

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

Моделювання магнітного поля у житлових будинках із вбудованими трансформаторними підстанціями на основі двофазної мультидипольної моделі трифазного струмопроводу

Вбудовані у житлові будинки трансформаторні підстанції (ТП) 10(6)/0,4 кВ створюють у сусідніх житлових приміщеннях магнітне поле з індукцією більш 10 мкТл, що складає небезпеку для здоров'я населення і робить актуальним дослідження цього магнітного поля для розробки методів від його захисту. Основним джерелом зовнішнього магнітного поля ТП є їх низьковольтні струмопроводи, вклад яких в загальний рівень магнітного поля складає більш 90 %. Перспективним методом моделювання магнітного поля ТП є мультидипольні математичні моделі, що мають чітку фізичну інтерпретацію, важливу для подальшої розробки методів захисту населення. Метою роботи є модифікація відомої мультидипольної моделі для розрахунку на її основі з обмеженою похибкою зовнішнього магнітного поля струмопроводів вбудованих трансформаторних підстанцій, що наближені до житлових приміщень на відстань до одного метра. Запропоновано модифіковану двофазну мультидипольну математичну модель основного джерела зовнішнього магнітного поля трансформаторної підстанції – його трифазного низьковольтного струмопроводу, яка на відміну від існуючої моделі ґрунтується на двофазній дипольній моделі трифазного електричного кола і дозволяє вдовічі наблизити розрахункову область без збільшення похибки. Здійснено експериментальну перевірку модифікованої двофазної мультидипольної моделі магнітного поля трифазного струмопроводу ТП 100 кВА на його повномасштабній фізичній моделі та наведені результати експерименту, що підтверджують співпадіння розрахунку і експерименту із розкидом не більш 7 %. Бібл. 37. табл. 1, рис. 10.

Ключові слова: вбудована трансформаторна підстанція, житлове приміщення, струмопровід, зовнішнє магнітне поле, мультидипольна модель.

Вступ. Одним із основних джерел магнітного поля (МП) промислової частоти, що складають небезпеку для населення, є вбудовані у житлові будинки трансформаторні підстанції (ТП) 10(6)/0,4 кВ (рис. 1), що мають потужність від 100 до 1260 кВА, і дослідженню МП яких приділяється все більше уваги в світі [1-26].

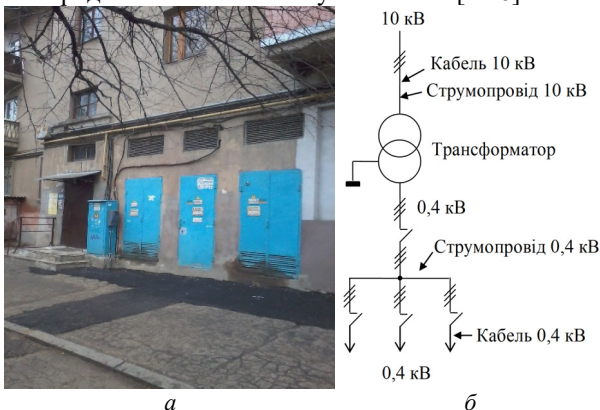


Рис. 1. Вбудована ТП 10/0,4 кВ (а) та її спрощена електрична схема (б)

Індукція МП, що створюється вбудованими ТП потужністю від 100 до 1260 кВА у сусідніх житлових приміщеннях, що розташовані на відстані 1-2 м над ТП, може перевищувати 10 мкТл, що підтверджується як закордонними (рис. 2) [2, 3, 5, 21, 25, 26], так і вітчизняними (рис. 3) дослідженнями [27]. Це більш ніж на порядок перевищує гранично припустимий рівень індукції МП (0,5 мкТл), який прийнятий в Україні [28], що потребує його зменшення. Тому актуальною є проблема моделювання МП вбудованих ТП для визначення їх реального рівня для подальшої розробки на цій основі засобів його розрахунку та екранування [1, 4-15, 18, 27-31].

Обґрунтування теми статті. Як показують результати досліджень європейських вчених [2, 4, 6, 9], а також досліджень авторів [27], основним джерелом МП ТП є низьковольтний струмопровід 0,4 кВ (рис. 1,б), зовнішнє магнітне поле (ЗМП) якого на відстанях 2 м складає більш 90 % від загального МП ТП (рис. 4). Тому для інженерних розрахунків, ЗМП вбудованих ТП може замінюватися ЗМП їх низьковольтних струмопроводів.

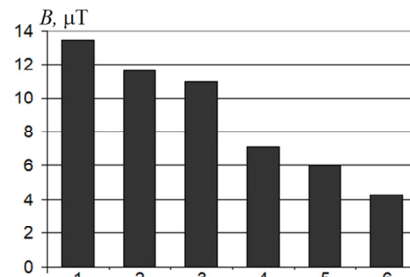


Рис. 2. Експериментально визначене МП в житлових приміщеннях будинків із вбудованими ТП потужністю до 1000 кВА в Європі (1 – Фінляндія [21], 2 – Сербія [2], 3 – Угорщина [3], 4 – Іспанія [25], 5 – Швеція [5], 6 – Швейцарія [26])

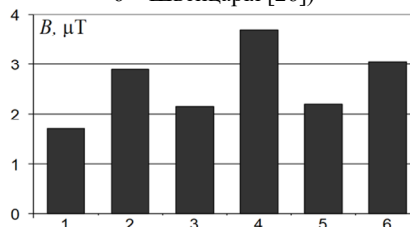


Рис. 3. Експериментально визначене МП в житлових приміщеннях будинків із вбудованими ТП м. Харкові (1 – 360 кВА, 2 – 440 кВА, 3 – 630 кВА, 4 – 715 кВА, 5 – 565 кВА, 6 – 640 кВА)

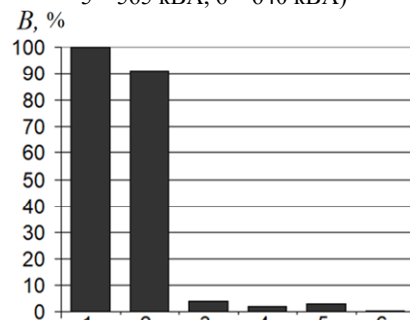


Рис. 4. Вплив окремих джерел МП ТП на загальний рівень ЗМП на відстані 2 м від них (1 – сумарне МП ТП; 2 – МП низьковольтного струмопроводу; 3 – МП трансформатору; 4 – МП низьковольтного кабелю; 5 – МП високовольтного струмопроводу; 6 – МП високовольтного кабелю)

Трифазні струмопроводи вбудованих ТП 10/04 кВ 100-1260 кВА мають прямолинійні ділянки, розташовані у горизонтальній (вертикальній) площині і виконуються із жорстких алюмінієвих (мідних) шин [28] із міжфазною відстанню до 0,3 м.

Особливістю розташування вбудованих ТП є мала відстань між поверхнею їх струмопроводів і сусідніми житловими приміщеннями, яка складає від 1 до 2 м.

Моделювання МП струмопроводів вбудованих ТП доцільно виконувати на основі мультидипольної моделі (1) [27]. Ця модель розроблена для розрахунку МП ліній електропередачі (ЛЕП) [32]. Вона пристосована для моделювання тривимірної МП струмопроводів лобової форми і має чітку фізичну інтерпретацію, що спрощує розробку засобів зменшення МП на її основі.

Мультидипольна модель (1) будується на основі системи дипольних джерел МП, які характеризуються магнітними моментами \vec{m}_i , розташованими у геометричних центрах незалежних прямокутних мікроконтурів $d_i \times a$ з міжфазним струмом $\dot{I}_{AB}, \dot{I}_{BC}, \dot{I}_{CA}$ і площами $\vec{S}_{AB}, \vec{S}_{BC}, \vec{S}_{CA}$, на які з довжиною a умовно розбиваються всі контури міжфазного струму струмопроводу:

$$\dot{H}(P) = -\sum_{l=1}^G \sum_{\alpha=1}^3 \sum_c \sum_{i=1}^N \nabla \left[\frac{(\dot{m}_{l\alpha ci}, \vec{R}_{l\alpha ci})}{4\pi R_{l\alpha ci}^3} \right]; \quad (1)$$

$$\dot{m}_{l\alpha ci} = \dot{I}_{l\alpha} \cdot \vec{S}_{l\alpha ci} = I_{l\alpha} \cdot e^{-j\varphi_{\alpha}} \cdot a \cdot d_{l\alpha ci} \cdot \vec{n}_{l\alpha ci},$$

де N – кількість мікроконтурів в кожному контурі ЛЕП; \vec{S}_i – вектор площі i -го мікроконтуру; \vec{n}_i – одиничний вектор, нормальний до S_i ; \vec{R}_i – радіус вектор від геометричного центру i -го мікроконтуру до точки спостереження P ; c – частини ЛЕП, що досліджуються; α – кількість фаз ЛЕП; G – кількість розщеплених проводів кожної з фаз; $d_{l\alpha ci}$ – поточна відстань між проводами різних фаз.

Похибка при застосуванні мультидипольної моделі (1) також, як і дипольної [33], залежить від співвідношення максимального геометричного розміру L об'єкту (мікроконтуру), та відстані R від його поверхні до області застосування, і складає менш 10 % при $R/L \geq 3$. Тому для гарантованого обмеження похибки моделі (1) на рівні 10 %, де $L = d_{\max}$, необхідно виконання наступних умов:

$$R \geq 3d_{\max} \text{ при } a_i \leq 2d, \quad (2)$$

де d_{\max} – максимальна міжфазна відстань між струмопроводами фаз в разі їх розташуванні на площині.

Однак використання мультидипольної моделі (1) для моделювання ЗМП ТП має обмеження. Так, ця модель при типових величинах $d = 0,3$ м, $d_{\max} = 0,6$ м дозволяє виконувати розрахунок ЗМП ТП тільки на відстанях $R \geq 1,8$ м, так як міжфазна відстань між крайніми фазами, що визначає площу S_{CA} , складає $2d$ (рис. 5,а). Але мінімальне значення R для вбудованих ТП є біля 1 м, що обмежує застосування цієї моделі.

Таким чином, відома мультидипольна модель (1), що розроблена для ЛЕП, потребує модифікації для розширення області її застосування на вбудовані ТП при характерних для них мінімальних відстанях (від 1 м) від струмопроводів ТП до житлових приміщень.

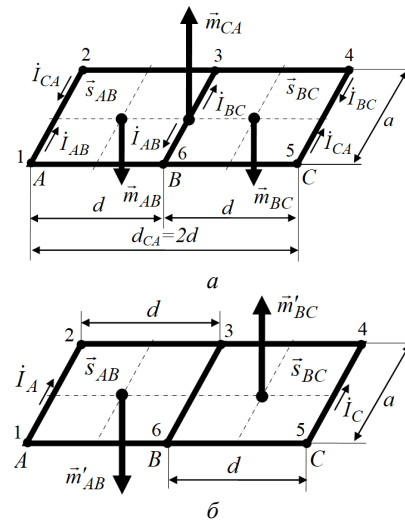


Рис. 5. Мультидипольне уявлення елементарного трифазного контуру як джерела МП: а) – традиційна трифазна модель; б) – двофазна модель

Метою роботи є модифікація відомої мультидипольної моделі для розрахунку на її основі з обмеженою похибкою зовнішнього магнітного поля струмопроводів вбудованих трансформаторних підстанцій, що наближені до житлових приміщень на відстань до 1 м.

Модифікована мультидипольна модель струмопроводу вбудованої ТП. При побудові модифікованої мультидипольної моделі ЗМП ТП вважаємо, що стіни ТП, а також стіни будинків, практично не екранують МП на частоті 50 Гц [34, 35], та приймаємо наступні припущення:

- приміщення ТП (крім активних елементів ТП) та житлові будинки не мають електропровідних і феромагнітних елементів та джерел МП;
- струми струмопроводів представляються у вигляді струмових ниток;
- МП ТП є потенційним;
- всі прямолинійні частини струмопроводів ТП є плоскими і розташовані або в горизонтальній, або у вертикальній площині;
- напруга мережі живлення ТП симетрична і синусоїдальна.

Перетворимо відому мультидипольну модель (1) для використання на ТП, виділивши МП, що створюється її міжфазними контурами зі струмом:

$$\dot{B}_S(P) = -\mu_0 \sum_{l=1}^K \sum_{i=1}^N \left[\nabla \left[\frac{(\dot{m}_{ABli}, \vec{R}_{ABli})}{4\pi R_{ABli}^3} \right] + \nabla \left[\frac{(\dot{m}_{BCli}, \vec{R}_{BCli})}{4\pi R_{BCli}^3} \right] + \nabla \left[\frac{(\dot{m}_{CAli}, \vec{R}_{CAli})}{4\pi R_{CAli}^3} \right] \right] \quad (3)$$

$$\dot{m}_{ABli} = \dot{I}_{ABli} \cdot \vec{S}_{ABli}, \quad \dot{m}_{BCli} = \dot{I}_{BCli} \cdot \vec{S}_{BCli}, \quad \dot{m}_{CAli} = \dot{I}_{CAli} \cdot \vec{S}_{CAli}.$$

Умовою застосування моделі (3), що обмежує її похибку на рівні 10 %, є співвідношення (2), яке не виконується при $R = 1$ м, так як для неї $d_{\max} = 0,6$ м.

Виконаємо модифікацію відомої моделі (3). Для цього використаємо запропоновану у [36] двофазну модель МП трифазного електричного контуру (рис. 5,б), яка є еквівалентною відомій трифазній моделі (рис. 5,а) за просторово-часовою структурою МП, але має вдвічі меншу максимальну міжфазну відстань. Відповідно до

[36] МП елементарного трифазного струмопроводу при симетрії напруг мережі живлення може бути представлено як суперпозиція МП від 2-х магнітних моментів \dot{m}'_{AB} , \dot{m}'_{BC} замість трьох:

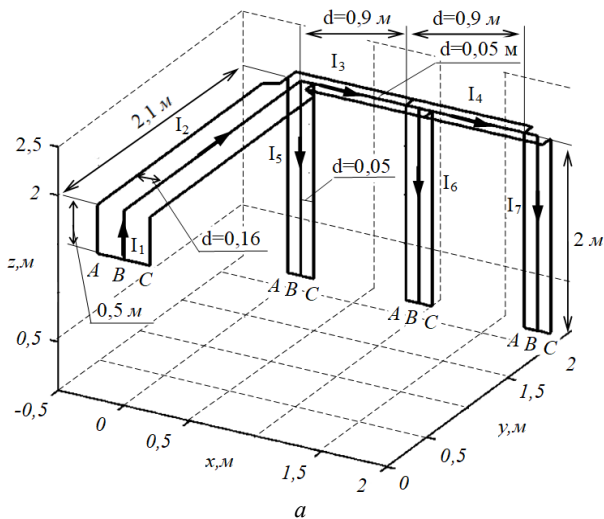
$$\dot{H}(P) = -\nabla \left(\frac{\dot{m}'_{AB} \cdot \vec{R}_{AB}}{4\pi R_{AB}^3} \right) - \nabla \left(\frac{\dot{m}'_{BC} \cdot \vec{R}_{BC}}{4\pi R_{BC}^3} \right), \quad (4)$$

$$\dot{m}'_{AB} = \dot{I}_A \vec{s}_{AB}, \quad \dot{m}'_{BC} = -\dot{I}_C \vec{s}_{BC}.$$

При цьому максимальний габаритний розмір елементарного мікроконтуру зменшується з $2d$ (рис. 5,а) до d (рис. 5,б), що дозволяє вдвічі зменшити відстань до області застосування моделі – із $6d$ до $3d$ (до 0,9 м при $d = 0,3$ м).

Тоді на основі (4) отримаємо модифіковану двофазну мультидипольну математичну модель МП трифазного струмопроводу ТП, що складається із K прямолінійних контурів, які мають N двофазних мікроконтурів:

$$\vec{B}_S(P) = -\mu_0 \sum_{l=1}^K \sum_{i=1}^N \left[\nabla \left(\frac{\dot{m}_{ABli} \cdot \vec{R}_{ABli}}{4\pi R_{ABli}^3} \right) + \nabla \left(\frac{\dot{m}_{BCli} \cdot \vec{R}_{BCli}}{4\pi R_{BCli}^3} \right) \right], \quad (5)$$



$$\dot{m}_{ABli} = \dot{I}_{Ali} \cdot \vec{S}_{ABli} = \dot{I}_{Ali} \cdot a_i \cdot d_l \cdot \vec{n}_{li},$$

$$\dot{m}_{BCli} = -\dot{I}_{Cli} \cdot \vec{S}_{BCli} = -\dot{I}_{Cli} \cdot a_i \cdot d_l \cdot \vec{n}_{li},$$

де l – номер прямолінійного контуру ТП ($l = 1, \dots, K$); N – кількість елементарних мікроконтурів у прямолінійному контурі l .

Умовою застосування моделі (5) з обмеженою похибкою 10 % є

$$R \geq 3d \text{ при } a_i \geq d; \quad d_{\max} = d. \quad (6)$$

На рис. 6,б представлена схема розподілу магнітних моментів низьковольтного струмопроводу ТП 100 кВА (рис. 6,а) при реалізації запропонованої модифікованої двофазної мультидипольної моделі (5).

Таким чином, запропонована авторами модифікована двофазна мультидипольна математична модель МП ТП (5) дозволяє вдвічі наблизити розрахункову область за рахунок зменшення мінімального габаритного розміру її мікроконтуру – із подвійної міжфазної відстані $2d$ до міжфазної відстані d , що робить можливим моделювання ЗМП для всіх вбудованих ТП при відстанях від 1 м до їх струмопроводів. Крім того, модифікована модель (5) дозволяє зменшити обсяг обчислень за рахунок відповідного зменшення кількості магнітних моментів у порівнянні із відомою моделлю (3).

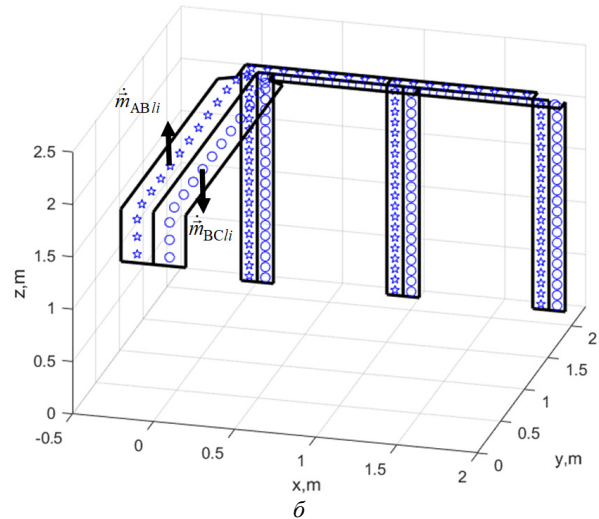


Рис. 6. Низьковольтний струмопровід ТП10/0,4 кВ, 100 кВА ($I_n = 150$ А (0,4 кВ); $I_1 = I_2 = I_n$; $I_3 = 2/3I_n$; $I_4 = I_5 = I_6 = I_7 = 1/3I_n$) (а) і розподіл магнітних моментів мікроконтурів при використанні двофазної мультидипольної математичної моделі МП (б)

Верифікація модифікованої мультидипольної моделі струмопроводу ТП. Експериментальну перевірку запропонованої моделі ЗМП ТП (5) виконуємо на основі порівняння результатів розрахунку індукції ЗМП струмопроводу ТП 100 кВА (рис. 6), та вимірів індукції МП повномасштабного лабораторного макету цього струмопроводу (рис. 9).

Результати розрахунку індукції МП струмопроводу у горизонтальній площині, розташованій на висоті 1,85 м над струмопроводом ТП (на висоті 0,5 м над підлогою приміщення), виконані відповідно до (5) на основі оригінальної комп'ютерної програми авторів у програмному пакеті MATLAB і представлені на рис. 7,а та рис. 8.

Експериментальні дослідження ЗМП ТП виконані на повномасштабному лабораторному макеті ТП 100 кВА (рис. 9) із номінальним струмом 150 А, де джерелом МП є низьковольтний струмопровід (рис. 6,а).

Макет струмопроводу (рис. 9) виконано із дерев'яних рейок та проводу ПВС із перерізом 30 мм^2 і змонтовано на робочому місті Магнітовимірювального стенду унікального магнітодинамічного комплексу ІПМаш НАН України [37]. Лабораторна установка (рис. 10) включає макет струмопроводу (рис. 9), який живиться через індукційний регулятор типу IP 59/32 із можливістю регулювання трифазного струму у діапазоні 0-220 А. Вимірювання діючих значень індукції МП виконувались у вузлах координатної сітки із шагом 0,25 м магнітометрами типу EMF-828, Magnetoscop 1.069 на контрольній площині, віддаленій від струмопроводу на відстань 1,85 м.

Для спрощення вимірювань, макет ТП (рис. 9) покладений на бік. При цьому вимірювання виконувались на вертикальній площині, віддаленій від струмопроводу на 1,85 м, що аналогічно умовам виконаного розрахунку.

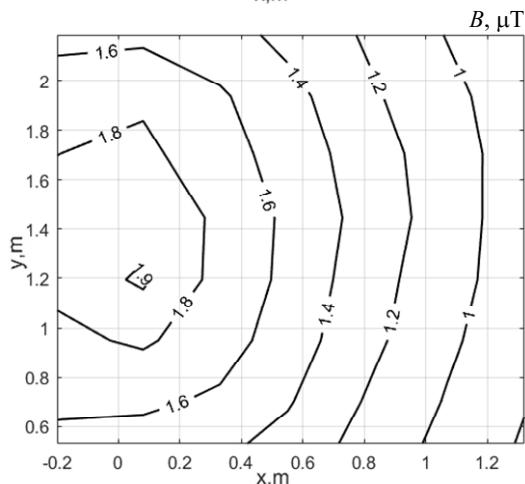
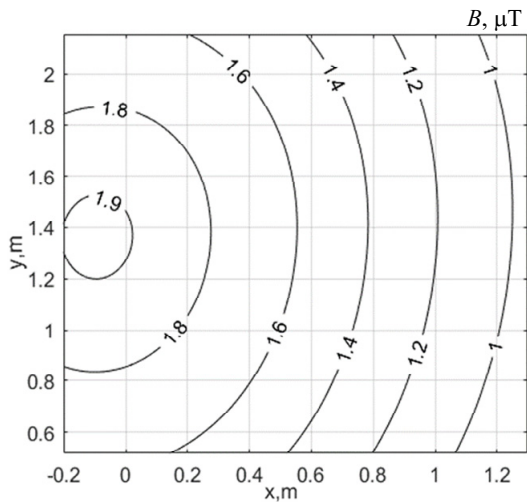


Рис. 7. Розподіл ЗМП ТП 100 кВА в горизонтальній площині над ТП на висоті 1,85 м при номінальному навантаженні: а – розрахунок; б – експеримент

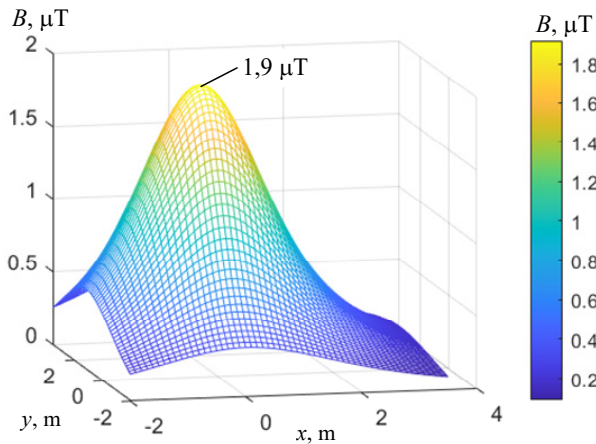


Рис. 8. Розрахункові значення розподілу ЗМП низьковольтного струмопроводу ТП 100 кВА на висоті 1,85 м над струмопроводом при номінальному навантаженні

Результати вимірів представлені на рис. 7,б та табл. 1. Порівняння результатів розрахунку з результатами експерименту показує, що розрахункове значення індукції ЗМП ТП з розкидом менше 7 % збігається з результатами експерименту. Це підтверджує коректність запропонованої авторами модифікованої двофазної мультидипольної моделі ЗМП ТП та прийнятих вище припущень.



Рис. 9. Повномасштабний лабораторний макет струмопроводу низької напруги ТП 10/0,4 кВ, 100 кВА на магнітвиміральному стенді

Таблиця 1
Результати порівняння розрахунку та вимірів
ЗМП ТП 100 кВА

x, м	y, м	Розрахунок B, мкТл	Експеримент B, мкТл	Похибка, %
-0,1	0,33	1,622	1,526	5,92
0,43	0,75	1,506	1,443	4,22
0,94	1,25	1,159	1,098	5,25
1,42	1,74	0,821	0,779	5,14
0,18	0,5	1,698	1,640	3,43
0,65	1	1,445	1,418	1,91
1,17	1,51	1,038	0,984	5,21
-0,1	0,33	1,822	1,757	3,57
0,94	1,25	1,289	1,230	4,58
0,18	0,5	1,869	1,914	2,43
0,65	1	1,586	1,546	2,51
-0,1	0,33	1,900	1,863	1,93
0,43	0,75	1,766	1,785	1,04
0,94	1,25	1,349	1,302	3,47
1,42	1,74	0,946	0,886	6,31
0,18	0,5	1,848	1,847	0,04
0,65	1	1,579	1,524	3,49
-0,1	0,33	1,773	1,700	4,16
0,43	0,75	1,666	1,625	2,45
0,94	1,25	1,291	1,214	5,97
1,42	1,74	0,920	0,876	4,78
0,18	0,5	1,628	1,556	4,40
0,65	1	1,417	1,345	5,08
1,17	1,51	1,047	0,990	5,39

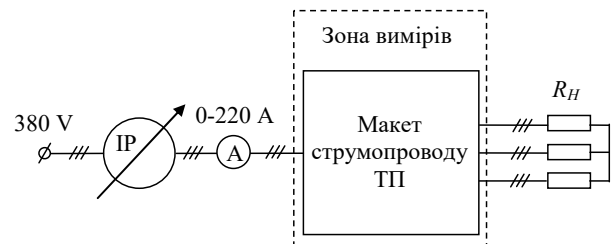


Рис. 10. Схема лабораторної установки для дослідження ЗМП макету струмопроводу ТП 100 кВА

Таким чином, запропоновано модифіковану двофазну мультидипольну математичну модель (5) для розрахунку ЗМП струмопроводів ТП та виконано її

експериментальну перевірку на повномасштабному лабораторному макеті низьковольтного струмопроводу ТП 100 кВА. Порівняння результатів розрахунку та експерименту підтверджує коректність запропонованої модифікованої математичної моделі та розрахункових співвідношень на її основі.

Перспективним є використання запропонованої модифікованої двофазної мультидипольної математичної моделі для розрахунку МП криволінійних (гнутих) струмопроводів.

Висновки.

1. Підтверджено, що основним джерелом МП вбудованих ТП є їх низьковольтний струмопровід, вклад якого в загальний рівень магнітного поля на відстані 2 м складає більш 90 %, що дозволяє в інженерних розрахунках не враховувати інші джерела МП ТП.

2. На основі аналізу результатів досліджень закордонних авторів, а також власних досліджень МП в житлових будинках із вбудованими ТП в Україні, показано, що рівень індукції магнітного поля вбудованих ТП потужністю 100-1260 кВА, розташованих в житлових приміщеннях над ТП, складає від 1,5 до 13 мкТл, що істотно перевищує прийнятний в Україні гранично допустимий рівень (0,5 мкТл), складає небезпеку для здоров'я населення і підтверджує актуальність зменшення МП ТП.

3. Запропоновано модифіковану двофазну мультидипольну математичну модель зовнішнього МП для основного джерела магнітного поля ТП - його трифазного струмопроводу, яка ґрунтується на двофазній дипольній моделі трифазного електричного кола і в порівнянні із відомою мультидипольною моделлю дозволяє без збільшення похибки вдвічі наблизити розрахункову область і забезпечити розрахунок зовнішнього МП від вбудованої ТП у всіх житлових приміщеннях будинку, в тому числі розташованих на відстані від одного метра до ТП.

4. Здійснено експериментальну перевірку модифікованої двофазної мультидипольної моделі МП трифазного струмопроводу на повномасштабній фізичній моделі струмопроводу ТП 100 кВА, виконаній на магнітовимірювальному стенді унікального магнітодинамічного комплексу ІПМаш НАН України, що підтвердило співпадіння результатів розрахунку і експерименту з розкидом менш 7 %.

5. Використання запропонованої двофазної мультидипольної моделі трифазного струмопроводу вбудованих ТП дозволить поширити розрахунок МП на її основі на всі сусідні житлові приміщення, в тому числі наближені на відстані до 1 м, що буде сприяти вирішенню проблеми захисту населення від негативної дії магнітного поля промислової частоти.

Конфлікт інтересів. Автори статті заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Leung S.W., Chan K.H., Fung L.C. Investigation of power frequency magnetic field radiation in typical high-rise building. *European Transactions on Electrical Power*, 2011, vol. 21, no. 5, pp. 1711-1718. doi: <https://doi.org/10.1002/etep.517>.
2. 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>.
3. 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>.
4. Geri A., Veca G. M. Power-frequency magnetic field calculation around an indoor transformer substation. *WIT Transactions on Modelling and Simulation*, 2005, vol. 39, pp. 695-704. doi: <https://doi.org/10.2495/BE050641>.
5. 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*, session 2. 1999, pp. 161-164.
6. Burnett J., Du Yaping P. Mitigation of extremely low frequency magnetic fields from electrical installations in high-rise buildings. *Building and Environment*, 2002, vol. 37, no. 8-9, pp. 769-775. doi: [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(02\)00043-4](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(02)00043-4).
7. Bravo-Rodriguez J., Del-Pino-Lopez J., Cruz-Romero P. A Survey on optimization techniques applied to magnetic field mitigation in power systems. *Energies*, 2019, vol. 12, no. 7, art. no. 1332. doi: <https://doi.org/10.3390/en12071332>.
8. Alotto P., Guarnieri M., Moro F., Turri R. Mitigation of residential magnetic fields generated by MV/LV substations. *42nd International Universities Power Engineering Conference*. Brighton, UK, 2007, pp. 832-836. doi: <https://doi.org/10.1109/UPEC.2007.4469057>.
9. Buccella C., Feliziani M., Prudenzi A. Active shielding design for a MV/LV distribution transformer substation. *2002 3rd International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. Beijing, China, 2002, pp. 350-353. doi: <https://doi.org/10.1109/ELMAGC.2002.1177442>.
10. 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, no. S1, pp. 97-106. doi: <https://doi.org/10.3233/JAE-172286>.
11. Del-Pino-Lopez J.C., Giaccone L., Canova A., Cruz-Romero P. Ga-based active loop optimization for magnetic field mitigation of MV/LV substations. *IEEE Latin America Transactions*, 2014, vol. 12, no. 6, pp. 1055-1061. doi: <https://doi.org/10.1109/TLA.2014.6894000>.
12. Del-Pino-Lopez 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. doi: <https://doi.org/10.1016/j.epr.2014.10.019>.
13. Garzia F., Geri A. Active shielding design in full 3D space of indoor MV/LV substations using genetic algorithm optimization. *IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility*. Boston, MA, USA, 2003, vol. 1, pp. 197-202. doi: <https://doi.org/10.1109/ISEMC.2003.1236591>.
14. Garzia F., Geri A. Reduction of magnetic pollution in urban areas by an active field cancellation. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 2004, vol. 72, pp. 569-579. doi: <https://doi.org/10.2495/SC040561>.
15. Celozzi S., Garzia F. Active shielding for power-frequency magnetic field reduction using genetic algorithms optimization. *IEE Proceedings – Science, Measurement and Technology*, 2004, vol. 151, no. 1, pp. 2-7. doi: <https://doi.org/10.1049/ip-smt:20040002>.
16. Shenkman A., Sonkin N., Kamensky V. Active protection from electromagnetic field hazards of a high voltage power line. *HAIT Journal of Science and Engineering*, 2005, vol. 2, no. 2, pp. 254-265.
17. Celozzi S. Active compensation and partial shields for the power-frequency magnetic field reduction. *2002 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Minneapolis, MN, USA, 2002, vol. 1, pp. 222-226. doi: <https://doi.org/10.1109/isemc.2002.1032478>.
18. Canova A., del-Pino-Lopez J.C., Giaccone L., Manca M. Active Shielding System for ELF Magnetic Fields. *IEEE Transactions on Magnetics*. March 2015, vol. 51, no. 3, pp. 1-4. doi: <https://doi.org/10.1109/tmag.2014.2354515>.
19. Szabo J., Janossy G., Thuroczy G. Survey of residential 50 Hz EMF exposure from transformer stations. *Bioelectromagnetics*, 2007, vol. 28, no. 1, pp. 48-52. doi: <https://doi.org/10.1002/bem.20264>.
20. Ilonen K., Markkanen A., Mezei G., Juutilainen J. Indoor transformer stations as predictors of residential ELF magnetic field exposure. *Bioelectromagnetics*, 2008, vol. 29, no. 3, pp. 213-218. doi: <https://doi.org/10.1002/bem.20385>.
21. 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 im-

prove exposure assessment. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, 2014, vol. 24, no. 1, pp. 100-104. doi: <https://doi.org/10.1038/jes.2013.54>.

22. Grbic M., Canova A., Giaccone L. Levels of magnetic field in an apartment near 110/35 kV substation and proposal of mitigation techniques. *Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion*. Belgrade, 2016, pp. 1-8. doi: <https://doi.org/10.1049/cp.2016.1025>.

23. Rahman N.A., Rashid N.A., Mahadi W.N., Rasol Z. Magnetic Field Exposure Assessment of Electric Power Substation in High Rise Building. *Journal of Applied Sciences*, 2011, vol. 11, pp. 953-961. doi: <https://doi.org/10.3923/jas.2011.953.961>.

24. Izagirre J., Del Rio L., Gilbert I.P., Rodriguez-Seco J.E., Güemes J.A., Iralagoitia A.M. Application of a new IEC magnetic field assessment methodology to promote transformer substation sustainable development. *IEEE 2011 EnergyTech*. Cleveland, OH, USA, 2011, pp. 1-6. doi: <https://doi.org/10.1109/EnergyTech.2011.5948529>.

25. 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, art. no. 2641. doi: <https://doi.org/10.3390/su10082641>.

26. Rösli M., Jenni D., Kheifets L., Mezei G. Extremely low frequency magnetic field measurements in buildings with transformer stations in Switzerland. *Science of the Total Environment*, 2011, vol. 409, no. 18, pp. 3364-3369. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.05.041>.

27. Rozov V.Y., Pelevin D.Y., Pielievina K.D. External magnetic field of urban transformer substations and methods of its normalization. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2017, no. 5, pp. 60-66. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2017.5.10>.

28. *Правила улаштування електроустановок*. Харків, Видавництво «Форт», 2017. 760 с.

29. Kuznetsov. B.I., Nikitina T.B., Bovdvi I.V. Method of adjustment of three-circuit system of active shielding of magnetic field in multi-storey buildings from overhead power lines with wires triangular arrangement. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2022, no. 1, pp. 21-28. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2022.1.03>.

30. Kuznetsov. B.I., Nikitina T.B., Bovdvi I.V. Comparison of the effectiveness of thruple-loop and double-loop systems of active shielding of a magnetic field in a multi-storey old buildings. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2022, no. 3, pp. 21-27. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2022.3.04>.

31. Kuznetsov. B.I., Nikitina T.B., Bovdvi I.V. 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, p. 15-21. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2022.6.03>.

32. Розов В.Ю., Реуцкий С.Ю., Пелевин Д.Е., Пилюгина О.Ю. Магнитное поле линий электропередачи и методы его снижения до безопасного уровня. *Технічна електродинаміка*, 2013, № 2, С. 3-9.

33. Розов В.Ю. Внешние магнитные поля силового электрооборудования и методы их уменьшения. Препр. НАН Украины. Ин-т электродинамики; № 772. – Киев: 1995. – 42 с.

34. 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>.

35. Розов В.Ю., Гринченко В.С., Пелевин Д.Е., Чуннихин К.В. Моделирование электромагнитного поля жилых домов расположенных вблизи линии электропередачи. *Технічна електродинаміка*, 2016, № 3, С. 6-8.

36. Розов В.Ю. Пелевин Д.Е. Дипольная модель магнитного поля трехфазной электрической цепи. *Технічна електродинаміка*, 2012, № 4, С. 3-7.

37. Baranov M.I., Rozov V.Y., Sokol Y.I. To the 100th anniversary of the national academy of sciences of Ukraine – the cradle of domestic science and technology. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2018, no. 5, pp. 3-11. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2018.5.01>.

REFERENCES

1. Leung S.W., Chan K.H., Fung L.C. Investigation of power frequency magnetic field radiation in typical high-rise building. *European Transactions on Electrical Power*, 2011, vol. 21, no. 5, pp. 1711-1718. doi: <https://doi.org/10.1002/etep.517>.

2. 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>.

3. 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>.

4. Geri A., Veca G. M. Power-frequency magnetic field calculation around an indoor transformer substation. *WIT Transactions on Modelling and Simulation*, 2005, vol. 39, pp. 695-704. doi: <https://doi.org/10.2495/BE050641>.

5. 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*, session 2. 1999, pp. 161-164.

6. Burnett J., Du Yaping P. Mitigation of extremely low frequency magnetic fields from electrical installations in high-rise buildings. *Building and Environment*, 2002, vol. 37, no. 8-9, pp. 769-775. doi: [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(02\)00043-4](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(02)00043-4).

7. Bravo-Rodriguez J., Del-Pino-Lopez J., Cruz-Romero P.A. Survey on optimization techniques applied to magnetic field mitigation in power systems. *Energies*, 2019, vol. 12, no. 7, art. no. 1332. doi: <https://doi.org/10.3390/en12071332>.

8. Alotto P., Guarnieri M., Moro F., Turri R. Mitigation of residential magnetic fields generated by MV/LV substations. *42nd International Universities Power Engineering Conference*. Brighton, UK, 2007, pp. 832-836. doi: <https://doi.org/10.1109/UPEC.2007.4469057>.

9. Buccella C., Feliziani M., Prudenzi A. Active shielding design for a MV/LV distribution transformer substation. *2002 3rd International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. Beijing, China, 2002, pp. 350-353. doi: <https://doi.org/10.1109/ELMAGC.2002.1177442>.

10. 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, no. S1, pp. 97-106. doi: <https://doi.org/10.3233/JAE-172286>.

11. Del-Pino-Lopez J.C., Giaccone L., Canova A., Cruz-Romero P. Ga-based active loop optimization for magnetic field mitigation of MV/LV substations. *IEEE Latin America Transactions*, 2014, vol. 12, no. 6, pp. 1055-1061. doi: <https://doi.org/10.1109/TLA.2014.6894000>.

12. Del-Pino-Lopez 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. doi: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2014.10.019>.

13. Garzia F., Geri A. Active shielding design in full 3D space of indoor MV/LV substations using genetic algorithm optimization. *IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility*. Boston, MA, USA, 2003, vol. 1, pp. 197-202. doi: <https://doi.org/10.1109/ISEMC.2003.1236591>.

14. Garzia F., Geri A. Reduction of magnetic pollution in urban areas by an active field cancellation. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 2004, vol. 72, pp. 569-579. doi: <https://doi.org/10.2495/SC040561>.

15. Celozzi S., Garzia F. Active shielding for power-frequency magnetic field reduction using genetic algorithms optimization. *IEE Proceedings – Science, Measurement and Technology*, 2004, vol. 151, no. 1, pp. 2-7. doi: <https://doi.org/10.1049/ip-smt:20040002>.

16. Shenkman A., Sonkin N., Kamensky V. Active protection from electromagnetic field hazards of a high voltage power line. *HAIT Journal of Science and Engineering*, 2005, vol. 2, no. 2, pp. 254-265.

17. Celozzi S. Active compensation and partial shields for the power-frequency magnetic field reduction. *2002 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Minneapolis, MN, USA, 2002, vol. 1, pp. 222-226. doi: <https://doi.org/10.1109/isemc.2002.1032478>.

18. Canova A., del-Pino-Lopez J.C., Giaccone L., Manca M. Active Shielding System for ELF Magnetic Fields. *IEEE Transactions on Magnetics*, March 2015, vol. 51, no. 3, pp. 1-4. doi: <https://doi.org/10.1109/tmag.2014.2354515>.
19. Szabo J., Janossy G., Thuroczy G. Survey of residential 50 Hz EMF exposure from transformer stations. *Bioelectromagnetics*, 2007, vol. 28, no. 1, pp. 48-52. doi: <https://doi.org/10.1002/bem.20264>.
20. Ilonen K., Markkanen A., Mezei G., Juutilainen J. Indoor transformer stations as predictors of residential ELF magnetic field exposure. *Bioelectromagnetics*, 2008, vol. 29, no. 3, pp. 213-218. doi: <https://doi.org/10.1002/bem.20385>.
21. 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. 24, no. 1, pp. 100-104. doi: <https://doi.org/10.1038/jes.2013.54>.
22. Grbic M., Canova A., Giaccone L. Levels of magnetic field in an apartment near 110/35 kV substation and proposal of mitigation techniques. *Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion*, Belgrade, 2016, pp. 1-8. doi: <https://doi.org/10.1049/cp.2016.1025>.
23. Rahman N.A., Rashid N.A., Mahadi W.N., Rasol Z. Magnetic Field Exposure Assessment of Electric Power Substation in High Rise Building. *Journal of Applied Sciences*, 2011, vol. 11, pp. 953-961. doi: <https://doi.org/10.3923/jas.2011.953.961>.
24. Izagirre J., Del Rio L., Gilbert I.P., Rodriguez-Seco J.E., Güemes J.A., Iralagoitia A.M. Application of a new IEC magnetic field assessment methodology to promote transformer substation sustainable development. *IEEE 2011 EnergyTech*. Cleveland, OH, USA, 2011, pp. 1-6. doi: <https://doi.org/10.1109/EnergyTech.2011.5948529>.
25. 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, art. no. 2641. doi: <https://doi.org/10.3390/su10082641>.
26. Rössli M., Jenni D., Kheifets L., Mezei G. Extremely low frequency magnetic field measurements in buildings with transformer stations in Switzerland. *Science of the Total Environment*, 2011, vol. 409, no. 18, pp. 3364-3369. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.05.041>.
27. Rozov V.Y., Pelevin D.Y., Pielievina K.D. External magnetic field of urban transformer substations and methods of its normalization. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2017, no. 5, pp. 60-66. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2017.5.10>.
28. *Electrical installation regulations*. Kharkiv, Fort Publ., 2017. 760 p. (Ukr).
29. Kuznetsov B.I., Nikitina T.B., Bovdui I.V. Method of adjustment of three-circuit system of active shielding of magnetic field in multi-storey buildings from overhead power lines with wires triangular arrangement. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2022, no. 1, pp. 21-28. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2022.1.03>.
30. Kuznetsov B.I., Nikitina T.B., Bovdui I.V. Comparison of the effectiveness of thripole-loop and double-loop systems of active shielding of a magnetic field in a multi-storey old buildings. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2022, no. 3, pp. 21-27. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2022.3.04>.
31. Kuznetsov B.I., Nikitina T.B., Bovdui I.V. 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, p. 15-21. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2022.6.03>.
32. Rozov V.Yu., Reutskyi S.Yu., Pelevin D.Ye., Pyliugina O.Yu. The magnetic field of power transmission lines and the methods of its mitigation to a safe level. *Technical Electrodynamics*, 2013, no. 2, pp. 3-9. (Rus).
33. Rozov V.Yu. *External magnetic fields of power electrical equipment and methods for reducing them*. Kyiv, the Institute of Electrodynamics Publ., 1995, no. 772, 42 p. (Rus).
34. Pelevin D.Y. Screening magnetic fields of the power frequency by the walls of houses. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2015, no. 4, pp. 53-55. (Rus). doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2015.4.10>.
35. Rozov V.Yu., Grinchenko V.S., Pelevin D.Ye., Chunikhin K.V. Simulation of electromagnetic field in residential buildings located near overhead lines. *Technical Electrodynamics*, 2016, no. 3, pp. 6-8. (Rus).
36. Rozov V.Yu., Pelevin D.Ye. The dipole model of magnetic field of three-phase electric circuit. *Technical Electrodynamics*, 2012, no. 4, pp. 3-7. (Rus).
37. Baranov M.I., Rozov V.Y., Sokol Y.I. To the 100th anniversary of the national academy of sciences of Ukraine – the cradle of domestic science and technology. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2018, no. 5, pp. 3-11. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2018.5.01>.

Надійшла (Received) 18.01.2023
 Прийнята (Accepted) 25.03.2023
 Опублікована (Published) 01.09.2023

Розов Володимир Юрійович¹, д.т.н., проф., чл.-кор. НАН України,
 Пелевін Дмитро Євгенович¹, к.т.н., ст. доцл.,
 Кундіус Катерина Дмитрівна¹, пров. інж., аспірантка,
¹ Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного
 НАН України,
 61046, Харків, вул. Пожарського, 2/10,
 e-mail: vyurozov@gmail.com;
 pelevindmitro@ukr.net (Corresponding Author);
 kundiuckateryna@ukr.net.

V.Yu. Rozov¹, D.Ye. Pelevin¹, K.D. Kundius¹
¹ Anatolii Pidhornyi Institute of Mechanical Engineering
 Problems of the National Academy of Sciences of Ukraine,
 2/10, Pozharskogo Str., Kharkiv, 61046, Ukraine.
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.
Problem. Substations 10(6)/0.4 kV built into residential buildings create a magnetic field with magnetic flux density of more than 10 μT in nearby residential premises, which is a danger to the health of the population and makes the study of this magnetic field relevant for the development of methods for its protection. The main source of the substations external magnetic field is their low-voltage current conductor, the contribution of which to the total level of the magnetic field is more than 90 %. Multi-dipole mathematical models, which have a clear physical interpretation, are a promising method of modeling the substations magnetic field, which is important for the further development of methods of population protection. The purpose of the work is to modify the well-known multi-dipole model for calculation based on it with a limited error of the external magnetic field of current conductors of built-in substations that are close to residential buildings at a distance of up to one meter. **Methodology.** A modified two-phase multi-dipole mathematical model of the main source of the external magnetic field of substation – its three-phase low-voltage current conductors – is proposed, which, unlike the existing model, is based on a two- you to halve the distance to the area of calculation without increasing the error. **Verification.** An experimental verification of the modified two-phase multi-dipole model of the magnetic field of a three-phase 100 kVA transformer substation on its full-scale physical model was carried out, and the results of the experiment were presented, confirming the coincidence of the calculation and the experiment with a spread of no more than 7 %. References 37, tables 1, figures 10.
 Key words: built-in substation, residential building, current conductor, external magnetic field, multi-dipole mode.

How to cite this article:

Rozov V.Yu., Pelevin D.Ye., 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>