчислюються наступним чином:

$$L_1 = r_1 \times \left|x_{prey(j)} - x_{(i,j)}^t\right| \times PD \times \left(1 - \frac{k_1}{N}\right) \tag{6}$$

$$L_2 = \left|x_{prey(j)} - x_{(i,k)}^t\right| \times PD \times \left(1 - r_1^2 \times \frac{k_1}{N}\right). \tag{7}$$

Змінні r та r_1 є випадковими числами в діапазоні [-1, 1], член C представляє коефіцієнт збурення, параметр PD відображає відстань, оцінену спрямованими п'явками від їхньої здобичі, k_1 – випадкове ціле число в цьому діапазоні.

Хоча метод ПКП є більш складним алгоритмом, він дає змогу не тільки не застрявати в локальних оптимумах, але й збільшити ймовірність знаходження глобального оптимуму. Для цього використовуються два режими руху п'явок, які називаються організованими та неорганізованими п'явками. Коли організовані п'явки рухаються, напрямок руху визначається в напрямку покращення цільової функції. Визначається на основі випадкового пошуку спочатку в режимі дослідження, а потім в режимі роботи. Коли рухаються неорганізовані п'явки, напрямок їх руху визначається в напрямку, протилежному напрямку оптимуму. Це забезпечує швидке наближення п'явок до оптимуму. Рух цих неорганізованих п'явок додатково контролює наявність локальних оптимумів, розташованих в напрямку, протилежному напрямку оптимуму.

Звичайно, реалізація руху цих неорганізованих п'явок вимагає додаткового обчислювального часу, але такий пошук є значно менш витратним порівняно з алгоритмом прямого переліку.

Глобальний оптимум ВЗНП з ВЦФ (4), розрахованим із множини Парето оптимальних рішень та з урахуванням бінарних співвідношень переваг.



а *б*

Рис. 1

Результати моделювання. На основі розробленого методу БКП КАПСЕ з використанням алгоритму оптимізації ПКП розраховано 3D розподіл рівнів результуючого МП. Цей розподіл розраховано як при роботі КАПСЕ без бічних пластин, так і з бічними пластинами з щільних пасивних частин. У разі використання бічних пластин КАПСЕ рівень МП на краях екрануючого простору зменшується порівняно з КАПСЕ без бічних пластин. Крім того, рівень МП в екрануючому просторі значно зростає на краях зони екранування, що пов'язано зі скінченою довжиною КО САЕ.

Результати експериментальних досліджень. Для проведення комплексних експериментальних досліджень була розроблена експериментальна установка КАПСЕ. На рис. 1 показано суцільний пасивний екран без бічних пластин а) та з бічними пластинами б) з обох боків екрану.

На рис. 2 показано підсилювачі потужності для живлення КО САЕ а) та електронну частину системи керування КО САЕ б).

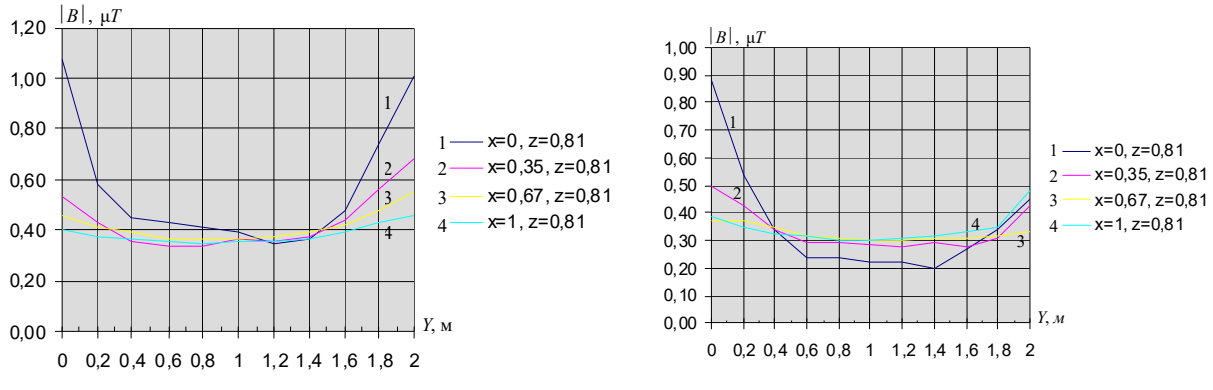


а *б*

Рис. 2

На рис. 3 показано експериментально виміряний 3D розподіл рівня МП на відстані 0*Z*=0.81 *м* з КАПСЕ під час роботи без бічних пластин *а* та з бічними пластинами *б*.

Експериментально виміряний 3D розподіл рівня МП збігається з розрахунковими 3D розподілами МП з точністю 20%.



а *б*

Рис. 3

Висновки. Розроблено метод багатокритеріального проектування комбінованого активного та суцільного пасивного екрану з урахуванням невизначеностей, тривимірної моделі магнітного поля повітряних ліній електропередачі задля покращення екранування.

Багатокритеріальне проектування комбінованого активного та суцільного пасивного екрану зведене до розв'язку задачі векторного мінімаксного нелінійного програмування, в якій компонентами векторної цільової функції є рівень результуючого магнітного поля у житловому будинку. Векторна цільова функція розраховується методом скінчених елементів на основі квазістаціонарного наближення рішень 3D рівнянь Максвелла з використанням програмного забезпечення COMSOL Multiphysics. Розв'язок задачі векторного мінімаксного нелінійного програмування розраховано на основі алгоритмів оптимізації поведінки кровососних п'явок з множини Парето оптимальних рішень з урахуванням бінарних співвідношень переваг.

Наведено результати комп'ютерного моделювання та експериментальних досліджень ефективності екранування комбінованого активного та суцільного пасивного екрану для 3D моделі магнітного поля повітряних ліній електропередачі.

MULTIOBJECTIVE DESIGN OF COMBINED ELECTROMAGNETIC ACTIVE AND SOLID PASSIVE SHIELD FOR OVERHEAD POWER LINES MAGNETIC FIELD

B.I. Kuznetsov[1], T.B. Nikitina[2], I.V. Bovdui[1], K.V. Chunikhin[1], V.V. Kolomiets[2], B.B. Kobylianskiy[2]

[1] Anatolii Pidhornyi Institute of Power Machines and Systems of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2/10, Komunalnykiv str., Kharkiv, 61046, Ukraine, e-mail: kuznetsov.boris.i@gmail.com.
[2] Bakhmut Education Research and Professional Pedagogical Institute V.N. Karazin Kharkiv National University,
9a, Nosakov str., Bakhmut, 84511, Ukraine, e-mail: nnppiuipa@ukr.net.

Problem of shielding efficiency improving of overhead power lines (OPL) initial magnetic field (MF) in residential building by combined active and solid passive shield (CASPS) considered. Method for multi objective design (MOD) of CASPS with uncertainties to improve shielding efficiency developed. MOD problem of CASPS is formulated as geometric inverse problem of magnetostatics for the resulting MF, generated by OPL, compensation windings of the active shielding system and solid passive shield. GIPM is formulated as vector minimax nonlinear programming problem (VNPP), in which the components of the vector objective function (VOF) are resultant MF in residential building. VOF calculation is geometric forward problem of magnetostatics for the resulting MF and calculated based on finite element method of three dimensions (3D) Maxwell equations quasi-stationary approximation solution using COMSOL Multiphysics software. VNPP solution is calculated using stochastic optimization algorithm based on blood-sucking leeches behavior from Pareto optimal solutions taking into account binary preference relations. During CASPS design spatial arrangement coordinates of solid passive shield and compensating windings, as well as windings currents and phases of active shield are calculated. New scientific results are theoretical and experimental studies of a designed CASPS shielding efficiency for MF generated by OPL. The computer simulation and experimental research of CASPS for OPL of 3D MF model presented. References 3, figures 3.

***Keywords*:** overhead power lines, magnetic field, combined active and solid passive shield, computer simulation, experimental research.

1. Kuznetsov B.I., Nikitina T.B., Bovdui I.V. Improve of overhead power lines magnetic field mitigation efficiency by combined active and passive contours shielding. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2025. No 3. Pp. 11-14. DOI: https://doi.org/10.15407/techned2025.03.011.
2. Kondratenko I.P., Kryshchuk R.S., Pashchyn M.O. Axisymmetric model of inductor magnetic field for residual stress reduction in welded aluminum plates *Tekhnichna Elektrodynamika* 2025. No 6. Pp. 72-79. DOI: https://doi.org/10.15407/techned2025.06.072.
3. Bouhadouza B., Sadaoui F. Optimal power flow analysis under photovoltaic and wind power uncertainties using the blood-sucking leech optimizer. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2025. No 6. Pp. 15-26. DOI: https://doi.org/10.20998/2074-272X.2025.6.03.

Надійшла 21.04.2026
Прийнята 10.06.2026