

Кундіус Катерина Дмитрівна, аспірант кафедри «Автоматизовані електромеханічні системи», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова 2, Харків, Україна, 61002; провідний інженер, Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України, вул. Пожарського 2/10, Харків, Україна, 61046; Тел. (096)8988759; e-mail: kundiuckateryna@ukr.net; ORCID (0000-0002-9624-0572).

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ АКТИВНОГО ЕКРАНУВАННЯ ЗОВНІШНЬОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ ВБУДОВАНИХ ТРАНСФОРМАТОРНИХ ПІДСТАНЦІЙ ПОТУЖНІСТЮ ДО 1260 кВА

***Анотація.** У статті на основі розроблених методів розрахунку магнітного поля та синтезу систем активного екранування магнітного поля трансформаторних підстанцій обґрунтована можливість зменшення до рівня санітарних норм індукції магнітного поля у житловому приміщенні розміщеному біля трансформаторної підстанції потужністю до 100 кВА з допомогою найпростіших систем активного екранування з однією обмоткою. Обґрунтування виконане теоретично на комп'ютерній моделі та експериментально на лабораторному макеті трансформаторної підстанції і системи активного екранування. Проведено синтез систем активного екранування магнітного поля трансформаторної підстанції потужністю 1260 кВА та обґрунтована можливість зменшення до рівня санітарних норм індукції магнітного поля у житловому приміщенні системою активного екранування з чотирма компенсаційними обмотками. Проведено порівняння ефективності розроблених систем активного екранування магнітного поля трансформаторних підстанцій з відомими методами пасивного екранування та методами удосконалення конструкції трансформаторних підстанцій. Вперше теоретично та експериментально обґрунтована достатність використання методів пасивного екранування при потужності трансформаторних підстанцій до 300 кВА, методів удосконалення конструкції при потужності трансформаторних підстанцій до 670 кВА та методу активного екранування при потужності трансформаторних підстанцій до 1260 кВА, який є універсальним і дозволяє виконати зменшення магнітного поля без втручання в конструкцію трансформаторної підстанції. Запропоновані рекомендації з використання методів зменшення магнітного поля в житлових приміщеннях від вбудованих трансформаторних підстанцій потужністю 100–1260 кВА.*

***Ключові слова:** вбудована трансформаторна підстанція, магнітне поле, житлове приміщення, активне екранування, пасивне екранування, ефективність екранування.*

Kundiuck Kateryna Dmytrivna, PhD student «Department of Automated electromechanics systems», National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", str. Kirpychova, 2, Kharkiv, Ukraine, 61002. A. Pidhornyi Institute of Mechanical Engineering Problems of the National Academy of Sciences of Ukraine, Pozharskogo Str. 2/10, Kharkiv, Ukraine, 61046. Tel. (096)8988759; e-mail: kundiuckateryna@ukr.net; ORCID (0000-0002-9624-0572).

ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF ACTIVE SHIELDING OF THE EXTERNAL MAGNETIC FIELD OF BUILT-IN TRANSFORMER SUBSTATIONS WITH A POWER UP TO 1260 kVA

***Abstract.** In the article, based on the developed methods of calculating the magnetic field and synthesis active screening system of the magnetic field of transformer substations, the possibility of mitigation the induction of the magnetic field to the level of sanitary standards in a living space located near a transformer substation with a power of up to 100 kVA using the active loop. The substantiation was performed theoretically on a computer model and experimentally on a laboratory model of a transformer substation and an active shielding system. The synthesis of active screening system of the magnetic field of a transformer substation with a power of 1260 kVA was carried out, and the possibility of mitigation the induction of the magnetic field in a living space to the reference levels by means of an active screening system with four active loops. A comparison of the efficiency of the developed systems of active screening of the magnetic field of transformer substations with known methods of passive shielding and methods of improving the design of transformer substations was carried out. For the first time, the sufficiency of using passive shielding methods for the power of transformer substations up to 300 kVA, methods for improving the design for the power of transformer substations up to 600 kVA and the method of active shielding for the power of transformer substations up to 1260 kVA are substantiated. The method of active shielding is universal and allows you to mitigate the magnetic field without interfering with the design of the transformer substation.*

Recommendations for the use of magnetic field mitigation methods in living spaces from built-in standard transformer substations with a power of 100–1260 kVA have been developed.

Keywords: magnetic field, built-in transformer substation, living spaces, active shielding, passive shielding, shielding factor.

Кундиус Катерина Дмитрієвна, аспірант кафедри «Автоматизовані електромеханічні системи», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», ул. Кирпичева 2, Харків, Україна, 61002; ведучий інженер, Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Подгорного НАН України, ул. Пожарського, 2/10, Харків, Україна, 61046; Тел. (096) 8988759; e-mail: kundiuickateryna@ukr.net; ORCID (0000-0002-9624-0572).

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ АКТИВНОГО ЕКРАНИРОВАНЯ ВНЕШНЬОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ ВСТРОЄНИХ ТРАНСФОРМАТОРНИХ ПІДСТАНЦІЙ МОЩНОСТЮ ДО 1260 кВА

Анотація. В статті на основі розроблених методів розрахунок магнітного поля та синтезу систем активного екранування магнітного поля трансформаторних підстанцій обґрунтована можливість зменшення рівня санітарних норм індукції магнітного поля в житловому приміщенні, розташованому поруч з трансформаторною підстанцією потужністю до 100 кВА за допомогою найпростіших систем активного екранування з однією обмоткою. Обґрунтування виконано теоретично на комп'ютерній моделі та експериментально на лабораторній макеті трансформаторної підстанції та системи активного екранування. Проведено синтез систем активного екранування магнітного поля трансформаторної підстанції потужністю 1260 кВА та обґрунтовано можливість зменшення до рівня санітарних норм індукції магнітного поля в житловому приміщенні системою активного екранування з чотирма компенсаційними обмотками. Проведено порівняння ефективності розроблених систем активного екранування магнітного поля трансформаторних підстанцій з відомими методами пасивного екранування та методами удосконалення конструкції трансформаторних підстанцій. Вперше обґрунтовано достаточність використання методів пасивного екранування при потужності трансформаторних підстанцій до 300 кВА, методів удосконалення конструкції при потужності трансформаторних підстанцій до 670 кВА та методу активного екранування при потужності трансформаторних підстанцій до 1260 кВА, який є універсальним і дозволяє виконати зменшення магнітного поля без втручання в конструкцію трансформаторної підстанції. Предложено рекомендації по використанню методів зменшення магнітного поля в житлових приміщеннях від вбудованих трансформаторних підстанцій потужністю 100–1260 кВА.

Ключові слова: вбудована трансформаторна підстанція, магнітне поле, житлове приміщення, активне екранування, пасивне екранування, ефективність екранування.

Вступ. Вбудовані трансформаторні підстанції (ТП) є джерелом магнітного поля (МП), що створюють у прилеглих житлових приміщеннях небезпечний для населення рівень МП промислової частоти, який перевищує санітарні норми [1, 2]. Для захисту населення використовуються різні методи зменшення МП ТП [3, 8]. Метод пасивного екранування широко застосовують для захисту трансформаторних підстанцій [5–7], де для зменшення МП використовують пасивні екрани, виконані із електропровідних, магнітостатичних пластин, що розміщуються між ТП і житловими приміщеннями. Методи удосконалення конструкції передбачають зміну конструкції ТП, де за рахунок зміни положення ступоводів ТП зменшують МП ТП [6, 8–11]. Методи активного екранування, при яких МП ТП зменшується за рахунок використання активних контурів, що потребує використання додаткового джерела живлення та системи керування струмом у контурі [8, 12–17]. При цьому світова тенденція розвитку систем активного екранування спрямована на оптимізацію їх конструкції по енергоспоживанню і вартості за умови забезпечення необхідної ефективності екранування. Однак в

Україні розвитку методів і засобів активного екранування МП ТП не приділяється належної уваги. Так, не визначена гранична ефективність методів активного екранування у порівнянні із відомими методами пасивного екранування та методами удосконалення конструкції ТП в залежності від потужності ТП, що не дозволяє раціонально використовувати методи активного екранування, а також інші методи екранування для зменшення МП в житлових приміщеннях до рівня санітарних норм.

Мета роботи – на основі розроблених методів розрахунку розподілу МП в житлових приміщеннях будинків із вбудованими ТП визначити ефективність активного екранування МП в порівнянні з відомими методами пасивного екранування та методами удосконалення конструкції ТП для ТП різної потужності.

Викладення основного матеріалу. Магнітне поле від ТП в житлових приміщеннях, що розташовані на відстані в декілька метрів від ТП, визначається виключно їх струмопроводами [3]. Тому для розрахунку потенційного МП ТП використаємо розроблену автором мультидипольну математичну модель зовнішнього МП ТП [3]:

$$\vec{B}_S(P_i, t) = - \sum_{k=1}^K \sum_{\alpha=1}^3 \sum_{n=1}^N \nabla \left[\frac{\mu_0 (\vec{m}(t)_{lcn}, \vec{R}_{lci})}{4\pi R_{lci}^3} \right], \quad \vec{m}(t)_{lcn} = I(t) \cdot \vec{S}_{lcn}, \quad (1)$$

де N – кількість мікроконтурів у прямолінійному контурі струмопроводу ТП; K – кількість прямолінійних контурів; \vec{S}_{lcn} – вектор площі мікроконтурів; \vec{n}_i – одиничний вектор, нормальний до S_i ; \vec{R}_{lci} – радіус вектор від геометричного центру мікроконтурів до точки спостереження P_i ; $I(t)$ – миттєве значення струму мікроконтурів; α – номер фази струмопроводу ТП ($\alpha = 1 \dots, 3$); μ_0 – магнітна стала.

Синтез систем активного екранування (САЕ) проведемо за допомогою розробленого автором методу [4], на основі якого шукані параметри R (координати просторового розташування та струм компенсаційної обмотки (КО)) визначаються як

$$\vec{B}(R, P_i, t) = \vec{B}_S(P_i, t) + \vec{B}_y(R, P_i, t), \quad (2)$$

де $\vec{B}_y(R, P_i, t)$ – миттєві значення індукції МП, що генерується КО САЕ в точках P_i .

Пошук шуканих параметрів зводиться до рішення задачі багатокритеріальної оптимізації векторного критерію

$$B(R) = [B(R, P_1), B(R, P_2) \dots B(R, P_m)]^T, \quad (3)$$

компонентами якого $\vec{B}(R, P_i)$ є значення індукції результуючого МП у точках P_i .

Ефективність зменшення МП визначається коефіцієнтом екранування SF [4], як відношення індукції МП ТП у житлових приміщеннях до і після його екранування.

Активне екранування МП ТП 100 кВА.

Виконаємо синтез КО САЕ у приміщенні, розташованого зверху ТП 6/0,4 кВ з одним трансформатором потужністю 100 кВА (рис. 1а). Для гарантованого зменшення потенційного МП ТП до безпечного рівня у приміщенні достатньо зменшити МП на контрольній площині D на відстані 0,5 м від підлоги. Розрахункові значення (1) розподілу індукції МП ТП показані на рис. 1б, де максимальне значення МП становить 1,9 мкТл.

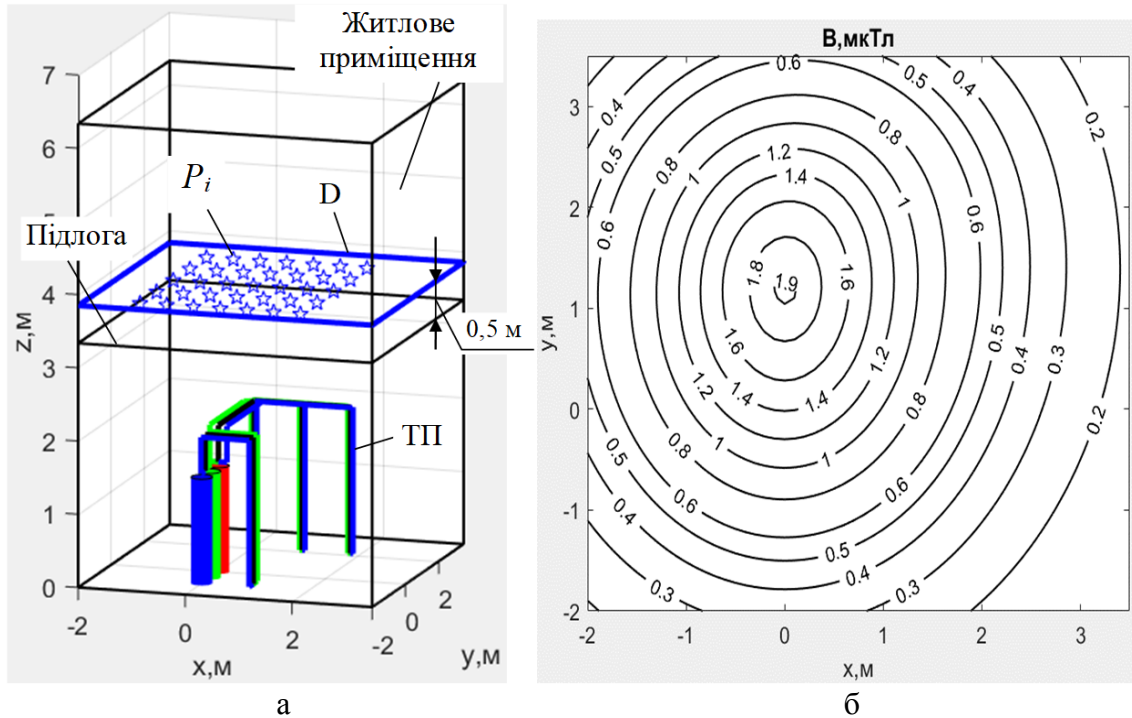


Рис. 1. Положення ТП і житлового приміщення а), розподіл індукції магнітного поля ТП на площині D б), $S_{\text{ном}}=100$ кВА

На основі методу синтезу САЕ (2-3) знайдено параметри КО, приведені у табл. 1. КО розміщена зверху над ТП паралельно підлозі на відстані 0,8 м від струмопроводу ТП (рис. 2а) та зменшує рівень МП до 0,25 мкТл (рис. 2б). Розрахункова ефективність екранування синтезованої системи $SF = 7,6$ одиниць.

Таблиця 1

Параметри компенсаційної обмотки САЕ для ТП 100 кВА

№ КО	Ампер-витки	Координати кутів КО (x,y,z) та відстань між КО та D (h)
1	$IW = 10,8$ А	$x1 = -0,82$ м, $x2 = -0,93$ м, $x3 = 1,15$ м, $x4 = 0,8$ м, $z = 2,8$ м, $y1 = -0,68$ м, $y2 = 2,6$ м, $y3 = 2,7$ м, $y4 = -0,6$ м, $h = 1,05$ м.

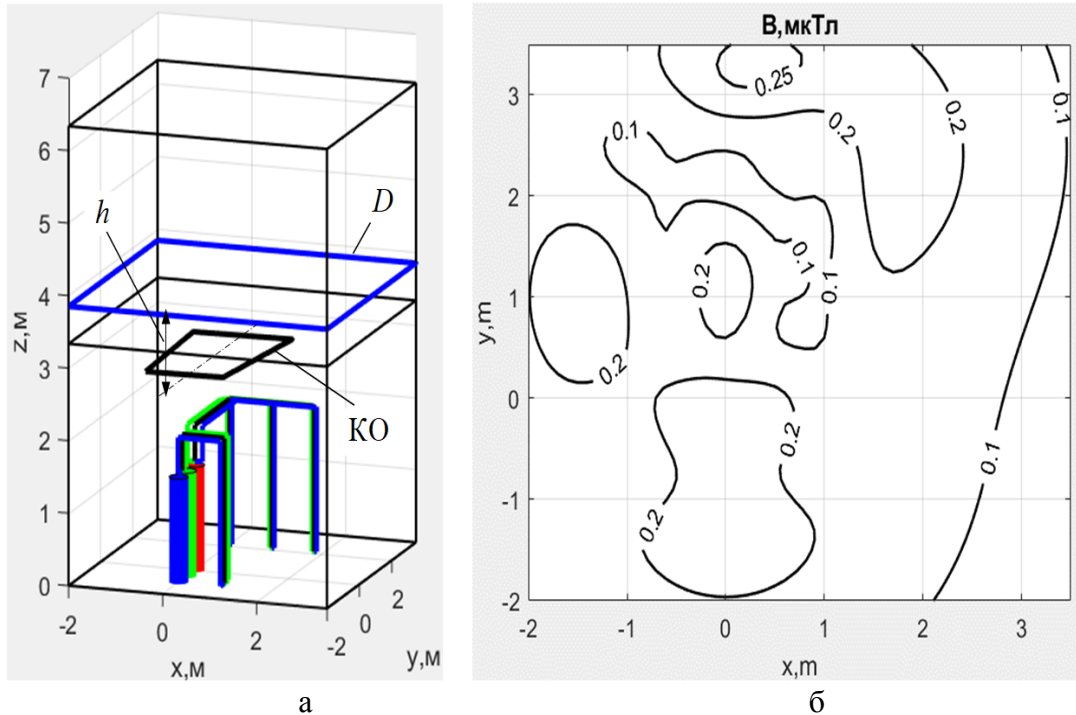


Рис. 2. Положення ТП та КО САЕ а), розподіл індукції зменшеного магнітного поля ТП на площині D б), $S_{\text{ном}} = 100 \text{ кВА}$

Експериментальна перевірка системи активного екранування МП ТП.

Експериментальна перевірка проведена на лабораторному макеті ТП 6/0,4 кВ з одним трансформатором потужністю 100 кВА виконаному у геометричному масштабі 1:1 (рис. 3).

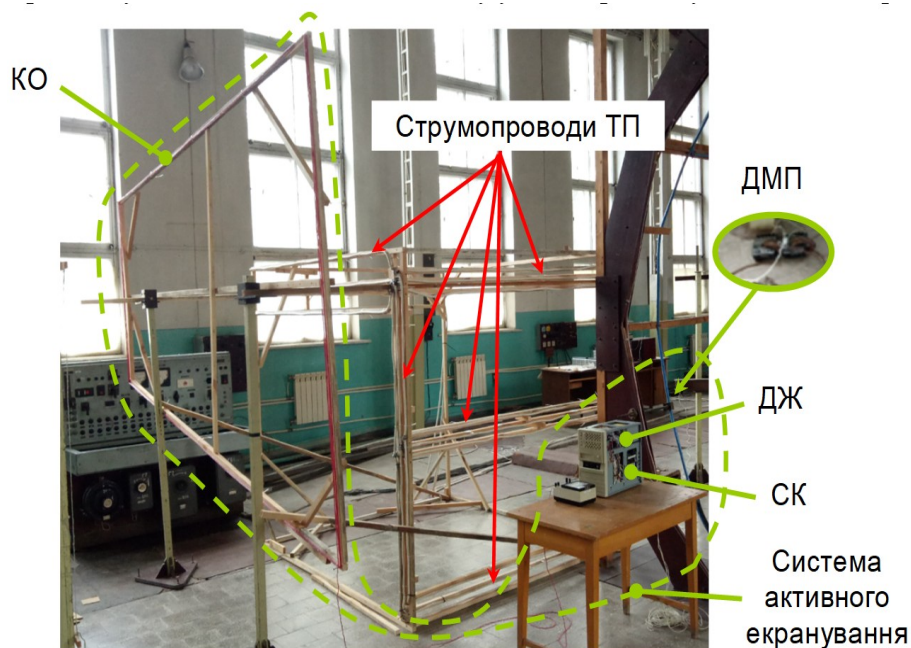


Рис. 3. Макет ТП 100 кВА та макет системи активного екранування МП

Поперечний переріз проводів трифазного струмопроводу $5 \times 2,5 \text{ мм}^2$.

Компенсаційна обмотка КО має 10 витків, активний опір 4 Ом. САЕ виконана у розімкненій структурі зі слідкуванням за струмом у одній фазі струмопроводу макету ТП. Де СК – система керування; ДЖ – джерело живлення; ДМП – датчик магнітного поля, що слідкує за струмом струмопроводу.

Експериментально визначене значення індукції МП макету ТП при фазному струмі 150 А (діюче значення) у низьковольтному струмопроводі 0,4 кВ на площині *D* представлено на рис. 4а. При цьому максимальне значення вихідної індукції МП становить $B_{max} = 1,9$ мкТл.

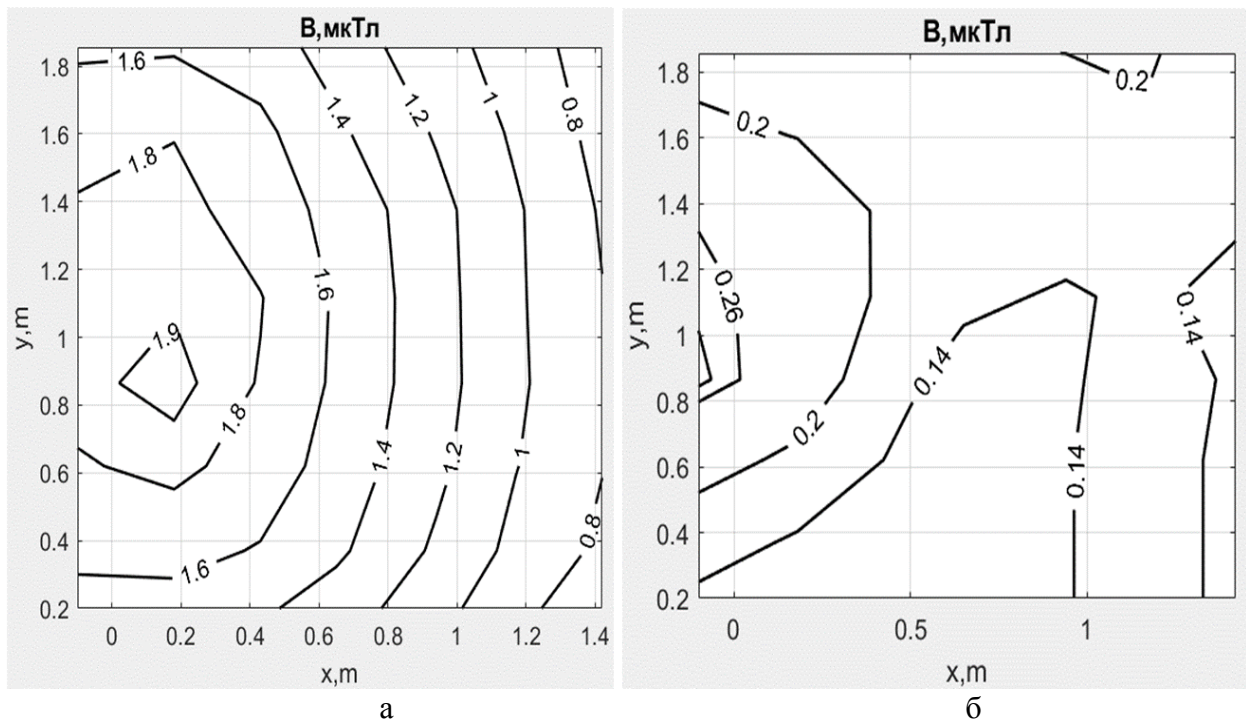


Рис. 4. Експериментально визначене магнітне поле ТП а), зменшене магнітне поле ТП на площині *D* б), $S_{ном} = 100$ кВА

Як показують результати експериментальних досліджень (рис. 4б), при використанні синтезованої САЕ рівень індукції МП зменшується до значення 0,27 мкТл, як на площині *D*, так і у всьому об'єму зверху над макетом ТП. При цьому синтезована САЕ має одну компенсаційну обмотку, розміщену на відстані 0,8 м від струмопроводу макету ТП і забезпечує ефективність екранування SF не менше 7 одиниць при струмі у КО 1,08 А, енергоспоживанні не більше 0,05 кВт та площі компенсаційної обмотки не більше 7 м². Порівняння результатів експерименту (рис. 1, 2) з результатами розрахунку (рис. 3, 4) показують похибку по ефективності САЕ не більше 8 %.

Таким чином, проведені вище теоретичні та експериментальні дослідження ефективності САЕ підтверджують можливість зменшення індукції МП ТП у приміщенні площею до 20 м² біля ТП 100 кВА 6/0,4кВ, до

рівня санітарних норм (0,5 мкТл) за допомогою САЕ з однією КО при енергоспоживання САЕ не більше 0,05 кВт, площі компенсаційної обмотки не більше 7 м².

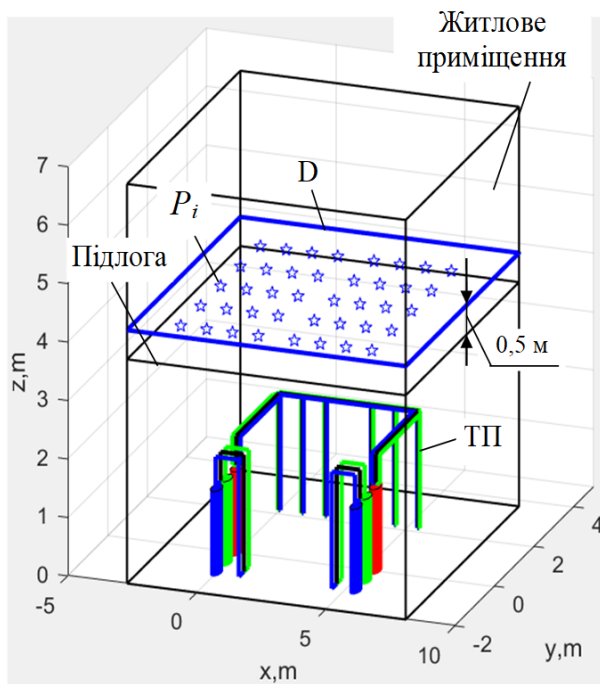
Активне екранування МП ТП 1260 кВА.

Виконаємо синтез КО САЕ у приміщенні зверху ТП площею 50 м² на типовій трансформаторній підстанції (ТП-2-77/79-630) з двома трансформаторами номінальною потужністю по 630 кВА (рис. 5а). Розрахункові значення розподілу індукції МП ТП (1) показані на контрольній площині D на відстані 0,5 м від підлоги, де максимальне значення МП становить 6,5 мкТл (рис. 5б). На основі методу синтезу САЕ (2-3) знайдемо параметри двох КО, що приведені у табл. 2. та на рис. 6а.

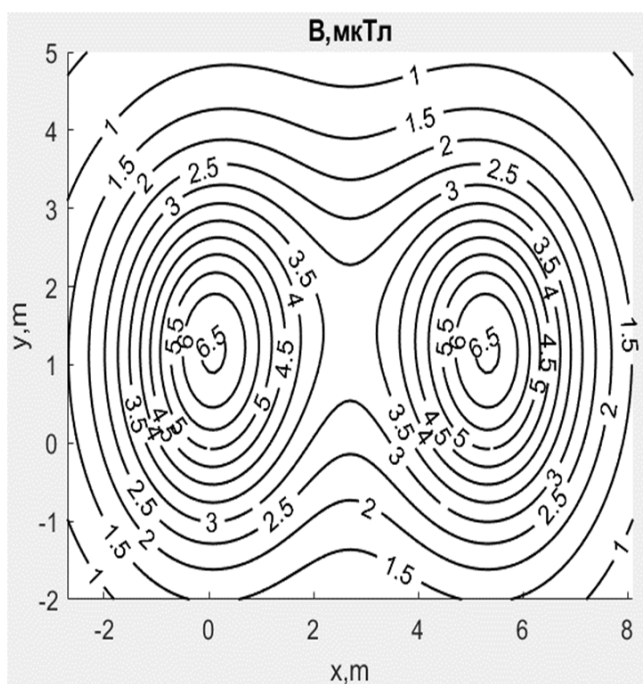
Таблиця 2

Параметри компенсаційних обмоток САЕ для ТП 1260 кВА

№ КО	Ампер-витки	Координати кутів КО (x,y,z) та відстань між КО та D (h)
1	$IW1 = 42,7 \text{ А}$	$x11 = -0,67 \text{ м}, x21 = -1,06 \text{ м}, x31 = 1,38 \text{ м}, x41 = 0,3 \text{ м}, z1 = 3 \text{ м},$ $y11 = -0,67 \text{ м}, y21 = 2,5 \text{ м}, y31 = 2,5 \text{ м}, y41 = -0,98 \text{ м}, h = 1,35 \text{ м},$
2	$IW2 = 42,7 \text{ А}$	$x12 = 6,07 \text{ м}, x22 = 6,46 \text{ м}, x32 = 4,02 \text{ м}, x42 = 5,1 \text{ м}, z2 = 3 \text{ м},$ $y12 = -0,67 \text{ м}, y22 = 2,5 \text{ м}, y32 = 2,5 \text{ м}, y42 = -0,98 \text{ м}, h = 1,35 \text{ м},$



а



б

Рис. 5. Положення ТП і житлового приміщення а), розподіл індукції магнітного поля ТП на площині D б), $S_{\text{ном}} = 1260 \text{ кВА}$

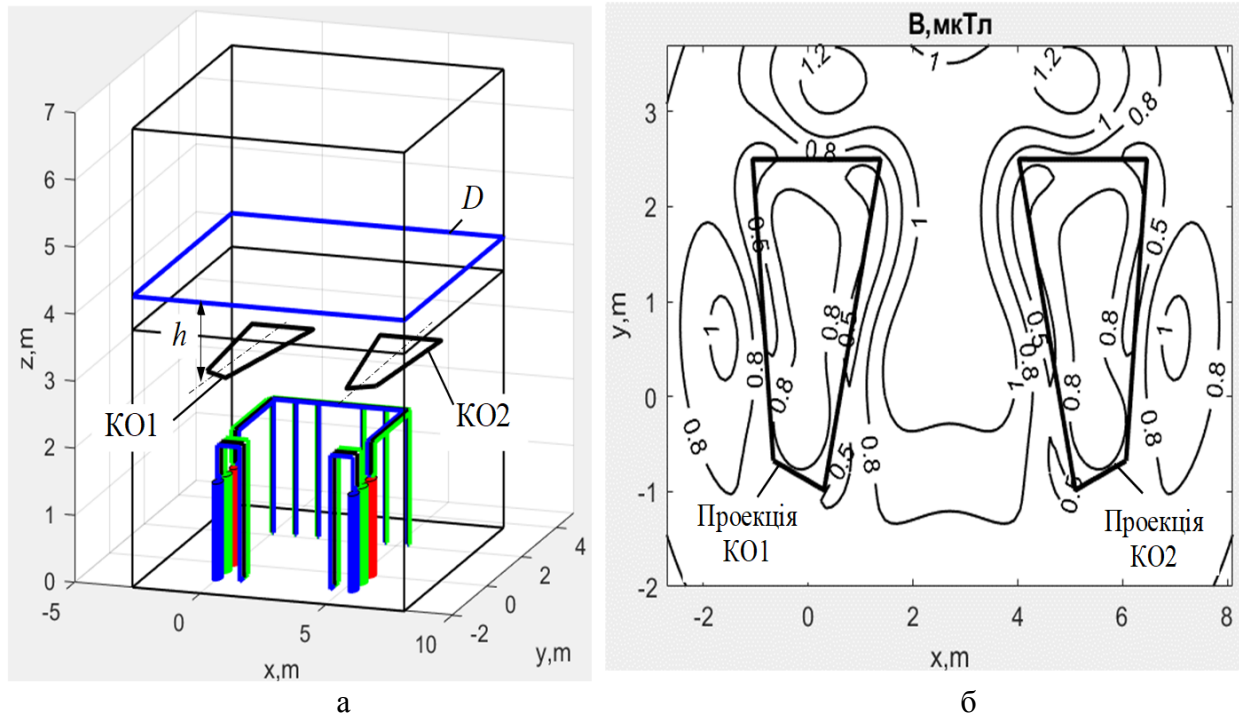


Рис. 6. Положення ТП і КО САЕ а), розподіл індукції зменшеного магнітного поля ТП на площині D б), $S_{\text{ном}} = 1260$ кВА

Дві КО САЕ розміщені зверху над ТП паралельно підлозі на відстані 0,85 м від неї та зменшують рівень вихідного МП до 1,2 мкТл (рис. 6б). Ефективність синтезованої САЕ $SF = 5,5$ одиниць.

Розглянутий варіант САЕ з двома КО не дозволяє зменшити рівень МП у житловому приміщенні до безпечного для населення рівня 0,5 мкТл [1,2] при номінальній потужності ТП 1260 кВА (рис. 6б).

Підвищення ефективності активного екранування МП для ТП 1260 кВА.

З допомогою методу синтезу САЕ (2-3) знайдено параметри чотирьох КО, що приведені у табл. 3.

Таблиця 3

Параметри компенсаційних обмоток САЕ для ТП 1260 кВА

№ КО	Ампер-витки	Координати КО
1	$IW1 = 104,7$ А	$x11 = x21 = -0,73$ м, $x31 = 0,7$ м, $x41 = 0$ м, $z1 = 2,33$ м, $y11 = y41 = -0,68$ м, $y21 = y31 = 2,7$ м, $h = 2$ м.
2	$IW2 = 19,1$ А	$x12 = x22 = 1,98$ м, $x32 = 0$ м, $x42 = 0,7$ м, $z2 = 2,33$ м, $y12 = y42 = 2,7$ м, $y22 = y32 = -0,68$ м, $h = 2$ м,
3	$IW3 = 19,1$ А	$x13 = x23 = 3,42$ м, $x33 = 5,4$ м, $x43 = 4,7$ м, $z3 = 2,33$ м, $y13 = y43 = 2,7$ м, $y23 = y33 = -0,68$ м, $h = 2$ м.
4	$IW4 = 104,7$ А	$x14 = x24 = 6,13$ м, $x34 = 4,7$ м, $x44 = 5,4$ м, $z4 = 2,33$ м, $y14 = y44 = -0,68$ м, $y24 = y34 = 2,7$ м, $h = 2$ м.

Як показують результати моделювання (рис. 7б), при використанні синтезованої САЕ рівень індукції МП зменшується до значення 0,4 мкТл, як на площині D , так і у всьому об'ємі зверху. При цьому синтезована САЕ має чотири КО САЕ, розміщені зверху над ТП паралельно стелі приміщення ТП на відстані 1,5 м від неї. Синтезована САЕ забезпечує ефективність екранування SF не менше 16 одиниць при енергоспоживанні не більше 0,5 кВт та площі компенсаційних обмоток не більше 20 м².

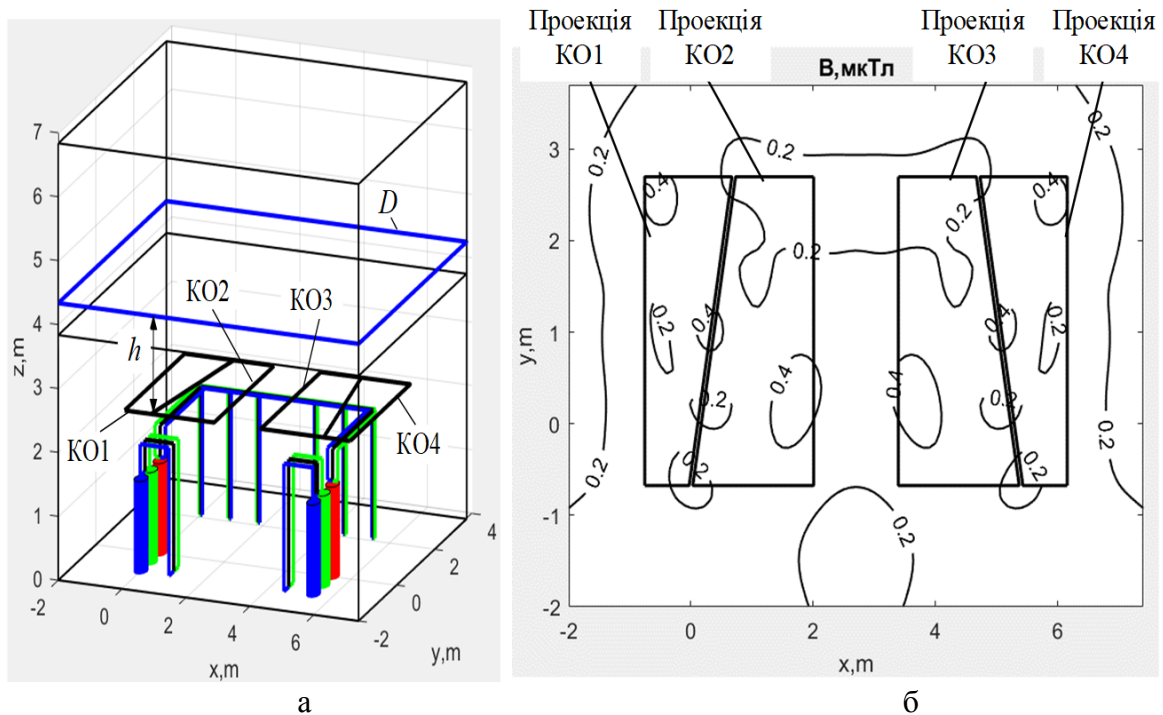


Рис. 7. Положення ТП і КО САЕ а) та розподіл індукції зменшеного магнітного поля ТП на площині D б), $S_{\text{ном}}=1260$ кВА

Реалізоване підвищення ефективності САЕ за рахунок використання чотирьох КО дозволяє зменшити рівень МП у житловому приміщенні до безпечного для населення рівня 0,5 мкТл [1,2] при номінальній потужності ТП 1260 кВА (рис. 7б).

Аналіз ефективності різних методів пасивного екранування. Ефективність методу пасивного екранування МП залежить від положення екрану, матеріалів що використовуються, а також розміру екрану. Для захисту від МП ТП використовують пасивні екрани виконанні з феромагнітних матеріалів або провідних матеріалів. Застосування методу пасивного екранування на діючих ТП показали наступну ефективність. Для ТП 10/0,4 кВА [5] при використанні пасивного екрану з металевих листів коефіцієнт екранування SF досягає 3,6 одиниць, а для листів із провідних матеріалів досягає 4,5 одиниць. Для ТП 20/0,4 кВА [6] при використанні пасивного екрану із провідних матеріалів SF складає 3,3 одиниць. Для ТП 110/35 кВА [7] ефективність екранування для листів із провідних матеріалів SF

досягає 5 одиниць. Таким чином ефективність екранування відомих методів пасивного екранування складає 3,3-5 одиниць.

Аналіз ефективності методів удосконалення конструкції ТП. Використання відомих методів удосконалення конструкцій ТП показали наступну ефективність SF : для ТП 20/0,4 кВ за рахунок зміни конфігурації трифазних струмопроводів коефіцієнт екранування SF досягає 2 одиниць [6]; для ТП 20/0,4 кВ за рахунок змішування фазних проводів низької напруги коефіцієнт екранування SF досягає 8 одиниць [8]; для ТП 20/0,4 кВ за рахунок зміни положення струмопроводів низької на високої напруги досягає 2 одиниць [9]; для ТП 11/0,4 кВ за рахунок зменшення міжфазної відстані та положення проводів фази і нульового проводу коефіцієнт екранування SF досягає 6 одиниць [10]; для ТП 11/0,4 кВ за рахунок зміни конфігурації трифазних струмопроводів коефіцієнт екранування SF досягає 1,3 одиниці [11]. Таким чином ефективність екранування відомих методів удосконалення конструкції ТП складає 1,3–8 одиниць.

Порівняння ефективності методів зменшення МП ТП та рекомендації з їх використання. На рис. 8 приведено графік залежності граничного коефіцієнта екранування SF_{lim} від номінальної потужності $S_{ном}$ трансформаторних підстанцій визначений по результатам експериментальних досліджень, проведеними автором у [3] $SF_{lim} = f(S_{ном})$, та максимальні значення коефіцієнтів екранування методів пасивного SF_{PEmax} , активного SF_{AEmax} екранування та удосконалення конструкції ТП SF_{YEmax} .

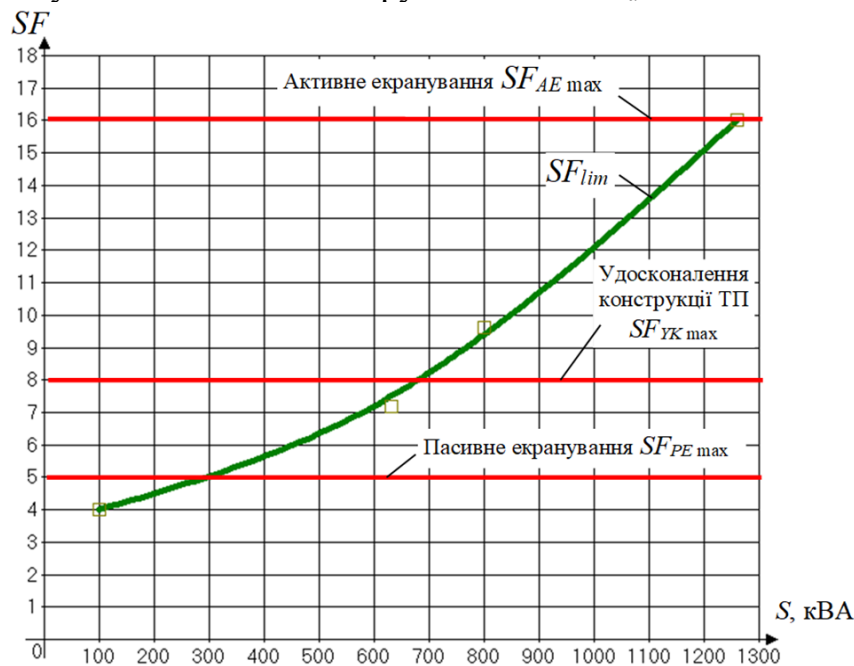


Рис. 8. Залежність граничного коефіцієнта екранування МП ТП SF_{lim} від номінальної потужності ТП $S_{ном}$ та максимальні значення коефіцієнтів екранування методів пасивного SF_{PEmax} , активного SF_{AEmax} екранування та удосконалення конструкції ТП SF_{YEmax}

Граничний коефіцієнт екранування SF_{lim} (рис. 8) визначає ефективність, що необхідна для зменшення МП ТП до безпечного для населення рівня у житлових приміщеннях.

У табл. 4 наведені узагальнені результати ефективності різних методів зменшення МП ТП.

Таблиця 4

Ефективність методів зменшення МП ТП та рекомендації по їх застосуванню

Методи зменшення МП ТП	SF	Рекомендації по застосуванню методів
Удосконалення конструкції ТП	1,3–8	Для ТП до 670 кВА
Пасивне екранування	3,3–5	Для ТП до 300 кВА
Активне екранування	5,5–16	Для ТП до 1260 кВА

Так зменшення МП ТП методами удосконаленням конструкції ТП має ефективність 1,3–8. Таким чином, застосування цих методів дозволяє зменшити МП до безпечного для населення рівня у ТП з потужністю до 670 кВА (рис. 8). Однак зміна конструкції діючих ТП технічно складно і має юридичні обмеження, а промисловий випуск ТП у спеціальному конструктивному виконанні вимагає значних інвестицій. Тому кращими для практичної реалізації є методи зовнішнього екранування МП ТП.

В даний час найбільш поширеним на практиці методом зовнішнього екранування є пасивне екранування приміщень ТП електромагнітними (магнітостатичними) екранами [5–7], При цьому ефективність методу пасивного екранування сягає 3,3–5 одиниць (табл. 4), що дозволяє зменшити рівень МП до безпечного для населення рівня для ТП потужністю до 300 кВА (рис. 8). Метод пасивного екранування є універсальним, однак на низькій частоті 50 Гц його реалізація з необхідною ефективністю вимагає залучення істотних коштів і відрізняється високою металоємністю і вартістю при незначній ефективності.

Тому найбільш перспективним методом зменшення МП ТП є активне екранування МП. Як доведено (табл. 4), його ефективність сягає 5,5-16 одиниць, що дозволяє зменшити рівень МП у житлових приміщеннях до безпечного для населення рівня з індукцією 0,5 мкТл для ТП з потужністю від 100 до 1260 кВА (рис. 8).

Висновки. Вперше обґрунтована можливість зменшення до санітарних норм індукції магнітного поля у житлових приміщеннях площею до 20 м², розташованих поблизу вбудованих трансформаторних підстанцій потужністю до 100 кВА за допомогою системи активного екранування з однією плоскою компенсаційною обмоткою, розміщеною біля стелі приміщення ТП, при енергоспоживанні САЕ не більше 0,05 кВт, площі компенсаційної обмотки не більше 7 м².

Вперше показана можливість зменшення до санітарних норм індукції магнітного поля у житлових приміщеннях площею до 50 м², розташованих

поблизу вбудованих трансформаторних підстанцій потужністю до 1260 кВА з допомогою системи активного екранування з чотирма плоскими компенсаційними обмотками, розміщеними у приміщенні ТП над її струмопроводами, при енергоспоживанні САЕ не більше 0,5 кВт, площі компенсаційних обмоток не більше 20 м².

Вперше доведено достатність використання методів пасивного екранування при потужності трансформаторних підстанцій до 300 кВА, методів удосконалення конструкції при потужності трансформаторних підстанцій до 670 кВА та розробленого методу активного екранування при потужності трансформаторних підстанцій до 1260 кВА, який є універсальним і дозволяє виконати зменшення магнітного поля без втручання в конструкцію трансформаторної підстанції.

Результати теоретичних досліджень методів екранування магнітного поля, виконаних на комп'ютерній моделі, експериментально обґрунтовані на повномасштабному лабораторному макеті трансформаторної підстанції із системою активного екранування.

Практичне використання розроблених систем активного екранування дозволить ефективно вирішити актуальну і соціально значиму для України проблему захисту здоров'я населення у житлових будинках з вбудованими трансформаторними підстанціями від негативної дії магнітного поля промислової частоти.

Список використаної літератури:

1. Сердюк А. М., Думанський В. Ю., Біткін С. В., Дідик Н. В., Думанський Ю. Д., та ін. Гігієнічне обґрунтування вимог до розміщення та експлуатації кабельних ліній електропередачі та їх обладнання в умовах сучасної міської забудови. Гігієна населених місць: Зб. Наук. Пр. 2015. № 66. С. 20–29.
2. Правила улаштування електроустановок. Видання офіційне. Міненергосувгілля України. Видавництво «Форт». Харків. 2017. 760 с.
3. 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. P. 60–66.
4. Rozov V. Yu., Kundius K. D., Pelevin D. Ye. Active shielding of external magnetic field of built-in transformer substations. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2020. no. 3. P. 24–30.
5. Grbić 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. vol. 1. P. 752–756.
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. P. 832–836.
7. Grbić 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*. 2016. P. 1–8.
8. 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. P. 1332.
9. Geri A., Veca G. M. Power-frequency magnetic field calculation around an indoor transformer substation. *WIT transactions on modelling and simulation*. 2005. vol. 39. 10 p. <https://doi.org/10.2495/BE050641>.
10. 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. P. 769–775.
11. 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. P. 1711–1718.
12. Canova A., Giaccone L. Real-time optimization of active loops for the magnetic field minimization. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*. 2018. vol. 56. P. 97–106.

13. 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. P. 1055–1061.
14. 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. P. 337–344.
15. 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. P. 1–4.
16. 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*. 2003. vol. 1. P. 197–202.
17. Garzia F., Geri A. Reduction of magnetic pollution in urban areas by an active field cancellation. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*. 2004. p. 72.
18. Розов В. Ю. Внешние магнитные поля силового электрооборудования и методы их уменьшения. Препринт. НАН Украины. Ин-т электродинамики. Киев. 1995. № 772. 42 с.

References:

1. Serdiuk A. M., Dumanskiy V. Yu., Bitkin S. V., Didyk N. V., Dumanskiy Yu. D, et. al. Hygienical ground of requirements to placing and exploitation of cable busses of electricity transmission and their equipment in the conditions of modern municipal building [Hihiiienichne obgruntuvannia vymoh do rozmishchennia ta ekspluatatsii kabelnykh liniy elektroperedachi ta yikh obladnannia v umovakh suchasnoi miskoi zabudovy], *Hihiiena naselenykh mist: Zbr. Nauk. Pr.*, 2015. no. 66, pp. 20–29.
2. Electrical installation regulations [Pravila ulashtuvannya electroustanovok], Fort Publ. Kharkiv, 2017, 760 p.
3. 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.
4. Rozov V. Yu., Kundius K. D., Pelevin D. Ye. Active shielding of external magnetic field of built-in transformer substations. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2020. no. 3. pp. 24–30.
5. Grbić 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. vol. 1. pp. 752–756.
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.
7. Grbić 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*. 2016. P. 1–8.
8. 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. pp. 1332.
9. Geri A., Veca G. M. Power-frequency magnetic field calculation around an indoor transformer substation. *WIT transactions on modelling and simulation*. 2005. vol. 39. 10 p. <https://doi.org/10.2495/BE050641>.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. 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*. 2003. vol. 1. pp. 197–202.
17. Garzia F., Geri A. Reduction of magnetic pollution in urban areas by an active field cancellation. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*. 2004. p. 72.
18. Rozo, V. Yu. External magnetic fields of power electrical equipment and methods for reducing them. Preprint. [Vneshnie magnitnie polya silovogo elektrooborudovaniya i metodi ikh umensheniya Preprint], NAS of Ukraine The Institute of Electrodynamics Publ., Kyiv, 1995. no. 772, 42 p.

Стаття надійшла до редакції 21.09.2022 р.