

Д.Є. ПЕЛЄВІН

НОРМАЛІЗАЦІЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ В ЖИТЛОВИХ ПРИМІЩЕННЯХ, РОЗТАШОВАНИХ НАД ВБУДОВАНИМИ ТРАНСФОРМАТОРНИМИ ПІДСТАНЦІЯМИ 6(10)/0,4 КВ ПОТУЖНІСТЮ 100-400 КВА

Метою роботи є визначення методів та засобів екранування, достатніх для зменшення до безпечного рівня магнітного поля промислової частоти в житлових приміщеннях будинків старої забудови, розташованих над вбудованими трансформаторними підстанціями 6(10)/0,4 кВ потужністю 100–400 кВА при малих відстанях до приміщення. Для досягнення поставленої мети запропоновано модифікований метод синтезу систем активного екранування магнітного поля трансформаторних підстанцій при малих відстанях від підстанції до підлоги приміщення, та проведена його експериментальна перевірка на повномасштабному фізичному макеті трансформаторної підстанції потужності 100 кВА з фізичним макетом синтезованої системи активного екранування. Проведено синтез систем активного екранування магнітного поля трансформаторних підстанцій потужності 100–400 кВА при малих відстанях від підстанції до підлоги приміщення та аналіз їх ефективності. Визначено, що нормалізація магнітного поля на поверхні підлоги для трансформаторних підстанцій потужності 100 кВА з допомогою синтезованої системи активного екранування з однією компенсаційною обмоткою можлива на відстанях не менш 1,15 м від підстанції, а з двома обмотками - не менш 1,02 м. Визначено, що нормалізація магнітного поля на поверхні підлоги для трансформаторних підстанцій 400 кВА з допомогою синтезованої системи активного екранування з двома обмотками можлива тільки при відстані від підстанції не менш 1,6 м. Проведено аналіз ефективності комбінованого використання активного та пасивного екранування. Визначено, що комбіноване використання синтезованих двоканальних систем активного екранування та пасивного плоского електромагнітного екрану з алюмінієвого листа товщиною 4 мм дозволяє зменшити магнітне поле над вбудованою трансформаторною підстанцією потужністю від 100 до 400 кВА до нормативного рівня при обмеженні відстані від підстанції до підлоги приміщень не менш 1,08 м і забезпечує захист здоров'я населення від впливу магнітного поля промислової частоти.

Ключові слова: вбудована трансформаторна підстанція, низьковольтний струмопровід, магнітне поле, житлове приміщення, пасивний екран, система активного екранування.

D.Ye. PELEVIN

MAGNETIC FIELD NORMALIZATION IN RESIDENTIAL PREMISES LOCATED ABOVE BUILT-IN TRANSFORMER SUBSTATIONS 6(10)/0,4 KV POWER 100-400 KVA

The purpose of the work is to define methods and means of screening, sufficient to reduce to a safe level the low frequency magnetic field in residential premises of old buildings, located above built-in transformer substations 6(10)/0,4 kV power 100–400 kVA at short distances to the premises. To achieve this goal, a modified method for synthesizing active shielding systems of the magnetic field for transformer substations at short distances from the substation to the floor of the premises, and its experimental verification was carried out on a full-scale physical model of a transformer substation power 100 kVA with a physical layout of the synthesized active shielding system. A synthesis of active shielding systems of magnetic field for transformer substations with a power of 100–400 kVA at short distances from the substation to the floor of the premises and an analysis of their effectiveness were carried out. It was determined that the normalization of the magnetic field on the floor surface for transformer substations with a power of 100 kVA using a synthesized active shielding system with one compensation winding is possible at distances of at least 1,15 m from the substation, and with two windings - at least 1,02 m. It was determined that normalization of the magnetic field on the floor surface for 400 kVA transformer substations using a synthesized active shielding system with two windings is possible only at a distance from the substation of at least 1,6 m. An analysis of the effectiveness of the combined use of active and passive shielding was conducted. It was determined that the combined use of synthesized two-channel active shielding systems and a passive flat electromagnetic shield made of 4 mm thick aluminum sheet allows reducing the magnetic field above the built-in transformer substation with a power of 100 to 400 kVA to the normative level while limiting the distance from the substation to the floor of the premises to at least 1,08 m and provides protection of public health from the effects of the low frequency magnetic field.

Keywords: built-in transformer substation, low-voltage busbar, magnetic field, residential premises, passive shield, active shielding system.

Вступ. Для забезпечення електроенергією житлових будинків використовують трансформаторні підстанції ТП 6/10/0,4 кВ. Вбудовані у житлові будинки старої забудови трансформаторні підстанції (ТП) (рис. 1) найчастіше комплектуються трансформаторами потужністю 100–400 кВА, які в подальшому і розглядаються.

Відомо [1–4], що магнітне поле (МП) в житлових приміщеннях над вбудованими ТП часто перевищує безпечний для населення рівень МП [5], що потребує його зменшення. Для захисту населення від дії МП ТП використовують методи пасивного [1, 6] та активного [7–13] екранування МП.

Пасивні екрани (ПЕ) найчастіше виконуються із електропровідних (феромагнітних) пластин, що встановлюються між житловим приміщенням та ТП (рис. 2). Ефективність використання ПЕ для зменшення МП частотою 50 Гц зазвичай знаходиться в межах 2–4 одиниці [1, 6, 14], що не є достатнім для

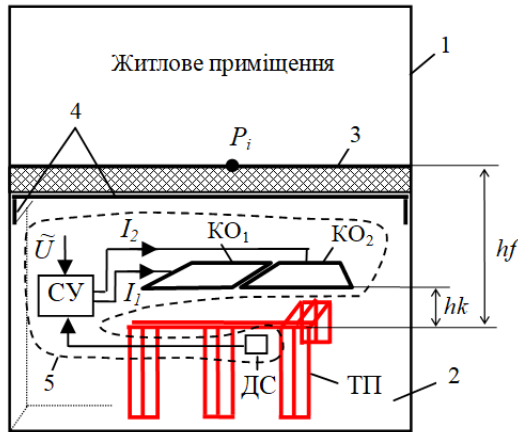
зменшення МП до безпечного рівня при малих відстанях від ТП до приміщення.

Методи активного екранування реалізуються системою активного екранування (САЕ) (рис. 2), що, як правило [15] має: компенсаційні обмотки (КО) з регульованим струмом; датчик струму (ДС), що слідкує за струмом ТП; систему управління (СУ), що керує струмом у КО та має зовнішнє джерело живлення.



Рис. 1. Житловий будинок старої забудови із вбудованою трансформаторною підстанцією

© Д.Є. Пелєвін, 2024



1 – житловий будинок; 2 – приміщення ТП; 3 – підлога; 4 – ПЕ; 5 – САЕ

Рис. 2. Типова схема розташування вбудованої ТП в житлових будинках старої забудови при використанні досліджуваних засобів активного та пасивного екранування МП

Відомий [16] метод синтезу систем активного екранування магнітного поля ТП має обмеження по мінімальній відстані від ТП до житлового приміщення. Розроблені на його основі [16, 17] системи активного екранування ефективно знижують МП ТП на відстанях від 1,5 м до струмопроводу ТП. Але ефективні методи і засоби екранування МП ТП та методи їх синтезу на малих відстанях (менш 1,5 м) на сьогодні не визначені і не досліджені.

Мета роботи – визначення методів та засобів екранування, достатніх для зменшення до безпечного рівня магнітного поля промислової частоти в житлових приміщеннях будинків старої забудови, розташованих над вбудованими ТП 6(10)/0,4 кВ потужністю 100–400 кВА при малих відстанях до приміщення.

Модифікований метод синтезу САЕ МП ТП при малих відстанях від ТП до підлоги приміщення. Розглянемо модифікований метод синтезу САЕ, які ефективно функціонують при малих відстанях. Приймемо наступні припущення: Зовнішнє МП вбудованої ТП заміщується МП його трифазного низьковольтного струмопроводу 0,4 кВ [18]; струми фаз струмопроводу симетричні і синусоїдальні з частотою 50 Гц і створюють тривимірне квазістаціонарне МП; впливом зовнішніх феромагнітних (електропровідних) елементів та джерел МП нехтуємо.

Вихідними даними для синтезу САЕ є МП ТП, визначене на підлозі у житловому приміщенні, де рівень МП максимальний. Відомо [17], що у разі положення житлового приміщення зверху над ТП, а засобів екранування між ТП та приміщенням і в зв'язку з потенційністю МП, зменшення МП на підлозі приміщення до нормативного рівня гарантує його зменшення у всьому приміщенні.

МП трифазного низьковольтного струмопроводу визначимо з використанням закону Біо-Савара [19–21] (1) та принципу суперпозиції (2), де МП струмопроводу $\vec{B}(P)_\Sigma$ у точці P_i визначається як векторна сума МП $\vec{B}_n(i_A)$, $\vec{B}_k(i_B)$, $\vec{B}_m(i_C)$ від струмів всіх

прямолінійних ділянок фазних струмопроводів А, В, С зі струмами i_A , i_B , i_C (3), на який умовно розділяється струмопровід (рис. 2).

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_C \frac{[d\mathbf{r} \times \mathbf{R}]}{R^3}, \quad (1)$$

де I – струм прямолінійної ділянки струмопроводу;

\mathbf{R} – вектор спрямований від елементарного контуру $d\mathbf{r}$ у точку спостереження P_i ;

μ_0 – магнітна стала.

$$\vec{B}_\Sigma = \sum_{n=1}^N \vec{B}_n(i_A) + \sum_{k=1}^K \vec{B}_k(i_B) + \sum_{m=1}^M \vec{B}_m(i_C), \quad (2)$$

де N, K, M – кількість прямолінійних ділянок фазних струмопроводів А, В, С відповідно.

$$i_A = I_m e^{-j(\omega t + \frac{2\pi}{3})}; i_B = I_m e^{-j\omega t}; i_C = I_m e^{-j(\omega t - \frac{2\pi}{3})}, \quad (3)$$

де I_m – амплітуда струму;

ω – кутова частота;

t – час.

Компоненти вектору індукції МП струмопроводу ТП у точці P_i визначаються:

$$\begin{aligned} \dot{B}_x(P_i) &= \sum_{n=1}^N \dot{B}_x(i_A) + \sum_{k=1}^K \dot{B}_x(i_B) + \sum_{m=1}^M \dot{B}_x(i_C), \\ \dot{B}_y(P_i) &= \sum_{n=1}^N \dot{B}_y(i_A) + \sum_{k=1}^K \dot{B}_y(i_B) + \sum_{m=1}^M \dot{B}_y(i_C), \\ \dot{B}_z(P_i) &= \sum_{n=1}^N \dot{B}_z(i_A) + \sum_{k=1}^K \dot{B}_z(i_B) + \sum_{m=1}^M \dot{B}_z(i_C), \end{aligned} \quad (4)$$

а діюче значення індукції його МП у точці P_i як:

$$\tilde{B}(P_i) = \sqrt{\dot{B}_x(P_i)^2 + \dot{B}_y(P_i)^2 + \dot{B}_z(P_i)^2}, \quad (5)$$

де \dot{B}_x \dot{B}_y \dot{B}_z – просторові компоненти визначені для діючого значення струмів i_A , i_B , i_C .

Для САЕ шуканими параметрами при синтезі є геометричні розміри компенсаційних обмоток:

$$D_{coil} = \{x_i, y_i, z_i\}, \quad (6)$$

x_i, y_i, z_i – шукані координати кутів КО,

та параметри контуру управління: амплітуди Im_k струмів і фаз ϕ_k компенсаційних обмоток.

$$I_{coil} = \{Im_k, \phi_k\}. \quad (7)$$

Відповідно шукані параметри визначаються

$$F = \{D_{coil}, I_{coil}\}. \quad (8)$$

МП САЕ у точці P_i визначимо по закону Біо-Савара (1) як векторну суму МП прямолінійних ділянок компенсаційних обмоток

$$\vec{B}_{coil}(F, P_i) = \frac{\mu_0}{4\pi} \sum_k \left(i_k \sum_{n=1}^N \frac{\vec{D}_{k,n} \times \vec{R}_{k,n}}{R_{k,n}^3} \right), \quad (9)$$

де $\vec{D}_{k,n}$ – вектор що визначається координатами кінців n -го прямолінійного відрізка k -ї КО;

$\vec{R}_{k,n}$ – вектор спрямований від кінця n -го прямолінійного відрізка k -ї КО у точку спостереження P_i ;

$i_k = Im_k e^{-j(\omega t + \phi_k)}$ – струм k -ї КО.

Екрановане МП ТП визначається як

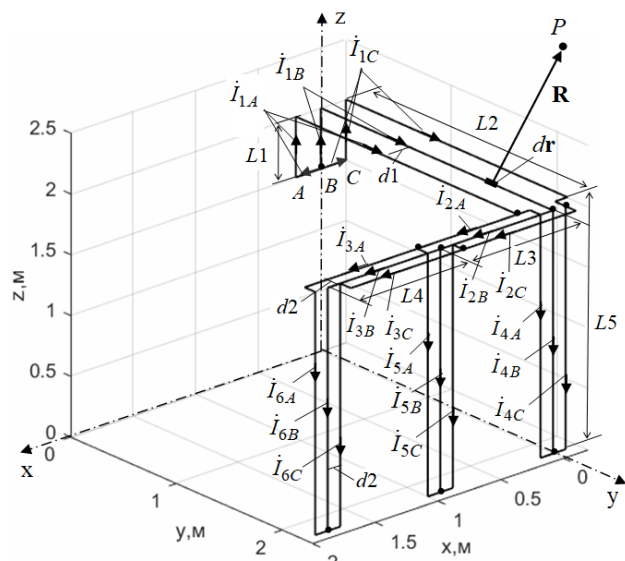
$$\vec{B}(F, P_i) = \vec{B}(P_i)_{\Sigma} + \vec{B}_{coil}(F, P_i). \quad (10)$$

Шукані параметри активного екрану визначаються [14] із

$$F^* = \arg \max_{P_i} \min_F |\vec{B}(F, P_i)|. \quad (11)$$

Для рішення (11) використовують багаточисельні методи оптимізації [7, 14], які впливають на час розрахунку.

Синтез САЕ для ТП 100 кВА. Вихідні данні: МП ТП з одним трансформатором потужністю 100 кВА моделюється її низьковольтним струмопроводом з геометричними розмірами приведеними на рис. 3. ($d1 = 0,16$ м $d2 = 0,05$ м, $L1 = 0,5$ м, $L2 = 2,1$ м, $L3 = L4 = 0,8$ м, $L5 = 2$ м).



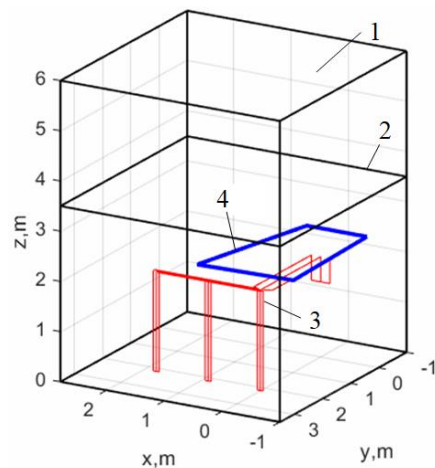
$d1, d2$ – міжфазні відстані;
 $L1-L5$ – довжина прямолінійних ділянок
 Рис. 3. Низьковольтний струмопровід ТП 6(10)/0,4 кВ

Оцінку рівня МП проводимо на поверхні підлоги приміщення, що має максимальне МП у приміщенні. Номінальна величина діючого значення струмів струмопроводу: $I_n = 150$ А; $I_1 = I_n$; $I_2 = 2/3 I_n$; $I_3 = I_4 = I_5 = I_6 = 1/3 I_n$.

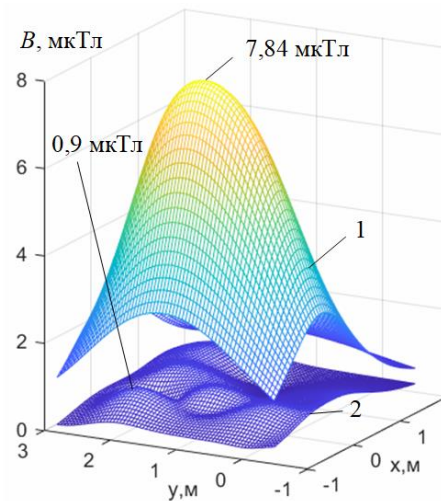
САЕ реалізуємо з однією компенсаційною обмоткою (КО) (рис. 4). Визначимо ефективність активного екранування однією КО при відстані $hf = 1$ м (рис. 2) від струмопроводу до підлоги.

Розраховане значення індукції вихідного МП ТП на підлозі показано на рис. 5. Максимальне значення індукції МП становить 7,84 мкТл, що перевищує нормативний рівень для населення [5] у 15,6 рази.

За методикою (6–11), виконано синтез системи активного екранування та отримані наступні параметри її КО (рис. 2): Координати кутів КО: $x_1 = -0,455$ м; $x_2 = -0,605$ м; $x_3 = 0,807$ м; $x_4 = 0,21$ м; $y_1 = -0,28$ м; $y_2 = 2,206$ м; $y_3 = 2,478$ м; $y_4 = -0,311$ м; Відстань між КО та струмопроводом; $hk = 0,201$ м; Ампер-витки КО; $IW = 37,23$ А; Фазовий зсув струму КО відносно фази В; $\varphi = 1,597$ рад.



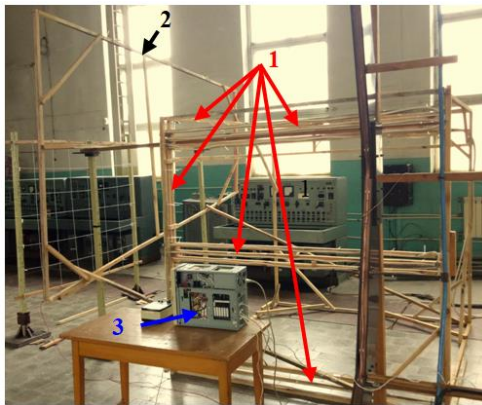
1 – житлове приміщення; 2 – підлога;
 3 – струмопровід ТП 0,4 кВ; 4 – КО САЕ
 Рис. 4. Розташування житлового приміщення, ТП та КО САЕ



1 – вихідний, 2 – екранований
 Рис. 5. Розподіл індукції МП ТП 100 кВА $I = 150$ А на підлозі приміщення ($hf = 1$ м)

Розраховане значення індукції екранованого МП ТП на підлозі при $hf = 1$ м. (рис. 5) показує, що рівень МП у приміщенні зменшився до 0,9 мкТл. Розрахункова ефективність екранування складає $SF = 8,7$ одиниць.

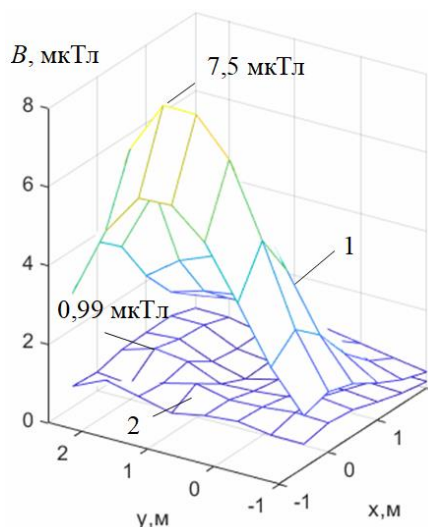
Експериментальна перевірка САЕ для ТП 100 кВА. Для проведення експериментальних досліджень ефективності активного екранування розроблено лабораторний макет трифазного низьковольтного струмопроводу ТП 6/0,4 кВ, 100 кВА у масштабі 1:1 з лабораторним макетом САЕ (рис. 6).



1 – струмопровід низької напруги ТП; 2 – компенсаційна обмотка САЕ; 3 – система управління САЕ

Рис. 6. Лабораторний макет струмопроводу низької напруги ТП 10/0,4 кВ, 100 кВА, $I = 150$ А з лабораторним макетом САЕ

На рис. 7 представлені результати вимірів індукції екранованого МП ТП на підлозі при $hf = 1$ м. Максимальне значення індукції МП при використанні активного екрану складає 0,99 мкТл. Ефективність екранування складає $SF = 7,6$ одиниць.



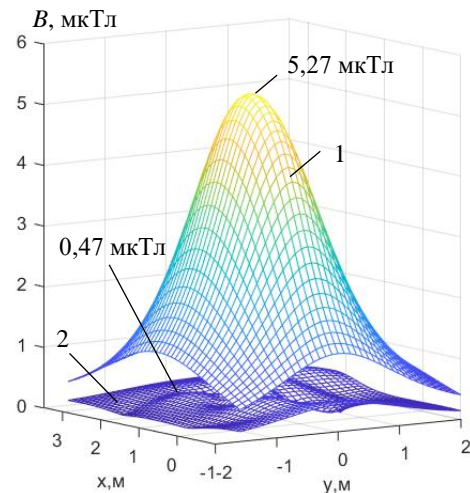
1 – вихідний; 2 – екранований

Рис. 7. Експериментально визначений розподіл індукції МП ТП 100 кВА $I = 150$ А на підлозі приміщення ($hf = 1$ м) при використанні САЕ

Порівняння результатів розрахунку екранованого МП (рис. 5) з результатами вимірів (рис. 7) показує, що їх розкид не перевищує 10 %, що підтверджує коректність запропонованої методики синтезу САЕ МП ТП (6–11).

Дослідження ефективності САЕ для ТП 100–400 кВА. Розглянемо варіанти зменшення МП ТП потужністю 100–400 кВА у житловому приміщенні, розташованого зверху над ТП (рис. 2) при різних відстанях hf до його підлоги.

Визначимо ефективність САЕ для ТП 100 кВА на відстані $hf = 1,2$ м, де максимальне значення індукції МП ТП становить 5,27 мкТл (рис. 8).

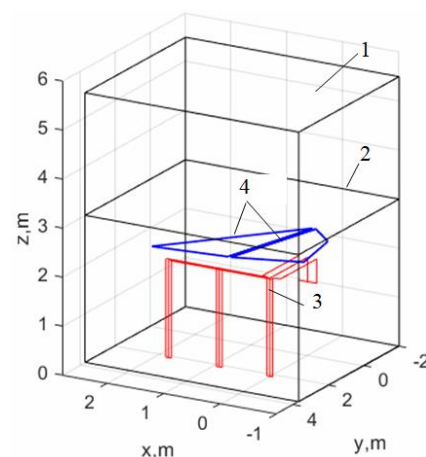


1 – вихідний; 2 – екранований САЕ з однією КО
Рис. 8. Розподіл індукції МП ТП 100 кВА $I = 150$ А на підлозі приміщення ($hf = 1,2$ м) при використанні САЕ

САЕ реалізуємо з однією КО (рис. 4) з наступними параметрами. Координати кутів КО: $x_1 = -0,529$ м; $x_2 = -0,579$ м; $x_3 = 0,858$ м; $x_4 = 0,283$ м; $y_1 = -0,302$ м; $y_2 = 2,245$ м; $y_3 = 2,494$ м; $y_4 = -0,383$ м; Відстань між КО та струмопроводом; $hk = 0,205$ м; Ампер-витки КО; $IW = 34,35$ А; Фазовий зсув струму КО відносно фази В; $\varphi = 1,5697$ рад.

Синтезована САЕ зменшила рівень МП у приміщенні до 0,47 мкТл та має ефективність екранування $SF = 11$ одиниць.

Визначимо ефективність САЕ для ТП 100 кВА на відстані $hf = 1,0$ м, де максимальне значення індукції МП ТП становить 7,8 мкТл (рис. 5). САЕ реалізуємо з двома КО (рис. 9).



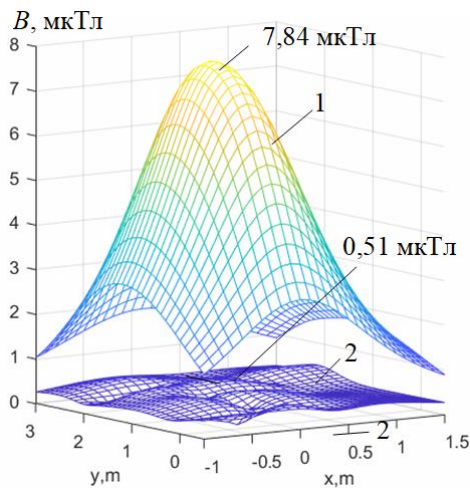
1 – житлове приміщення; 2 – підлога;
3 – струмопровід ТП 0,4 кВ; 4 – КО САЕ

Рис. 9. Розташування житлового приміщення, ТП та КО САЕ

САЕ має наступні параметри: КО1, координати кутів: $x_{11} = -0,3297$ м; $x_{12} = -0,5085$ м; $x_{13} = 0,5828$ м; $x_{14} = 0,1317$ м; $y_{11} = -0,0002$ м; $y_{12} = 1,9382$ м; $y_{13} = 2,5935$ м; $y_{14} = -0,7856$ м; $hk = 0,2$ м; Ампер-витки КО; $IW_1 = 31,34$ А; Фазовий зсув струму КО відносно фази В; $\varphi_1 = 1,5776$ рад.

КО2, координати кутів: $x_{21} = 1,8392$ м; $x_{22} = 0,5$ м; $x_{23} = 0,1317$ м; $x_{24} = 0,5828$ м; $y_{21} = 2,8827$ м; $y_{22} = 0$ м; $y_{23} = -0,7856$ м; $y_{24} = 2,5935$ м; $hk = 0,2$ м; Ампер-витки КО; $IW2 = 2,62$ А; Фазовий зсув струму КО відносно фази В; $\varphi_2 = 1,6617$ рад.

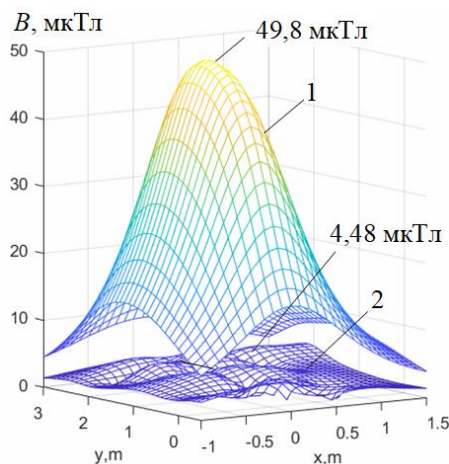
Синтезована САЕ з двома КО зменшила рівень МП у приміщенні до $0,51$ мкТл (рис. 10) та має ефективність екранування $SF = 15$ одиниць.



1 – вихідний; 2 – екранований САЕ з двома КО

Рис. 10. Розподіл індукції МП ТП 100 кВА $I = 150$ А на підлозі приміщення ($hf = 1,0$ м) при використанні САЕ

Розглянемо САЕ з двома КО для ТП 400 кВА. Результати розрахунку МП ТП 400 кВА та МП екранованого САЕ на відстані $hf = 0,8$ м, (рис. 11) показали наступне:

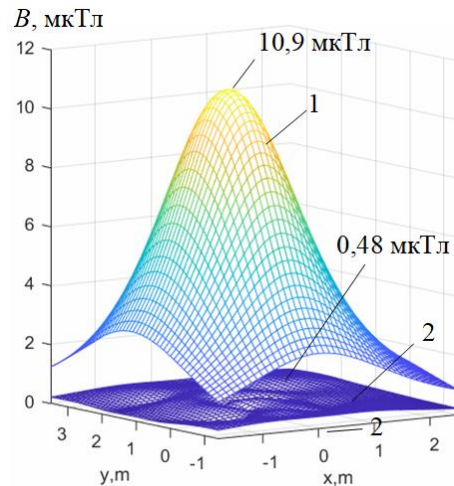


1 – вихідний; 2 – екранований САЕ з двома КО

Рис. 11. Розподіл індукції МП ТП 400 кВА $I = 600$ А на підлозі приміщення ($hf = 0,8$ м) при використанні САЕ

Максимальне вихідне значення індукції МП ТП 400 кВА становить $49,8$ мкТл, що перевищує гранично допустимий рівень індукції МП ($0,5$ мкТл) у 100 разів; Максимальне екрановане значення індукції МП ТП 400 кВА при використанні САЕ з двома КО становить $4,48$ мкТл. При цьому САЕ має ефективність екранування $SF = 11$ одиниць.

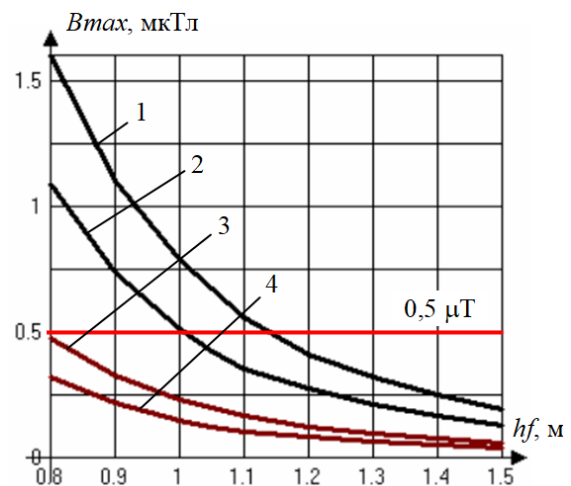
Результати розрахунку МП ТП 400 кВА та МП екранованого САЕ на відстані $hf = 1,6$ м, (рис. 12) показали наступне: максимальне значення індукції МП ТП 400 кВА становить $10,9$ мкТл; максимальне значення індукції МП ТП 400 кВА екрановане САЕ з двома КО зменшилося до $0,48$ мкТл. Синтезована САЕ має ефективність екранування $SF = 22$ одиниць.



1 – вихідний; 2 – екранований САЕ з двома КО

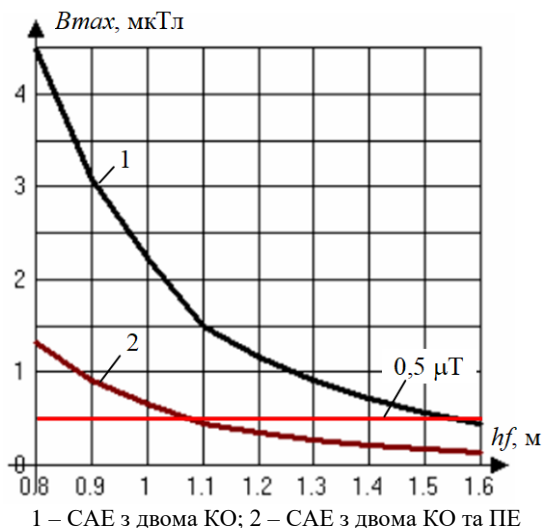
Рис. 12. Розподіл індукції МП ТП 400 кВА $I = 600$ А на підлозі приміщення ($hf = 1,6$ м) при використанні САЕ

Узагальнені результати досліджень ефективності САЕ, приведених на рис. 5, 8, 10, 11, 12 та інших САЕ синтезованих при $hf = [0,8-1,5]$ м, представлені на рис. 13, 14 у вигляді графіків.



1 – САЕ з однією КО; 2 – САЕ з двома КО; 3 – САЕ з однією КО та ПЕ; 4 – САЕ з двома КО та ПЕ

Рис. 13. Екрановані максимальні рівні індукції МП ТП 100 кВА у житловому приміщенні при використанні САЕ



1 – САЕ з двома КО; 2 – САЕ з двома КО та ПЕ

Рис. 14. Екрановані максимальні рівні індукції МП ТП 400 кВА у житловому приміщенні при використанні САЕ та ПЕ

Аналіз результатів досліджень показує наступне:

Нормалізація МП на поверхні підлоги для ТП 100 кВА (рис. 13) з допомогою синтезованої САЕ з однією КО можлива на відстанях не менш 1,15 м від ТП, з двома КО - не менш 1,02 м від ТП.

При відстані 0,8 м від ТП гранично допустимий рівень індукції МП (0,5 мкТл) перевищений в 2,2–3,2 рази.

Нормалізація МП на поверхні підлоги для ТП 400 кВА (рис. 14) з допомогою синтезованої САЕ з двома КО можлива тільки при відстані від ТП не менш 1,6 м. При відстані 0,8 м гранично допустимий рівень індукції МП (0,5 мкТл) перевищений в 9 разів.

Подальше зменшення рівня МП ТП у приміщенні можливе при комбінованому екрануванні (рис. 2) [14]. Так, як показано на основі експерименту, комбіноване використання синтезованих САЕ з однією або двома КО та ПЕ з алюмінієвого листа товщиною 4 мм ($SF = 3,4$) дозволяє зменшити МП над вбудованою ТП 100 кВА до нормативного рівня (0,5 мкТл) (рис. 13).

Для ТП 400 кВА (рис. 14) комбіноване використання синтезованих двоканальних САЕ та ПЕ з алюмінієвого листа товщиною 4 мм ($SF = 3,4$) дозволяє зменшити МП до нормативного рівня (0,5 мкТл) при обмеженні відстані від ТП до підлоги приміщень не менш 1,08 м.

Висновки.

1. Запропоновано модифікований метод синтезу систем активного екранування магнітного поля трансформаторних підстанцій при малих (0,8–1,5 м) відстанях від підстанції до підлоги приміщення, та проведена його експериментальна перевірка на повномасштабному фізичному макеті трансформаторної підстанції 100 кВА з фізичним макетом синтезованої системи активного екранування, що підтвердила співпадіння результатів моделювання (синтезу) та експерименту з похибкою не більш 10 %.

2. Показано, що нормалізація магнітного поля на поверхні підлоги для трансформаторної підстанції

100 кВА з допомогою синтезованої системи активного екранування з однією компенсаційною обмоткою можлива на відстанях не менш 1,15 м від підстанції, а з двома обмотками - не менш 1,02 м від підстанції. При відстані 0,8 м від трансформаторної підстанції гранично допустимий рівень індукції магнітного поля (0,5 мкТл) перевищений в 2,2–3,2 рази.

3. Показано, що нормалізація магнітного поля на поверхні підлоги для трансформаторної підстанції 400 кВА з допомогою синтезованої системи активного екранування з двома компенсаційними обмотками можлива тільки при відстані від підстанції не менш 1,6 м. При відстані 0,8 м гранично допустимий рівень індукції магнітного поля (0,5 мкТл) перевищений в 9 разів.

4. Комбіноване використання синтезованих двоканальних систем активного екранування та пасивного плоского електромагнітного екрану з алюмінієвого листа товщиною 4 мм ($SF = 3,4$) дозволяє зменшити магнітне поле над вбудованою трансформаторною підстанцією потужністю від 100 до 400 кВА до нормативного рівня (0,5 мкТл) при обмеженні відстані від підстанції до підлоги приміщень не менш 1,08 м і забезпечує захист здоров'я населення від впливу магнітного поля промислової частоти. При менших відстанях необхідно використання більш ефективних пасивних електромагнітних (магнітостатичних) екранів

Список літератури

1. Grbic M., Canova A., Giaccone L. Magnetic field in an apartment located above 10/0.4 kV substation: levels and mitigation techniques. *CIREN – Open Access Proceedings Journal*, 2017. no. 1. pp. 752–756. doi: <https://doi.org/10.1049/oap-cired.2017.1230>.
2. Thuroczy G., Janossy G., Nagy N., Bakos J., Szabo J., Mezei G. Exposure to 50 Hz magnetic field in apartment buildings with built-in transformer stations in Hungary. *Radiation protection dosimetry*, 2008. vol. 131. no. 4. pp. 469–473. doi: <https://doi.org/10.1093/tpd/ncn199>.
3. Okokon E. O., Roivainen P., Kheifets L., Mezei G., Juutilainen J. Indoor transformer stations and ELF magnetic field exposure: use of transformer structural characteristics to improve exposure assessment. *Journal of exposure science & environmental epidemiology*, 2014. vol. 4. no. 1. pp. 100–104. doi: <https://doi.org/10.1038/jes.2013.54>.
4. Navarro-Camba E. A., Segura-García J., Gomez-Perretta C. Exposure to 50 Hz Magnetic Fields in Homes and Areas Surrounding Urban Transformer Stations in Silla (Spain): Environmental Impact Assessment. *Sustainability*, 2018. vol. 10. no. 8. p. 2641. doi: <https://doi.org/10.3390/su10082641>.
5. *Правила улаштування електроустановок*. Видання офіційне. Міненергвуллія України. Харків: Видавництво «Форт», 2017. 760 с.
6. Alotto P., Guarnieri M., Moro F., Turri R. Mitigation of residential magnetic fields generated by MV/LV substations. *42nd International Universities Power Engineering Conference*, 2007, pp. 832–836. doi: <https://doi.org/10.1109/UPEC.2007.4469057>.
7. 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. no. 7. 1332 p. doi: <https://doi.org/10.3390/en12071332>.
8. 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. pp. 97–106.
9. del-Pino-Lopez J. C., Giaccone L., Canova A., Cruz-Romero P. Gabased active loop optimization for magnetic field mitigation of MV/LV substations. *IEEE Latin America Transactions*, 2014. vol. 12. no. 6. pp. 1055–1061.
10. del-Pino-López J., Giaccone L., Canova A., Cruz-Romero P. Design of active loops for magnetic field mitigation in MV/LV substation

- surroundings. *Electric Power Systems Research*, 2015. vol. 119. pp. 337–344.
11. Canova A., del-Pino-López J. C., Giaccone L., Manca M. Active Shielding System for ELF Magnetic Fields. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2015. vol. 51. no. 3. pp. 1–4. doi: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2014.2354515>.
 12. Розов В. Ю., Ткаченко А. О., Ерисов А. В., Гринченко В. С. Аналитический расчет магнитного поля трехфазных кабельных линий при двухстороннем замыкании собственных экранов кабелей. *Технічна електродинаміка*, 2017. № 2. С. 13–18. doi: <https://doi.org/10.15407/techned2017.02.013>.
 13. Розов В. Ю. *Внешние магнитные поля силового электрооборудования и методы их уменьшения*. Препр. НАН Украины. Институт электродинамики, № 772. Київ. 1995. 42 с.
 14. Kuznetsov B. I., Nikitina T. B., Bovdii I. V., Chunikhin K. V., Kolomiets V. V., & Kobylanskiy B. B. The method for design of combined electromagnetic shield for overhead power lines magnetic field. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2024. no. 3. pp. 22–30. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2024.3.03>.
 15. Кузнецов Б. И., Пелевин Д. Е., Бовдуй И. В., Котляров Д. А. Синтез системы активного экранирования магнитного поля промышленной частоты. *Технічна електродинаміка*, 2012. № 2. С. 131–132.
 16. Rozov V. Y., Kundius K. D., Pelevin D. Y. Active shielding of external magnetic field of built-in transformer substations. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2020. no. 3. pp. 24–30. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2020.3.04>.
 17. Кундіус К. Д. Аналіз ефективності активного екранування зовнішнього магнітного поля вбудованих трансформаторних підстанцій потужністю до 1260 кВА. *Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит*, 2022. № 12. С. 50–62. doi: <https://doi.org/10.20998/2313-8890.2022.11.05>.
 18. 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>.
 19. Несторенко А. Д. *Введение в теоретическую электротехнику*. Київ: Наукова думка, 1969. 351 с.
 20. Simonyi K. *Theoretische elektrotechnik*. Berlin: VEB Deutscher Verlag der Wissen, 1979. 980 p. (in German).
 21. Smythe W. R. *Static and Dynamic Electricity*. McGraw-Hill, New York, 1968. 623 p.
 5. *Pravy`la ulashtuvannya elektroustanovok*. Vy`dannya oficijne. Minenergovugillya Ukrainy`. Kharkiv: Vy`davny`ctvo «Fort», 2017. 760 p.
 6. Alotto P., Guarnieri M., Moro F., Turri R. Mitigation of residential magnetic fields generated by MV/LV substations. *42nd International Universities Power Engineering Conference*, 2007, pp. 832–836. doi: <https://doi.org/10.1109/UPEC.2007.4469057>.
 7. Bravo-Rodriguez 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. no. 7. 1332 p. doi: <https://doi.org/10.3390/en12071332>.
 8. 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. pp. 97–106.
 9. del-Pino-Lopez J. C., Giaccone L., Canova A., Cruz-Romero P. Gabbased active loop optimization for magnetic field mitigation of MV/LV substations. *IEEE Latin America Transactions*, 2014. vol. 12. no. 6. pp. 1055–1061.
 10. del-Pino-López J., Giaccone L., Canova A., Cruz-Romero P. Design of active loops for magnetic field mitigation in MV/LV substation surroundings. *Electric Power Systems Research*, 2015. vol. 119. pp. 337–344.
 11. Canova A., del-Pino-López J. C., Giaccone L., Manca M. Active Shielding System for ELF Magnetic Fields. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2015. vol. 51. no. 3. pp. 1–4. doi: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2014.2354515>.
 12. Rozov V. Yu., Tkachenko A. O., Erisov A. V., Grinchenko V. S. Analiticheskiy raschet magnitnogo polya trehfaznykh kabelnykh liniy pri dvuhstoronnem zamyikanii sobstvennykh ekranov kabeley. *Tekhnichna elektrody`namika*. 2017. № 2. pp. 13–18. doi: <https://doi.org/10.15407/techned2017.02.013>.
 13. Rozov V. Yu. Vneshnie magnitnyie polya silovogo elektrooborudovaniya i metody ih umensheniya. *KiYiv*. 1995. 42 s. (Prepr. NAN Ukrainy. Intitut elektrodinamiki, no. 772).
 14. Kuznetsov B. I., Nikitina T. B., Bovdii I. V., Chunikhin K. V., Kolomiets V. V., & Kobylanskiy B. B. The method for design of combined electromagnetic shield for overhead power lines magnetic field. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2024. no. 3. pp. 22–30. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2024.3.03>.
 15. Kuznetsov B. I., Pelevin D. Y., Bovdii I. V., Kotliarov D. A. Active screening of industrial frequency magnetic field system synthesis. *Tekhnichna elektrody`namika*, 2012. № 2. pp. 131–132.
 16. Rozov V. Y., Kundius K. D., Pelevin D. Y. Active shielding of external magnetic field of built-in transformer substations. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2020. no. 3. pp. 24–30. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2020.3.04>.
 17. Kundius K. D. Analiz efekty`vnosti akty`vnogo ekranuvannya zovnishn`ogo magnitnogo polya vbudovany`x transformatory`x pidstanciy potuzhnisty do 1260 kVA. *Energozberezheniya. Energety`ka. Energoaudyt*. 2022. no. 12. pp. 50–62. doi: <https://doi.org/10.20998/2313-8890.2022.11.05>.
 18. 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>.
 19. Nesterenko A. D. *Vvedenie v teoreticheskuyu elektrotehniku*. Kyiv: Naukova Dumka Publishing, 1969, 351 p. (in Russian).
 20. Simonyi K. *Theoretische elektrotechnik*. Berlin: VEB Deutscher Verlag der Wissen, 1979, 980 p. (in German).
 21. Smythe W. R. *Static and Dynamic Electricity*. McGraw-Hill, New York, 1968, 623 p.

References (transliterated)

1. Grbic M., Canova A., Giaccone L. Magnetic field in an apartment located above 10/0.4 kV substation: levels and mitigation techniques. *CIREN – Open Access Proceedings Journal*, 2017. no. 1. pp. 752–756. doi: <https://doi.org/10.1049/oap-cired.2017.1230>.
2. Thuroczy G., Janossy G., Nagy N., Bakos J., Szabo J., Mezei G. Exposure to 50 Hz magnetic field in apartment buildings with built-in transformer stations in Hungary. *Radiation protection dosimetry*, 2008. vol. 131. no. 4. pp. 469–473. doi: <https://doi.org/10.1093/rpd/ncn199>.
3. Okokon E. O., Roivainen P., Kheifets L., Mezei G., Juutilainen J. Indoor transformer stations and ELF magnetic field exposure: use of transformer structural characteristics to improve exposure assessment. *Journal of exposure science & environmental epidemiology*, 2014. vol. 4. no. 1. pp. 100–104. doi: <https://doi.org/10.1038/jes.2013.54>.
4. Navarro-Camba E. A., Segura-García J., Gomez-Perretta C. Exposure to 50 Hz Magnetic Fields in Homes and Areas Surrounding Urban Transformer Stations in Silla (Spain): Environmental Impact Assessment. *Sustainability*, 2018. vol. 10. no. 8. p. 2641. doi: <https://doi.org/10.3390/su10082641>.

Nadiiusha (received) 10.05.2024

Vidomosti pro avtoriv / About the authors

Пелевін Дмитро Євгенович (Pelevin Dmytro Yevhenovych) – кандидат технічних наук, старший дослідник, Інститут енергетичних машин і систем ім. А.М. Підгорного Національної академії наук України; завідувач лабораторії відділу магнетизму технічних об'єктів, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1413-2114>; e-mail: pelevindmitro@ukr.net