

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

РОЗРАХУНОК МАГНІТНОГО ПОЛЯ НИЗЬКОВОЛЬТНОГО СТРУМОПРОВОДУ ВБУДОВАНОЇ ТРАНСФОРМАТОРНОЇ ПІДСТАНЦІЇ

Вбудовані трансформаторні підстанції є джерелом небезпечного для здоров'я населення магнітного поля промислової частоти у наближених до них житлових приміщеннях, що потребує його зменшення до діючих санітарних норм. Рішення задачі зменшення магнітного поля вбудованих трансформаторних підстанцій, в першу чергу, потребує наявності коректної і необтяжливої аналітичної методики інженерного розрахунку індукції магнітного поля, яке створюється над підстанцією. Але існуюча методика, що виконана на основі мультидипольної математичної моделі, має методичне обмеження мінімальної відстані між струмопроводом підстанції та розрахунковою зоною і тому потребує удосконалення. Метою роботи є розробка аналітичної методики розрахунку магнітного поля поблизу низьковольтного струмопроводу вбудованої у житловий будинок трансформаторної підстанції 6(10)/0,4 кВ старої забудови, що не має обмежень з відстані до розрахункової зони. Використовуючи закон Біо-Савара та принцип суперпозиції побудовано математичну модель магнітного поля окремих прямолінійних ділянок струмопроводу, та розроблено аналітичну методику розрахунку магнітного поля низьковольтного струмопроводу трансформаторної підстанції, що визначає індукцію її магнітного поля в цілому. Здійснено верифікацію розробленої методики розрахунку магнітного поля шляхом експериментальних досліджень на магнітовимірювальному стенді інституту повномасштабного лабораторного макету низьковольтного струмопроводу трансформаторної підстанції потужністю 100 кВА, які підтвердили співпадіння результатів розрахунку та експерименту з розкидом не більше 5 %. Виявлено характер розподілу магнітного поля над трифазним низьковольтним струмопроводом, який близький до дипольного, що визначає можливість його ефективного зменшення простішими системами активного екранування з однією компенсаційною обмоткою. Планується широке застосування розробленої методики при створенні нових методів та засобів зменшення до безпечного для населення рівня магнітного поля діючих вбудованих трансформаторних підстанцій 6(10)/0,4 кВ потужністю 100–1260 кВА.

Ключові слова: вбудована трансформаторна підстанція; низьковольтний струмопровід; магнітне поле.

Вступ. Одним із найбільш потужних джерел небезпечного для здоров'я населення магнітного поля (МП) промислової частоти є діючі трансформаторні підстанції (ТП) 6/10 кВ потужністю від 100 до 1260 кВА, що вбудовані в житлові будинки старої забудови [1–7]. Всі ТП створюють в наближених до них житлових приміщеннях, розміщених над ТП (рис. 1), небезпечне МП з індукцією біля 10 мкТл [1, 8–13], що відповідно до діючих санітарних норм (0,5 мкТл) [14, 15] потребує його зменшення на підлогах житлових приміщень більш чим на порядок.



Рисунок 1 – Типовий житловий будинок старої забудови із вбудованою ТП 6/0,4 кВ

Зменшення МП вбудованих ТП може бути забезпечене засобами екранування [2–7, 16–25]. Однак їх реалізація, в першу чергу, потребує наявності коректної і необтяжливої аналітичної методики інженерного розрахунку індукції МП, яке створюється

над ТП (рис. 1), яка на відміну від чисельних методів [10, 26] не вимагає використання складних комп'ютерних програм та їх професійної реалізації.

Така методика запропонована в [1]. Вона заснована на обґрунтованому заміщенні ТП, як джерела МП, його низьковольтним струмопроводом, та виконанні розрахунку індукції МП на основі мультидипольної математичної моделі цього струмопроводу. Але використання мультидипольної моделі призводить до методичного обмеження мінімальної відстані між струмопроводом ТП і розрахунковою зоною значеннями на рівні 1 м [1]. Це не дозволяє виконувати розрахунок МП поблизу (на відстанях 0,5–1 м) від підлог житлових приміщень, розташованих над вбудованими ТП (А, рис. 1). Тому існуюча [1] аналітична методика розрахунку індукції МП струмопроводу вбудованих ТП потребує удосконалення.

Метою статті є розробка аналітичної методики розрахунку магнітного поля поблизу низьковольтного струмопроводу вбудованої у житловий будинок трансформаторної підстанції 6(10)/0,4 кВ старої забудови, що не має обмежень з відстані до розрахункової зони.

Математична модель МП поблизу трифазного струмопроводу ТП. Моделювання виконуємо для типового низьковольтного струмопроводу (рис. 2) ТП 6(10)/0,4 кВ з використанням закону Біо-Савара [10, 14, 27–30], що не обмежує відстань до розрахункової зони, а також принципу суперпозиції. При цьому МП у точці спостереження $P(x,y,z)$ визначається векторною сумою МП від кожної з прямолінійних ділянок струмопроводу (рис. 2).

© Д. Є. Пелевін, 2024



Ця робота ліцензується відповідно до **Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)**
Конфлікт інтересів: Автор заявив про відсутність конфлікту

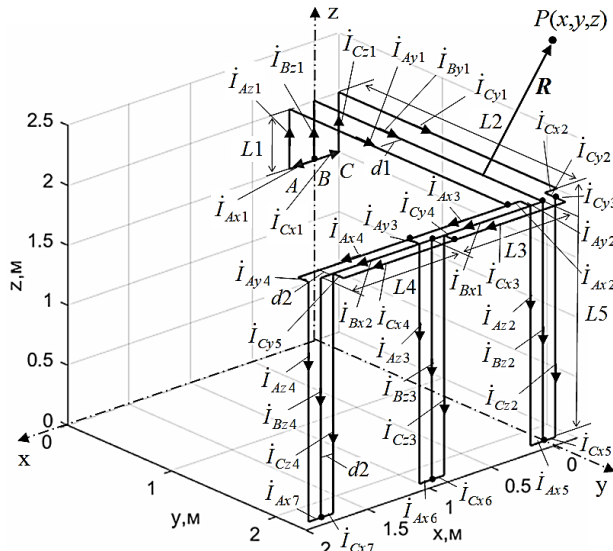


Рисунок 2 – Типовий трифазний низьковольтний струмопровід ТП 6(10)/0,4 кВ:

$d1, d2$ – міжфазні відстані;

$L1-L5$ – довжина прямолінійних ділянок;

$i_{Ax(1-7)}, i_{Bx(1,2)}, i_{Cx(1-7)}, i_{Ay(1-4)}, i_{By1}, i_{Cy(1-5)}, i_{Az(1-4)}, i_{Bz(1-4)}, i_{Cz(1-4)}$ – струм у прямолінійних ділянках

При побудові моделі приймаємо наступні припущення. Всі прямолінійні ділянки трифазного струмопроводу ТП зорієнтовані паралельно координатним осям (рис. 2) і моделюються струмовими нитками; струми фаз струмопроводу симетричні і синусоїдальні з частотою 50 Гц, квазістаціонарне МП струмопроводу є тривимірним; впливом зовнішніх феромагнітних (електропровідних) елементів та джерел МП нехтуємо.

Відповідно до закону Біо-Савара [14, 27–30], МП контуру A зі струмом I визначається як:

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_A \frac{[d\mathbf{l} \times \mathbf{R}]}{R^3}; \quad (1)$$

де $\mathbf{R}$ – вектор, спрямований від елементарного контуру $d\mathbf{l}$ у точку спостереження $P(x,y,z)$;

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м.}$$

Для побудови загальної математичної моделі МП струмопроводу необхідно окремо визначити просторові компоненти індукції МП, які створюються кожної з прямолінійних ділянок $L1-L5$ струмопроводу (рис. 2). Визначимо просторові компоненти індукції МП для ділянок струмопроводу, що зорієнтовані паралельно окремим координатним осям X, Y, Z .

Індукція МП ділянки струмопроводу, що паралельна осі Z . Визначимо МП прямолінійної ділянки струмопроводу між точками $A_n(x_0, y_0, Z_2)$ і $A_k(x_0, y_0, Z_1)$, що представлена на рис. 3.

Елемент контуру $d\mathbf{l}$ з координатами (x_0, y_0, η) визначається як:

$$d\mathbf{l} = d\eta \mathbf{e}_z, \quad Z_1 \leq \eta \leq Z_2. \quad (2)$$

Векторний добуток:

$$[d\mathbf{l} \times \mathbf{R}] = \begin{vmatrix} \mathbf{e}_x & \mathbf{e}_y & \mathbf{e}_z \\ 0 & 0 & d\eta \\ x - x_0 & y - y_0 & z - \eta \end{vmatrix} = -(y - y_0) d\eta \mathbf{e}_x + (x - x_0) d\eta \mathbf{e}_y; \quad (3)$$

де $\mathbf{R} = (x - x_0, y - y_0, z - \eta)$.

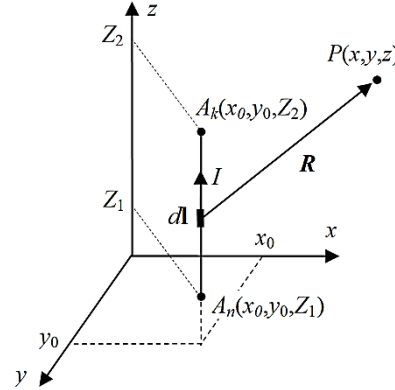


Рисунок 3 – До визначення просторових компонент індукції МП від ділянок струмопроводу, що паралельні осі Z

Відповідно до (3) компоненти індукції МП визначаються як:

$$\begin{aligned} B_{zx} &= \frac{-\mu_0 I}{4\pi} (y - y_0) \int_{Z_1}^{Z_2} \frac{d\eta}{R^3}; \\ B_{zy} &= \frac{\mu_0 I}{4\pi} (x - x_0) \int_{Z_1}^{Z_2} \frac{d\eta}{R^3}; \\ B_{zz} &= 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Тут

$$R^3 = [(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - \eta)^2]^{3/2},$$

а інтеграл в (4) вичислюється як [14]:

$$\begin{aligned} & \int_{Z_1}^{Z_2} \frac{d\eta}{R^3} = \\ &= \int_{Z_1}^{Z_2} \frac{d\eta}{[(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - \eta)^2]^{3/2}} = \\ &= \frac{1}{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} \times \\ & \times \left[\frac{Z_2 - z}{[(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - Z_2)^2]^{1/2}} - \frac{Z_1 - z}{[(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - Z_1)^2]^{1/2}} \right]. \end{aligned} \quad (5)$$

Позначимо:

$$\begin{aligned} Q(x_0, y_0, Z_i) &= \frac{Z_i - z}{[(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2]} \times \\ & \times \frac{1}{[(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (Z_i - z)^2]^{1/2}}; \end{aligned} \quad (6)$$

де $i = 1, 2$.

Тоді просторові компоненти індукції МП всіх прямолінійних ділянок струмопроводу (рис. 2), паралельних осі Z , можуть бути визначені співвідношеннями:

$$B_{z_x}(I, x_0, y_0, Z_{1,2}) = \frac{-\mu_0 I}{4\pi} (y - y_0) \times [Q(x_0, y_0, Z_2) - Q(x_0, y_0, Z_1)], \quad (7)$$

$$B_{z_y}(I, x_0, y_0, Z_{1,2}) = \frac{\mu_0 I}{4\pi} (x - x_0) \times [Q(x_0, y_0, Z_2) - Q(x_0, y_0, Z_1)]. \quad (8)$$

Індукція МП ділянки струмопроводу, що паралельна осі X . МП прямолінійної ділянки струмопроводу паралельній осі X (рис. 4 а) між точками $C_n(X_1, y_0, z_0)$ і $C_k(X_2, y_0, z_0)$ визначимо по аналогії з (2–8).

Тоді просторові компоненти індукції МП всіх прямолінійних ділянок струмопроводу (рис. 2), паралельних осі X , можуть бути визначені співвідношеннями:

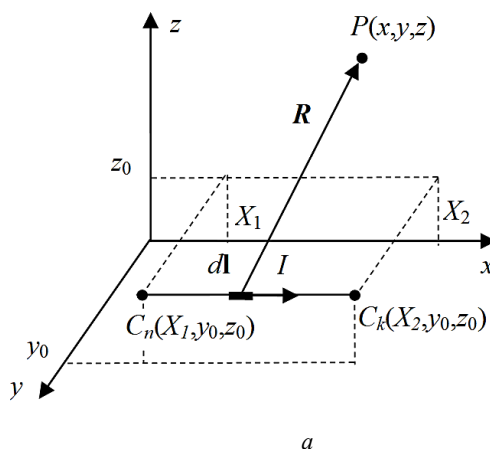
$$\begin{aligned} B_{x_y}(I, X_{1,2}, y_0, z_0) &= -\frac{\mu_0 I}{4\pi} (z - z_0) \times [F_x(X_2, y_0, z_0) - F_x(X_1, y_0, z_0)]; \\ B_{x_z}(I, X_{1,2}, y_0, z_0) &= -\frac{\mu_0 I}{4\pi} (y - y_0) \times [F_x(X_2, y_0, z_0) - F_x(X_1, y_0, z_0)]. \end{aligned} \quad (9)$$

Тут

$$F_x(X_i, y_0, z_0) = \frac{X_i - x}{((y - y_0)^2 + (z - z_0)^2)^{1/2}} \times \frac{1}{[(y - y_0)^2 + (z - z_0)^2 + (X_i - x)^2]^{1/2}};$$

де $i = 1, 2$.

Індукція МП ділянки струмопроводу, що паралельна осі Y . МП прямолінійної ділянки струмопроводу, паралельній осі Y (рис. 4 б) між точками $D_n(x_0, Y_1, z_0)$ і $D_k(x_0, Y_2, z_0)$, також визначимо по аналогії з (2–8).



$$\begin{aligned} B_{y_x}(I, x_0, Y_{1,2}, z_0) &= \frac{\mu_0 I}{4\pi} (z - z_0) \times [F_y(x_0, Y_2, z_0) - F_y(x_0, Y_1, z_0)]; \\ B_{y_z}(I, x_0, Y_{1,2}, z_0) &= -\frac{\mu_0 I}{4\pi} (x - x_0) \times [F_y(x_0, Y_2, z_0) - F_y(x_0, Y_1, z_0)]. \end{aligned} \quad (10)$$

Тут

$$F_y(x_0, Y_i, z_0) = \frac{Y_i - y}{((x - x_0)^2 + (z - z_0)^2)^{1/2}} \times \frac{1}{[(x - x_0)^2 + (z - z_0)^2 + (Y_i - y)^2]^{1/2}},$$

де $i = 1, 2$.

Отримані співвідношення (6–10) представляють собою математичні моделі МП різноспрямованих ділянок струмопроводу ТП. На основі цих моделей може бути побудована аналітична методика розрахунку МП низьковольтного струмопроводу ТП, представленого на рис. 2, та отримані відповідні розрахункові співвідношення.

Розрахункові співвідношення для визначення індукції МП струмопроводу ТП. Використаємо отриману математичну модель МП ділянок струмопроводу ТП (6–10) та принцип суперпозиції для отримання шуканих розрахункових співвідношень з визначення індукції МП реального струмопроводу ТП (рис. 2).

Магнітне поле трифазного струмопроводу у точці P може бути визначено як векторна сума МП від прямолінійних ділянок фазних струмопроводів А, В, С зі струмами I_A, I_B, I_C , де:

$$\begin{aligned} I_A &= I_m e^{-j(\omega t + \frac{2\pi}{3})}; \\ I_B &= I_m e^{-j\omega t}; \\ I_C &= I_m e^{-j(\omega t - \frac{2\pi}{3})}. \end{aligned} \quad (11)$$

де I_m – амплітуда струму;

ω – кутова частота;

t – час.

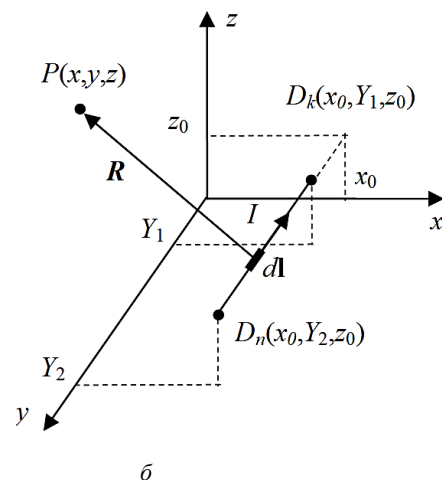


Рисунок 4 – До визначення просторових компонент індукції МП від ділянок струмопроводу, паралельних осі X (а), та осі Y (б)

Тоді для фази А струмопроводу зі струмом I_A компоненти індукції МП відповідно до (6–11) можуть бути представлені у вигляді:

$$\begin{aligned}\dot{B}_x(I_A) &= \sum_n^N \dot{B}_{zx}(I_{Az,n}, x_{0,n}, y_{0,n}, Z_{1,2,n}) + \\ &+ \sum_k^K \dot{B}_{yx}(I_{Ay,k}, x_{0,k}, Y_{1,2,k}, z_{0,k}); \\ \dot{B}_y(I_A) &= \sum_n^N \dot{B}_{zy}(I_{Az,n}, x_{0,n}, y_{0,n}, Z_{1,2,n}) + \\ &+ \sum_v^V \dot{B}_{xy}(I_{Ax,v}, X_{1,2,v}, y_{0,v}, z_{0,v}); \\ \dot{B}_z(I_A) &= \sum_v^V \dot{B}_{xz}(I_{Ax,v}, X_{1,2,v}, y_{0,v}, z_{0,v}) + \\ &+ \sum_k^K \dot{B}_{yz}(I_{Ay,k}, x_{0,k}, Y_{1,2,k}, z_{0,k});\end{aligned}\quad (12)$$

де $I_{Az,n}, x_{0,n}, y_{0,n}, Z_{1,2,n}$ – струм та координати кінців n -ї прямолинійної ділянки паралельної осі Z;

$I_{Ay,k}, x_{0,k}, Y_{1,2,k}, z_{0,k}$ – струм та координати кінців k -ї прямолинійної ділянки паралельної осі Y;

$I_{Ax,v}, X_{1,2,v}, y_{0,v}, z_{0,v}$ – струм та координати кінців v -ї прямолинійної ділянки, паралельної осі X;

N, K, V – кількість прямолинійних ділянок, паралельних осі Z, Y, X відповідно.

Для фази В струмопроводу компоненти індукції МП для зі струмом I_B відповідно до (6–11) можуть бути представлені у вигляді:

$$\begin{aligned}\dot{B}_x(I_B) &= \sum_n^N \dot{B}_{zx}(I_{Bz,n}, x_{0,n}, y_{0,n}, Z_{1,2,n}) + \\ &+ \sum_k^K \dot{B}_{yx}(I_{By,k}, x_{0,k}, Y_{1,2,k}, z_{0,k}); \\ \dot{B}_y(I_B) &= \sum_n^N \dot{B}_{zy}(I_{Bz,n}, x_{0,n}, y_{0,n}, Z_{1,2,n}) + \\ &+ \sum_v^V \dot{B}_{xy}(I_{Bx,v}, X_{1,2,v}, y_{0,v}, z_{0,v}); \\ \dot{B}_z(I_B) &= \sum_v^V \dot{B}_{xz}(I_{Bx,v}, X_{1,2,v}, y_{0,v}, z_{0,v}) + \\ &+ \sum_k^K \dot{B}_{yz}(I_{By,k}, x_{0,k}, Y_{1,2,k}, z_{0,k});\end{aligned}\quad (13)$$

де $I_{Bz,n}, x_{0,n}, y_{0,n}, Z_{1,2,n}$ – струм та координати кінців n -ї прямолинійної ділянки паралельної осі Z;

$I_{By,k}, x_{0,k}, Y_{1,2,k}, z_{0,k}$ – струм та координати кінців k -ї прямолинійної ділянки, паралельної осі Y;

$I_{Bx,v}, X_{1,2,v}, y_{0,v}, z_{0,v}$ – струм та координати кінців v -ї прямолинійної ділянки, паралельної осі X;

N, K, V – кількість прямолинійних ділянок, паралельних осі Z, Y, X відповідно.

Для фази С струмопроводу компоненти індукції МП для зі струмом I_C відповідно до (6–11) можуть бути представлені у вигляді:

$$\begin{aligned}\dot{B}_x(I_C) &= \sum_n^N \dot{B}_{zx}(I_{Cz,n}, x_{0,n}, y_{0,n}, Z_{1,2,n}) + \\ &+ \sum_k^K \dot{B}_{yx}(I_{Cy,k}, x_{0,k}, Y_{1,2,k}, z_{0,k}); \\ \dot{B}_y(I_C) &= \sum_n^N \dot{B}_{zy}(I_{Cz,n}, x_{0,n}, y_{0,n}, Z_{1,2,n}) + \\ &+ \sum_v^V \dot{B}_{xy}(I_{Cx,v}, X_{1,2,v}, y_{0,v}, z_{0,v}); \\ \dot{B}_z(I_C) &= \sum_v^V \dot{B}_{xz}(I_{Cx,v}, X_{1,2,v}, y_{0,v}, z_{0,v}) + \\ &+ \sum_k^K \dot{B}_{yz}(I_{Cy,k}, x_{0,k}, Y_{1,2,k}, z_{0,k});\end{aligned}\quad (14)$$

де $I_{Cz,n}, x_{0,n}, y_{0,n}, Z_{1,2,n}$ – струм та координати кінців n -ї прямолинійної ділянки, паралельної осі Z;

$I_{Cy,k}, x_{0,k}, Y_{1,2,k}, z_{0,k}$ – струм та координати кінців k -ї прямолинійної ділянки, паралельної осі Y;

$I_{Cx,v}, X_{1,2,v}, y_{0,v}, z_{0,v}$ – струм та координати кінців v -ї прямолинійної ділянки, паралельної осі X;

N, K, V – кількість прямолинійних ділянок, паралельних осі Z, Y, X відповідно.

Тоді компоненти індукції МП трифазного струмопроводу (рис. 2) можуть бути представлені як:

$$\begin{aligned}\dot{B}_x &= \dot{B}_x(I_A) + \dot{B}_x(I_B) + \dot{B}_x(I_C); \\ \dot{B}_y &= \dot{B}_y(I_A) + \dot{B}_y(I_B) + \dot{B}_y(I_C); \\ \dot{B}_z &= \dot{B}_z(I_A) + \dot{B}_z(I_B) + \dot{B}_z(I_C),\end{aligned}\quad (15)$$

а діюче значення індукції його МП у точці $P(x,y,z)$ як:

$$\tilde{B} = \left| \sqrt{\dot{B}_x^2 + \dot{B}_y^2 + \dot{B}_z^2} \right|, \quad (16)$$

де $\dot{B}_x, \dot{B}_y, \dot{B}_z$ – просторові компоненти (15) визначені для діючого значення струмів I_A, I_B, I_C .

На основі (12–15) отримаємо наступні розрахункові співвідношення для визначення індукції МП струмопроводу (рис. 2):

$$\begin{aligned}\dot{B}_x &= \sum_n^N \dot{B}_{zx}(I_{Az,n}, x_{0,n}, y_{0,n}, Z_{1,2,n}) + \\ &+ \sum_k^K \dot{B}_{yx}(I_{Ay,k}, x_{0,k}, Y_{1,2,k}, z_{0,k}) + \\ &+ \sum_n^N \dot{B}_{zx}(I_{Bz,n}, x_{0,n}, y_{0,n}, Z_{1,2,n}) + \\ &+ \sum_k^K \dot{B}_{yx}(I_{By,k}, x_{0,k}, Y_{1,2,k}, z_{0,k}) + \\ &+ \sum_n^N \dot{B}_{zx}(I_{Cz,n}, x_{0,n}, y_{0,n}, Z_{1,2,n}) + \\ &+ \sum_k^K \dot{B}_{yx}(I_{Cy,k}, x_{0,k}, Y_{1,2,k}, z_{0,k}) + \\ &+ \sum_v^V \dot{B}_{xy}(I_{Ax,v}, X_{1,2,v}, y_{0,v}, z_{0,v}) + \\ &+ \sum_v^V \dot{B}_{xy}(I_{Bx,v}, X_{1,2,v}, y_{0,v}, z_{0,v}) + \\ &+ \sum_v^V \dot{B}_{xy}(I_{Cx,v}, X_{1,2,v}, y_{0,v}, z_{0,v}) + \\ &+ \sum_k^K \dot{B}_{yz}(I_{Ay,k}, x_{0,k}, Y_{1,2,k}, z_{0,k}) + \\ &+ \sum_k^K \dot{B}_{yz}(I_{By,k}, x_{0,k}, Y_{1,2,k}, z_{0,k}) + \\ &+ \sum_k^K \dot{B}_{yz}(I_{Cy,k}, x_{0,k}, Y_{1,2,k}, z_{0,k});\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \sum_{n=1}^N \dot{B}_{z_x}(i_{Cz,n}, x_{0,n}, y_{0,n}, Z_{1,2,n}) + \\
& + \sum_{k=1}^K \dot{B}_{y_x}(i_{Cy,k}, x_{0,k}, Y_{1,2,k}, z_{0,k}); \\
\dot{B}_y = & \sum_{n=1}^N \dot{B}_{z_y}(i_{Az,n}, x_{0,n}, y_{0,n}, Z_{1,2,n}) + \\
& + \sum_{v=1}^V \dot{B}_{x_y}(i_{Ax,v}, X_{1,2,v}, y_{0,v}, z_{0,v}) + \\
& + \sum_{n=1}^N \dot{B}_{z_y}(i_{Bz,n}, x_{0,n}, y_{0,n}, Z_{1,2,n}) + \\
& + \sum_{v=1}^V \dot{B}_{x_y}(i_{Bx,v}, X_{1,2,v}, y_{0,v}, z_{0,v}) + \\
& + \sum_{n=1}^N \dot{B}_{z_y}(i_{Cz,n}, x_{0,n}, y_{0,n}, Z_{1,2,n}) + \\
& + \sum_{v=1}^V \dot{B}_{x_y}(i_{Cx,v}, X_{1,2,v}, y_{0,v}, z_{0,v}); \\
\dot{B}_z = & \sum_{v=1}^V \dot{B}_{x_z}(i_{Ax,v}, X_{1,2,v}, y_{0,v}, z_{0,v}) + \\
& + \sum_{k=1}^K \dot{B}_{y_z}(i_{Ay,k}, x_{0,k}, Y_{1,2,k}, z_{0,k}) + \\
& + \sum_{v=1}^V \dot{B}_{x_z}(i_{Bx,v}, X_{1,2,v}, y_{0,v}, z_{0,v}) + \\
& + \sum_{k=1}^K \dot{B}_{y_z}(i_{By,k}, x_{0,k}, Y_{1,2,k}, z_{0,k}) + \\
& + \sum_{v=1}^V \dot{B}_{x_z}(i_{Cx,v}, X_{1,2,v}, y_{0,v}, z_{0,v}); \\
& + \sum_{k=1}^K \dot{B}_{y_z}(i_{Cy,k}, x_{0,k}, Y_{1,2,k}, z_{0,k}). \quad (17)
\end{aligned}$$

Таким чином, отримані розрахункові співвідношення (6–17) дозволяють виконати розрахунок індукції зовнішнього МП струмопроводу ТП (рис. 2) у всіх точках простору, в тому числі поблизу його поверхні.

Тестовий розрахунок індукції МП струмопроводу реальної ТП. Виконаємо розрахунок індукції МП струмопроводу ТП 10/0,4 кВ потужністю 100 кВА з параметрами $d_1 = 0,16$ м, $d_2 = 0,05$ м, $L_1 = 0,5$ м, $L_2 = 2,2$ м, $L_3 = L_4 = 0,9$ м, $L_5 = 2$ м, $I = 150$ А, та іншими параметрами відповідно до табл. 1.

Розрахунок виконаємо відповідно до (6–17) на горизонтальній площині (підлозі житлового приміщення), розташованій на висоті від 0,5 м до 3 м над струмопроводом ТП. Результати розрахунку зведені до табл. 2 і представлені на рис. 5–7.

Таблиця 1 – Параметри струмопроводу ТП (рис. 2), необхідні для розрахунку його МП

n	$i_{Az,n} = u \cdot i_A$	$x_{0n}, \text{ м}$	$y_{0n}, \text{ м}$	$z_{1n}, \text{ м}$	$z_{2n}, \text{ м}$
1	$u = 1$	0,16	0	1,5	2
2	$u = 1/3$	0,05	2,15	2	0
3	$u = 1/3$	0,95	2,15	2	0
4	$u = 1/3$	1,85	2,15	2	0
n	$i_{Bz,n} = u \cdot i_B$	$x_{0n}, \text{ м}$	$y_{0n}, \text{ м}$	$z_{1n}, \text{ м}$	$z_{2n}, \text{ м}$
1	$u = 1$	0	0	1,5	2
2	$u = 1/3$	0	2,15	2	0
3	$u = 1/3$	0,9	2,15	2	0
4	$u = 1/3$	1,8	2,15	2	0
n	$i_{Cz,n} = u \cdot i_C$	$x_{0n}, \text{ м}$	$y_{0n}, \text{ м}$	$z_{1n}, \text{ м}$	$z_{2n}, \text{ м}$
1	$u = 1$	-0,16	0	1,5	2
2	$u = 1/3$	-0,05	2,15	2	0
3	$u = 1/3$	0,85	2,15	2	0
4	$u = 1/3$	1,75	2,15	2	0
k	$i_{Ay,k} = u \cdot i_A$	$x_{0k}, \text{ м}$	$y_{1k}, \text{ м}$	$y_{2k}, \text{ м}$	$z_{0k}, \text{ м}$
1	$u = 1$	0,16	0	2,1	2
2	$u = 1/3$	0,05	2,1	2,15	2
3	$u = 1/3$	0,95	2,1	2,15	2
4	$u = 1/3$	1,85	2,1	2,15	2
k	$i_{By,k} = u \cdot i_B$	$x_{0k}, \text{ м}$	$y_{1k}, \text{ м}$	$y_{2k}, \text{ м}$	$z_{0k}, \text{ м}$
1	$u = 1$	0	0	2,15	2
k	$i_{Cy,k} = u \cdot i_C$	$x_{0k}, \text{ м}$	$y_{1k}, \text{ м}$	$y_{2k}, \text{ м}$	$z_{0k}, \text{ м}$
1	$u = 1$	-0,16	0	2,1	2
2	$u = 1$	-0,05	2,1	2,15	2
3	$u = 2/3$	-0,05	2,15	2,2	2
4	$u = 1/3$	0,85	2,2	2,15	2
5	$u = 1/3$	1,75	2,2	2,15	2
v	$i_{Ax,v} = u \cdot i_A$	$x_{1v}, \text{ м}$	$x_{2v}, \text{ м}$	$y_{0v}, \text{ м}$	$z_{0v}, \text{ м}$
1	$u = 1$	0	0,16	0	1,5
2	$u = 1/3$	0,16	0,05	2,1	2
3	$u = 2/3$	0,16	0,95	2,1	2
4	$u = 1/3$	0,95	1,85	2,1	2
5	$u = 1/3$	0,05	0	2,15	0
6	$u = 1/3$	0,95	0,9	2,15	0
7	$u = 1/3$	1,85	1,8	2,15	0
v	$i_{Bx,v} = u \cdot i_B$	$x_{1v}, \text{ м}$	$x_{2v}, \text{ м}$	$y_{0v}, \text{ м}$	$z_{0v}, \text{ м}$
1	$u = 2/3$	0	0,9	2,15	2
2	$u = 1/3$	0,9	1,8	2,15	2
v	$i_{Cx,v} = u \cdot i_C$	$x_{1v}, \text{ м}$	$x_{2v}, \text{ м}$	$y_{0v}, \text{ м}$	$z_{0v}, \text{ м}$
1	$u = 1$	0	-0,16	0	1,5
2	$u = 1$	-0,16	-0,05	2,1	2
3	$u = 2/3$	-0,05	0,85	2,15	2
4	$u = 1/3$	0,85	1,75	2,15	2
5	$u = 1/3$	-0,05	0	2,1	0
6	$u = 1/3$	0,85	0,9	2,1	0
7	$u = 1/3$	1,75	1,8	2,1	0

Як видно з результатів розрахунку (табл. 2, рис. 5–7), максимальні значення індукції МП ТП 100 кВА при її номінальному навантаженні складають від 0,55 мкТл до 30,6 мкТл при відстані до розташованого над ТП житлового приміщення від 0,5 м до 3 м. Аналіз характеру МП ТП (рис. 6 та 7) показує, що воно має максимум над фазою В струмопроводу та дипольний характер його розподілу. Це показує можливість організації ефективного екранування МП ТП простішим активним електромагнітним екраном [5] з однією компенсаційною обмоткою.

Таблиця 2. Результати розрахунку та вимірів максимальних значень індукції МП лабораторного макету струмопроводу ТП 10/0,4 кВ, 100 кВА на горизонтальній площині при її розташуванні на висоті h над струмопроводом

$h, \text{ м}$	Розрахунок $B, \text{ мкТл}$	Експеримент $B, \text{ мкТл}$	Похибка, %
0,5	30,56585	29,9	2,23
0,6	21,82841	21,1	3,45
0,7	16,20571	15,8	2,57
0,8	12,40228	11,9	4,22
0,9	9,724627	9,4	3,45
1,0	7,777737	7,5	3,70
1,1	6,324234	6,1	3,68
1,2	5,214902	5,02	3,88
1,3	4,352309	4,15	4,87
1,4	3,670761	3,6	1,97
1,5	3,124731	3,05	2,45
1,6	2,681909	2,6	3,15
1,7	2,318889	2,25	3,06
1,8	2,018408	1,94	4,04
1,9	1,767524	1,71	3,36
2,0	1,556398	1,5	3,76
2,1	1,377454	1,34	2,80
2,2	1,224789	1,19	2,92
2,3	1,093757	1,06	3,18
2,4	0,980665	0,95	3,23
2,5	0,882552	0,85	3,83
2,6	0,797024	0,77	3,51
2,7	0,722134	0,69	4,66
2,8	0,656283	0,64	2,54
2,9	0,598152	0,58	3,13
3,0	0,546647	0,53	3,14

Верифікація отриманих розрахункових співвідношень. Експериментальну перевірку розробленої методики розрахунку МП трифазного струмопроводу ТП 100 кВА при номінальному струмі 150 А (рис. 1), виконано на повномасштабному лабораторному макеті низьковольтного струмопроводу ТП (рис. 8) шляхом порівняння результатів розрахунку з результатами вимірів індукції його МП, зведених до табл. 2. Виміри діючого значення індукції МП проводилися за представленню в [1] методикою у вузлах координатної сітки $0,5 \times 0,5 \text{ м}$ на площині, віддаленій від струмопроводу на відстань

від 0,5 м до 3 м. Для зручності доступу до координатної сітки, макет струмопроводу покладено на бік (рис. 8). Результати вимірів представлені у табл. 2 та на рис. 5.

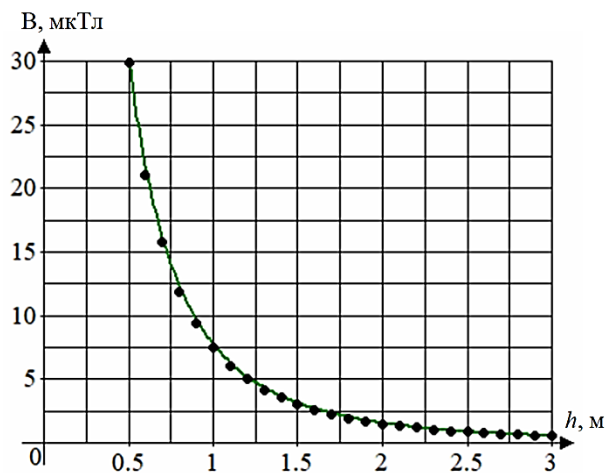


Рисунок 5 – Розрахункові (—) та експериментальні (••••) значення індукції МП струмопроводу ТП відповідно до табл. 2

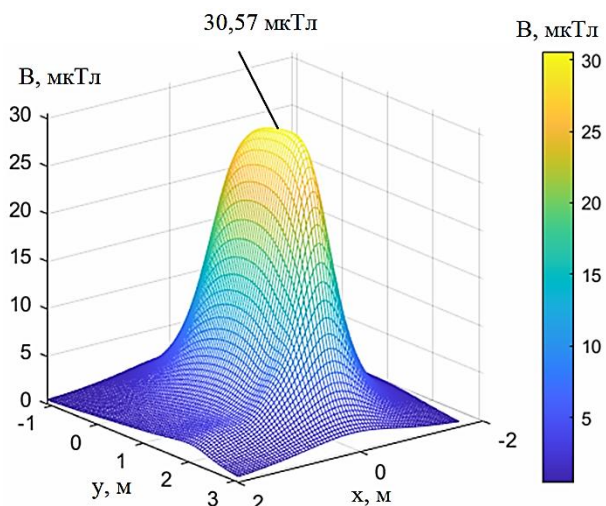


Рисунок 6 – Розподіл індукції МП на висоті 0,5 м над струмопроводом ТП

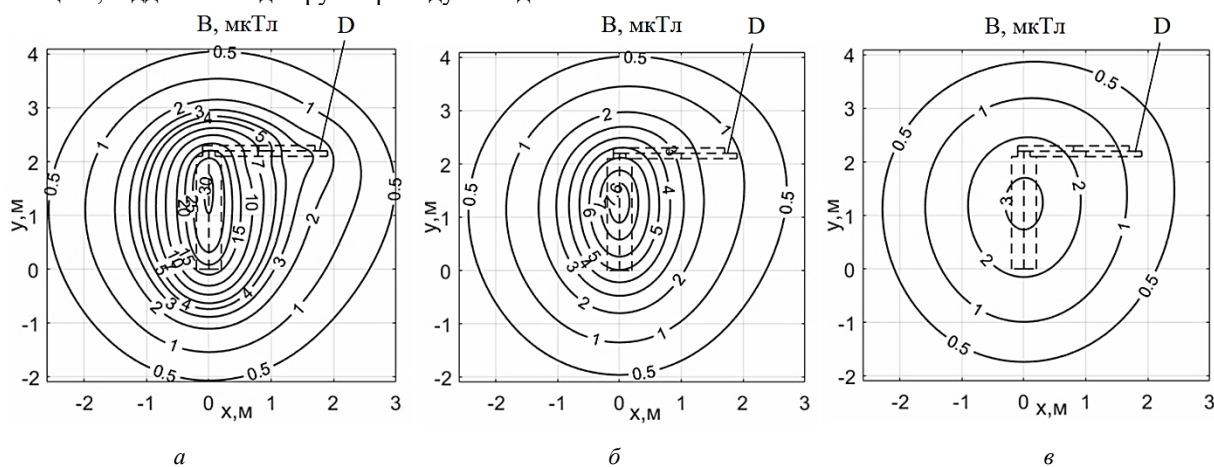


Рисунок 7 – Розрахунковий розподіл індукції МП струмопроводу ТП 6(10)/0,4 кВ на горизонтальній площині, розташований на висоті 0,5 м (а), 1,0 м (б) і 1,5 м (в) від струмопроводу відповідно до табл. 1, D – проекція низьковольтного струмопроводу



Рисунок 8 – Лабораторний макет струмопроводу низької напруги ТП 10/0,4 кВ, 100 кВА на магнітовимірювальному стенді інституту

Порівняння результатів розрахунку з результатами вимірів показує, що їх розкид не перевищує 5 %, що відповідає похибці вимірювання індукції МП [14]. Це підтверджує коректність розробленої математичної моделі МП струмопроводу, запропонованих розрахункових співвідношень індукції його МП, та прийнятих вище припущень.

Висновки.

1. На основі закону Біо-Савара побудовано математичну модель магнітного поля окремих прямолінійних ділянок струмопроводу, паралельних відповідним осям декартової системи координат, яка не має обмежень з відстані до розрахункової зони.

2. З використанням запропонованої математичної моделі окремих ділянок струмопроводу та принципу суперпозиції, розроблено аналітичну методику розрахунку магнітного поля низьковольтного струмопроводу типової конструкції для вбудованої трансформаторної підстанції 6(10)/0,4 кВ старої забудови, яка дозволяє виконувати розрахунок магнітного поля на малих відстанях (0,5–1 м) від струмопроводу.

3. Здійснено верифікацію розроблених математичної моделі та методики розрахунку магнітного поля шляхом експериментальних досліджень повномасштабного лабораторного макету струмопроводу трансформаторної підстанції потужністю 100 кВА на магнітовимірювальному стенді інституту. Вимірювання підтвердили співпадіння результатів розрахунку та експерименту з розкидом не більш 5 %, що свідчить про коректність розроблених математичної моделі та методики розрахунку та можливість її коректного та ефективного практичного застосування.

4. Виявлено близький до дипольного характер розподілу магнітного поля над трифазним низьковольтним струмопроводом, що показує можливість його ефективного зменшення простішими системами активного екранування з однією компенсаційною обмоткою.

5. Розроблену аналітичну методику розрахунку магнітного поля планується широко застосовувати при створенні нових методів та засобів зменшення до безпечного для населення рівня магнітного поля діючих вбудованих трансформаторних підстанції 6(10)/0,4 кВ старої забудови потужністю 100–1260 кВА.

Список літератури

1. Розов В. Ю., Пелевін Д. Е., Кундіус К. Д. Моделирование магнитного поля у житлових будинках із вбудованими трансформаторними підстанціями на основі двофазної мультидипольної моделі трифазного струмопроводу. *Електротехніка і електромеханіка*. 2023. № 5. С. 87–93. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2023.5.13>.
2. Розвиток методів моделювання та нормалізації зовнішнього магнітного поля електрообладнання підстанцій (шифр «БІОМАГ»): звіт про НДР № ДР 0111U010333 / Керівник Д. Є. Пелевін. Харків: Державна установа «Інститут технічних проблем магнетизму НАН України», 2016. 119 с.
3. Розвиток наукових засад нормалізації геомагнітного поля в приміщеннях сучасних житлових будинків (шифр «БІОМАГ 2»): звіт про НДР № ДР 0116U005462 / Керівник Д. Є. Пелевін. Харків: Державна установа «Інститут технічних проблем магнетизму НАН України», 2021. 158 с.
4. Розроблення наукових засад енергозберігаючих технологій зменшення електромагнітного впливу на житлове середовище міських трансформаторних підстанцій (шифр «ЕМП ТП»): звіт про НДР № ДР 0119U101726 / Керівник В. Ю. Розов. Харків: Державна установа «Інститут технічних проблем магнетизму НАН України», 2019. 74 с.
5. Розов В. Ю., Кундіус Е. Д., Пелевін Д. Е. Активное экранирование внешнего магнитного поля трансформаторных подстанций, встроенных в жилые дома. *Електротехніка і електромеханіка*. 2020. № 3. С. 60–66. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2020.3.04>.
6. Розов В. Ю., Пелевін Д. Е., Пелевіна Е. Д. Внешнее магнитное поле городских трансформаторных подстанций и методы его нормализации. *Електротехніка і електромеханіка*. 2017. № 5. С. 60–66. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2017.5.10>.
7. Кундіус К. Д. Аналіз ефективності активного екранування зовнішнього магнітного поля вбудованих трансформаторних підстанцій потужністю до 1260 кВА. *Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит*. 2022. № 11–12 (177–178). С. 50–62. DOI: <https://doi.org/10.20998/2313-8890.2022.11.05>.
8. 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>.
9. 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>.
10. Salinas E., Aspemyr L., Daalder J., Hamnerius Y., Luomi J. Power Frequency Magnetic Fields from In-house Secondary Substations. *CIREN '99, 15th Conference on Electricity Distribution, Technical Reports*, Nice, France, 1–4 June 1999. pp. 161–164.
11. 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>.
12. 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>.
13. Rööslä M., Jenni D., Kheifets L., Mezei G. Extremely low frequency magnetic field measurements in buildings with transformer stations in Switzerland. *The Science of the total environment*, 2011, vol. 409,

- no. 18, pp. 3364–3369. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.05.041>.
14. Розов В. Ю., Реуцкий С. Ю., Пелевин Д. Е., Кундіус К. Д. Магнітне поле кабельних систем електрообігріву підлог житлових приміщень. *Електротехніка і електромеханіка*. 2024. № 5. С. 48–57. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2024.5.07>.
 15. Правила улаштування електроустановок. Видання офіційне. Міністерство енергетики України. Харків: Видавництво «Форт», 2017. 760 с.
 16. Розов В. Ю., Резинкина М. М., Думанский Ю. Д., Гвозденко Л. А. Исследование техногенных искажений геомагнитного поля в жилых и производственных помещениях и определение путей их снижения до безопасного уровня. *Технічна електродинаміка. Тематичний випуск «Проблеми сучасної електротехніки»*. 2008. Ч. 2. С. 3–8.
 17. 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/techne2017.02.013>.
 18. Розов В. Ю. Внешние магнитные поля силового электрооборудования и методы их уменьшения. Київ. 1995. 42 с. (Препр. НАН України. Інститут електродинаміки, № 772).
 19. Пелевин Д. Е. Экранирование магнитного поля промышленной частоты стенами жилых домов. *Електротехніка і електромеханіка*. 2015. № 4. С. 49–52. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2015.4.10>.
 20. Розов В. Ю., Гринченко В. С., Пелевин Д. Е., Чунихин К. В. Моделирование электромагнитного поля жилых домов расположенных вблизи линии электропередачи. *Технічна електродинаміка*. 2016. № 3. С. 6–8. DOI: <https://doi.org/10.15407/techne2016.03.006>.
 21. Розов В. Ю., Ассуиров Д. А., Реуцкий С. Ю. Замкнутые системы компенсации магнитного поля технических объектов с различными способами формирования обратных связей. *Технічна електродинаміка*. 2008. С. 97–100.
 22. Розов В. Ю., Ассуиров Д. А. Метод активного экранирования внешнего магнитного поля технических объектов. *Технічна електродинаміка. Тематичний випуск «Проблеми сучасної електротехніки»*. 2006. Ч. 3. С. 13–16.
 23. Шидловский А. К., Розов В. Ю. Системы автоматической компенсации внешних магнитных полей энергонасыщенных объектов. *Технічна електродинаміка*. 1996. № 1. С. 3–9.
 24. Розов В. Ю., Гетьман А. В., Петров С. В. и др. Магнетизм космических аппаратов. *Технічна електродинаміка. Тематичний випуск «Проблеми сучасної електротехніки»*. 2010. Ч. 2. С. 144–147.
 25. Kuznetsov B. I., Nikitina T. B., Bovdii I. V., Voloshko O. V., Kolomiets V. V., Kobylanskiy B. B. Synthesis of an effective system of active shielding of the magnetic field of a power transmission line with a horizontal arrangement of wires using a single compensation winding. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2022, no. 6, pp. 15–21. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2022.6.03>.
 26. Huss A., Goris K., Vermeule R., Kromhout H. Does apartment's distance to an in-built transformer room predict magnetic field exposure levels? *Journal of exposure science & environmental epidemiology*. 2013. vol. 23, no. 5, pp. 554–558. DOI: <https://doi.org/10.1038/jes.2012.130>.
 27. Нестеренко А. Д. Введение в теоретическую электротехнику. Київ: Наукова думка, 1969. 351 с.
 28. Simonyi K. Theoretische elektrotechnik. Berlin: VEB Deutscher Verlag der Wissen, 1979. 980 p. (in German).
 29. Stratton Ju. A. Electromagnetic Theory. New York and London: McGraw-Hill book Company, 1941. 615 p.
 30. Smythe W. R. Static and Dynamic Electricity. McGraw-Hill, New York, 1968. 623 p.
 - external magnetic field of electrical equipment of substations (code “BIOMAG”)]”, State Institution “Institute of Technical Problems of Magnetism of the National Academy of Sciences of Ukraine,” Kharkiv, R&D report No. 0111U010333, 2016. (in Ukrainian).
 3. “Rozvytok naukovykh zasad normalizatsii heomahnitnoho polia v prymishchenniakh suchasnykh zhytlovykh budynkiv (shyfr “BIOMAH 2”)] [Development of scientific principles of normalization of the geomagnetic field in the premises of modern residential buildings (code “BIOMAG 2”)]”, State Institution “Institute of Technical Problems of Magnetism of the National Academy of Sciences of Ukraine,” Kharkiv, R&D report No 0116U005462, 2021. (in Ukrainian).
 4. “Rozroblennia naukovykh zasad enerhozberihaiuchykh tekhnolohii zmenshennia elektromahnitnoho vplyvu na zhytlove seredovysche miskykh transformatomykh pidstantsii (shyfr “EMP TP”)] [Development of the scientific basis of energy-saving technologies for reducing the electromagnetic influence on the residential environment of urban transformer substations (code “EMP TP”)]”, State Institution “Institute of Technical Problems of Magnetism of the National Academy of Sciences of Ukraine,” Kharkiv, R&D report No 0119U101726, 2019.
 5. V. Y. Rozov, K. D. Kundius, D. Y. Pelevin, “Active shielding of external magnetic field of built-in transformer substations,” *Electrical Engineering & Electromechanics*, no. 3, pp. 24–30, 2020, doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2020.3.04>
 6. V. Yu. Rozov, D. Ye. Pelevin, K. D. Pielievina, “External magnetic field of urban transformer substations and methods of its normalization,” *Electrical engineering & electromechanics*, no. 5, pp. 60–66, 2017, doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2017.5.10>
 7. K. D. Kundius “Analysis of the efficiency of active shielding of the external magnetic field of built-in transformer substations with a power up to 1260 kVA,” *Enerhozberzhennia. Enerhetyka. Enerhoaudyt*, no. 11–12 (177–178), pp. 50–62, 2022, doi: <https://doi.org/10.20998/2313-8890.2022.11.05> (in Ukrainian)
 8. M. Grbic, A. Canova, L. Giaccone, “Magnetic field in an apartment located above 10/0.4 kV substation: levels and mitigation techniques,” *CIREN – Open Access Proceedings Journal*, no. 1, pp. 752–756, 2017, doi: <https://doi.org/10.1049/oap-cired.2017.1230>
 9. G. Thuroczy, G. Janossy, N. Nagy, J. Bakos, J. Szabo, G. Mezei, “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, 2008, doi: <https://doi.org/10.1093/rpd/ncn199>
 10. E. Salinas, L. Aspemyr, J. Daalder, Y. Hamnerius, J. Luomi, “Power Frequency Magnetic Fields from In-house Secondary Substations”, in *CIREN '99, 15th Conference on Electricity Distribution, Technical Reports*, Nice, France, Jun. 1–4, 1999, pp. 161–164.
 11. E. O. Okokon, P. Roivainen, L. Kheifets, G. Mezei, J. Juutilainen, “Indoor transformer stations and ELF magnetic field exposure: use of transformer structural characteristics to improve exposure assessment,” *Journal of exposure science & environmental epidemiology*, vol. 4, no. 1, pp. 100–104, 2014, doi: <https://doi.org/10.1038/jes.2013.54>
 12. E. A. Navarro-Camba, J. Segura-Garcia, C. Gomez-Perretta, “Exposure to 50 Hz Magnetic Fields in Homes and Areas Surrounding Urban Transformer Stations in Silla (Spain): Environmental Impact Assessment,” *Sustainability*, vol. 10, no. 8, p. 2641, 2018, doi: <https://doi.org/10.3390/su10082641>
 13. M. Röösli, D. Jenni, L. Kheifets, G. Mezei, “Extremely low frequency magnetic field measurements in buildings with transformer stations in Switzerland,” *The Science of the total environment*, vol. 409, no. 18, pp. 3364–3369, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.05.041>
 14. V. Yu. Rozov, S. Yu. Reutskiy, D. Ye. Pelevin, K. D. Kundius, “Magnetic field of electrical heating cable systems of the floors for residential premises,” *Electrical Engineering & Electromechanics*, no. 5, pp. 48–57, 2024, doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2024.5.07>
 15. Electrical installation regulations [Pravila ulashtuvannya electroustanovok]. Kharkiv: Fort Publishing, 2017, 760 p. (in Ukrainian)
 16. V. Yu. Rozov, M. M. Rezinkina, Yu. D. Dumanskij, L. A. Gvozdenko, “Issledovanie tehnogennykh iskazhenij geomahnitnoho polya v zhylyh i proizvodstvennykh pomescheniyah i opredelenie putej ih snizheniya do bezopasnogo urovnya,” [Study of man-made distortions of the geomagnetic field in residential and

References

1. V. Yu. Rozov, D. Ye. Pelevin, K. D. Kundius, “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*, № 5, С. 87–93, 2023, doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2023.5.13>
2. “Rozvytok metodiv modeliuвання ta normalizatsii zovnishnoho mahnitnoho polia elektroobladnannia pidstantsii (shyfr “BIOMAH”)] [Development of methods of modeling and normalization of the

- industrial premises and determination of ways to reduce them to a safe level] *Tekhnichna Elektrodynamika. Tematicheskij vypusk "Problemy sovremennoj `elektrotehniki`".* Chapter 2, pp. 3–8, 2008. (in Russian)
17. V. Yu. Rozov, O. O. Tkachenko, A. V. Yerisov, V. S. Grinchenko, "Analytical calculation of magnetic field of three-phase cable lines with two-point bonded shields," *Tekhnichna Elektrodynamika*, no. 2, pp. 13–18, 2017, doi: <https://doi.org/10.15407/techned2017.02.013> (in Russian)
 18. V. Yu. Rozov, "Vneshnie magnitnyie polya silovogo elektrooborudovaniya i metody ih umensheniya," [External magnetic fields of power electrical equipment and methods of their reduction]. *Preprints NAS of Ukraine. Institute of Electrodynamics*, no. 772, Kyiv. 1995. 42 p. (in Russian)
 19. D. Y. Pelevin, "Screening magnetic fields of the power frequency by the walls of houses," *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2015, no. 4, pp. 49–52, doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2015.4.10>. (in Russian)
 20. V. Yu. Rozov, V. S. Grinchenko, D. Ye. Pelevin, K. V. Chunikhin, "Simulation of electromagnetic field in residential buildings located near overhead lines," *Tekhnichna Elektrodynamika*, no. 3, pp. 6–8, 2016, doi: <https://doi.org/10.15407/techned2016.03.006>. (in Russian)
 21. V. Yu. Rozov, D. A. Assyirov, S. Yu. Reytskiy, "Zamknutyie sistemy kompensatsii magnitnogo polya tehniceskikh ob'ektov s razlichnyimi sposobami formirovaniya obratnyih svyazey," [Closed systems for compensation of the magnetic field of technical objects with different methods of feedback formation] *Tekhnichna Elektrodynamika*, pp. 97–100, 2008. (in Russian)
 22. V. Yu. Rozov, D. A. Assyirov, "Metod aktivnogo ekranirovaniya vneshnego magnitnogo polya tehniceskikh ob'ektov," [Method of external magnetic field active shielding of technical objects] *Tekhnichna elektrodynamika. Tematichnyi vypusk «Problemy suchasnoi elektrotehniki»*, chapter 3, pp.13–16, 2006. (in Russian)
 23. A. K. Shydlovskiy, V. Yu. Rozov, "Sistemyi avtomaticheskoy kompensatsii vneshnih magnitnyih poley energonasyishennyih ob'ektov," [Automatic compensation systems for external magnetic fields of energy-saturated objects] *Tekhnichna Elektrodynamika*, no. 1, pp. 3–9, 1996. (in Russian)
 24. V. Yu. Rozov, A. V. Hetman, S. V. Petrov *et al.*, "Mahnetyzm kosmicheskikh apparatov," [Magnetism of spacecraft]. *Tekhnichna elektrodynamika. Tematichnyi vypusk «Problemy suchasnoi elektrotehniki»*, 2010, chapter 2, pp. 144–147.
 25. B. I. Kuznetsov, T. B. Nikitina, I. V. Bovdii, O. V. Voloshko, V. V. Kolomiets, B. B. Kobylanskiy. "Synthesis of an effective system of active shielding of the magnetic field of a power transmission line with a horizontal arrangement of wires using a single compensation winding," *Electrical Engineering & Electromechanics*, no. 6, pp. 15–21, 2022, doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2022.6.03>
 26. A. Huss, K. Goris, R. Vermeule, H. Kromhout, "Does apartment's distance to an in-built transformer room predict magnetic field exposure levels?," *Journal of exposure science & environmental epidemiology*, vol. 23, no. 5, pp. 554–558, 2013, doi: <https://doi.org/10.1038/jes.2012.130>
 27. A. D. Nesterenko, *Vvedenie v teoreticheskuyu elektrotehniku [Introduction to Theoretical Electrical Engineering]*, Kyiv: Naukova Dumka Publishing, 1969, 351 p. (in Russian)
 28. K. Simonyi, *Theoretische elektrotechnik*. Berlin: VEB Deutscher Verlag der Wissen, 1979, 980 p. (in German)
 29. Ju. A. Stratton, *Electromagnetic Theory*. New York and London: McGraw-Hill book Company, 1941, 615 p.
 30. W. R. Smythe, *Static and Dynamic Electricity*. McGraw-Hill, New York, 1968, 623 p.

Надійшло (received) 01.10.2024

UDC 621.3.013

DMYTRO PELEVIN ✉ – Doctor of Philosophy (PhD), Senior Researcher, Head of Laboratory of Magnetic Measurements, Department of Magnetism of Technical Objects, Anatolii Pidhornyi Institute of Power Machines and Systems of the National academy of sciences of Ukraine; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1413-2114>; e-mail: pelevindmitro@ukr.net.

CALCULATION OF THE MAGNETIC FIELD OF A LOW-VOLTAGE BUSBARS OF A BUILT-IN TRANSFORMER SUBSTATION

Built-in transformer substations are a source of dangerous to public health of industrial frequency magnetic field at those closest to them a residential premises, this requires its reduction to current sanitary standards. The solution to the problem of reducing the magnetic field in transformer substations, first of all, requires the presence of a correct and non-burdensome analytical method of engineering calculation of magnetic flux density, which is created above the substation. But the existing technique is based on a multi-dipole mathematical model has a methodical limitation of the minimum distance between the substation busbars and the calculation zone and therefore needs improvement. The purpose of the work is to develop an analytical method for calculating the magnetic field near a low-voltage busbars of a 6(10)/0.4 kV transformer substation built into a residential building of an old building, which has no restrictions on the distance to the calculation zone. Using the Bio-Savar's law and the principle of superposition, a mathematical model of the magnetic field of individual straight sections of the busbars has been constructed and an analytical method for calculating the magnetic field of a low-voltage busbars of a transformer substation has been developed, determining the induction of its magnetic field as a whole. The developed method for calculating the magnetic field has been verified, by means of experimental studies on the magnetic measuring stand of the institute of a full-scale laboratory model of a low-voltage busbars of a transformer substation with a power of 100 kVA, that confirmed the coincidence of the calculation results and the experiment with a spread of no more than 5 %. The character of the distribution of the magnetic field over three-phase low-voltage busbars was determined, which is close to a dipole, which determines the possibility of its effective reduction by simpler active shielding systems with one compensation winding. Wide application of the developed methodology is planned in the creation of new methods and reduction means the magnetic field level of existing built-in transformer substations 6(10)/0.4 kV with a power of 100–1260 kVA to a level that is safe for the population.

Keywords: built-in transformer substation; low-voltage busbars; magnetic field.