



ВОЛОШКО

Олександр Валерійович — кандидат технічних наук, науковий співробітник відділу проблем управління магнітним полем Державної установи «Інститут технічних проблем магнетизму НАН України»
ORCID: 0000-0002-0965-1171

СИНТЕЗ СИСТЕМ АКТИВНОГО ЕКРАНУВАННЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ

За матеріалами наукового повідомлення на засіданні Президії НАН України
29 березня 2017 року

Розроблено новий метод синтезу систем активного екранування техногенного магнітного поля повітряних ліній електропередачі всередині заданої області простору за допомогою керованих джерел магнітного поля. Синтез зводиться до розв'язання задачі багатокритеріального нелінійного програмування з обмеженнями, в якій обчислення цільових функцій і обмежень виконуються на основі розв'язання рівнянь Максвелла в квазістационарному наближенні. Завдання вирішується методом стохастичної мультиагентної оптимізації мультироєм частинок. Проведено експериментальну верифікацію методу синтезу замкнених систем активного екранування магнітного поля на розробленому макеті трифазної повітряної лінії електропередачі. Експериментально підтверджено можливість зменшення магнітної індукції до нормативного рівня для житлових приміщень.

Ключові слова: повітряні лінії електропередачі, магнітне поле промислової частоти, система активного екранування, багатокритеріальний синтез, стохастична мультиагентна оптимізація, експериментальні дослідження.

Вступ

Високовольтні лінії електропередачі (ЛЕП) є одним з найнебезпечніших для людей джерел електромагнітного поля, оскільки створюють у навколишньому просторі інтенсивне магнітне поле промислової частоти [1, 2], що охоплює великі населені території. Експертами Всесвітньої організації охорони здоров'я було виявлено канцерогенні властивості магнітного поля ЛЕП у разі його слабкої, але довготривалої дії на людей [3, 4]. Тому впродовж останніх 15 років у всьому світі санітарні норми щодо гранично допустимого рівня індукції магнітного поля 50–60 Гц стають дедалі жорсткішими, інтенсивно проводяться дослідження з розроблення методів нормалізації магнітного поля [5–13].

В Україні більш жорсткі санітарні норми з індукції магнітного поля 50 Гц (0,5 мкТл для населення) уже також починають вводити в нормативні документи [14], однак на практиці ці норми поки що не реалізовані [1, 2], що створює загрозу для здоров'я сотень тисяч людей, які проживають поблизу ЛЕП. Ця ситуація потребує термінового вжиття заходів щодо зниження до безпечного рівня магнітного поля високовольтних ЛЕП, розташованих у межах міст України.

Методи нормалізації магнітного поля

Серед відомих методів нормалізації магнітного поля діючих ЛЕП [1–3] найефективнішим є їх реконструкція, тобто переміщення ЛЕП на безпечну відстань від житлових будинків, або заміна повітряної ЛЕП на підземну кабельну лінію. Однак останній спосіб реконструкції пов'язаний зі значними матеріальними витратами. Тому доцільним є більш дешевий метод активного екранування магнітного поля [11, 15].

Сутність методу активного екранування полягає у формуванні такої просторово-часової структури компенсуючого магнітного поля, суперпозиція якого з магнітним полем ЛЕП у зоні захисту мінімізується до рівня санітарних норм. Цей метод реалізується за допомогою системи активного екранування, схему якої наведено на рис. 1.

Система активного екранування (САЕ) складається з компенсаційних обмоток, системи управління і датчика магнітного поля. Вона автоматично формує компенсуюче магнітне поле у функції сигналу зворотного зв'язку з датчика магнітного поля, встановленого в зоні захисту. Основною характеристикою системи екранування є ефективність екранування, що визначає, у скільки разів значення екранованого магнітного поля менше, ніж вихідного [11].

Технологію активного екранування магнітного поля діючих ЛЕП уже понад 10 років використовує більшість розвинених країн світу, наприклад США та Ізраїль [5–7, 11]. На жаль, в Україні як самої такої технології, так і науко-

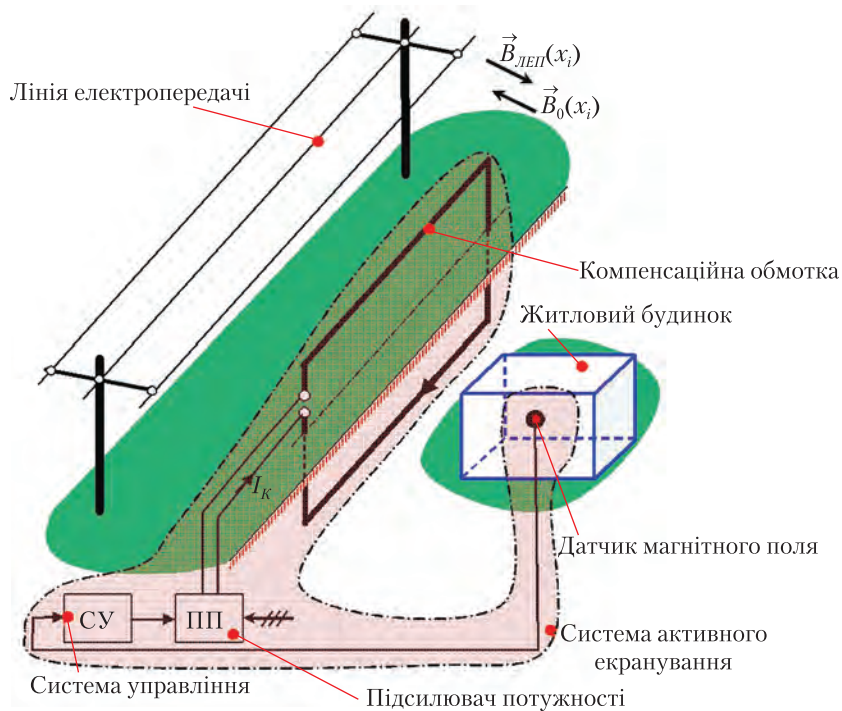


Рис. 1. Схема системи активного екранування магнітного поля

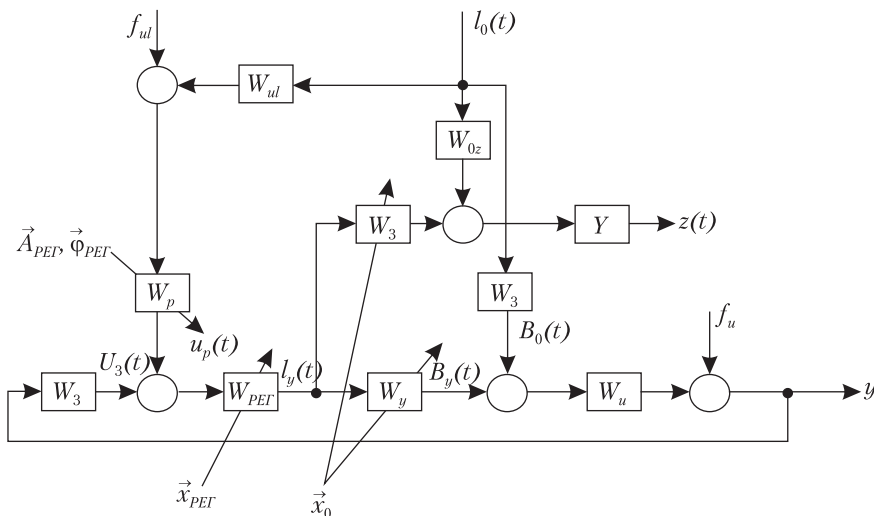


Рис. 2. Алгоритмічна схема системи активного екранування

вих основ її створення немає, і це не дозволяє відносно недорогими засобами здійснювати захист здоров'я населення від техногенного магнітного поля ЛЕП.

Отже, метою нашої роботи є розроблення методу синтезу ефективних систем активного екранування магнітного поля ліній електропередачі.

Синтез систем активного екранування

Вихідними параметрами синтезу є параметри ЛЕП (робочі струми, геометрія і кількість проводів, розташування ЛЕП відносно зони захисту), а також розміри зони захисту і нормативне значення індукції магнітного поля, яке має бути досягнуто в результаті екранування.

У процесі синтезу необхідно визначити параметри компенсаційних обмоток (їх кількість, конфігурацію, просторове розташування, схему підключення), струми компенсаційних обмоток, результуюче значення індукції магнітного поля множини точок зони захисту, а також алгоритм роботи системи управління.

Введемо вектор параметрів оптимізації X , компонентами якого є вектор координат просторового положення та геометричних розмірів компенсаційних обмоток X_y і вектор параметрів регуляторів X_p , так що $X = \{X_y^T, X_p^T\}^T$.

Тоді при заданому векторі струмів ЛЕП $I_0(t)$ визначимо [14, 16] діюче значення індукції магнітного поля $B(X, P_n)$ в точках P_n , яке необхідно екранувати до нормативного рівня.

Синтез системи активного екранування зведено до розв'язання задачі багатокритеріальної оптимізації векторного критерію

$$B(X) = [B(X, P_1), B(X, P_2), \dots, B(X, P_N)]^T, \quad (1)$$

компонентами якого $B(X, P_n)$ є діючі значення модуля вектора індукції в N точках P_n зони захисту. Ці компоненти $B(X, P_n)$ векторного критерію є нелінійними функціями вектора шуканих параметрів X [16, 17].

Метод розв'язання задачі багатокритеріальної оптимізації. Задача знаходження локального мінімуму (1) в одній точці P_i розглянутого простору, як правило, є багатоекстремальною і містить локальні мінімуми та максимуми, тому для її розв'язання доцільно використовувати алгоритми стохастичної мультиагентної оптимізації [18, 19]. Розглянемо алгоритм знаходження множини парето-оптимальних рішень багатокритеріальних задач нелінійного програмування на основі стохастичної мультиагентної оптимізації. На сьогодні розроблено велику кількість алгоритмів оптимізації роєм частинок – PSO-алгоритмів на основі ідеї колективного інтелекту роя частинок, такі як

gbest PSO та lbest PSO алгоритми [20]. Застосування стохастичних мультиагентних методів оптимізації для розв'язання багатокритеріальних задач становить на сьогодні певні труднощі, однак цей напрям продовжує інтенсивно розвиватися [18, 20]. Для розв'язання вихідної багатокритеріальної задачі нелінійного програмування (1) з обмеженнями побудуємо алгоритм стохастичної мультиагентної оптимізації на основі безлічі роїв частинок, кількість яких дорівнює кількості компонент векторного критерію оптимізації. У стандартному алгоритмі оптимізації роєм частинок зміна швидкостей частинок здійснюється за лінійними законами [18]. Для підвищення швидкості знаходження глобального оптимуму використовують нелінійний алгоритм стохастичної мультиагентної оптимізації [20].

За допомогою окремих j -х роїв вирішуються завдання оптимізації скалярних критеріїв $B(X, P_j)$, які є компонентами векторного критерію оптимізації (1). Для знаходження глобального розв'язку вихідної багатокритеріальної задачі (1) у ході пошуків оптимальних рішень локальних критеріїв окремі рої обмінюються інформацією між собою. При цьому для обчислення швидкості руху частинок одного роя використовується інформація про глобальний оптимум, отриманий частинками іншого роя, що дозволяє виділити всі потенційні парето-оптимальні розв'язки [18]. З цієї метою на кожному кроці t руху i -ї частинки j -го роя використовуються функції бінарних переваг локальних рішень, отриманих усіма роями. Рішення $X_j^*(t)$, отримане у процесі оптимізації цільової функції $B(X(t), P_j)$ за допомогою j -го роя, є кращим відносно рішення $X_k^*(t)$, отриманого в ході оптимізації цільової функції $B(X(t), P_k)$ за допомогою k -го роя, тобто

$$X_j^*(t) \succ X_k^*(t),$$

якщо виконується умова

$$\max_{i=1,m} B(P_i, X_j^*(t)) < \max_{i=1,m} B(P_i, X_k^*(t)). \quad (2)$$

При цьому як глобальне оптимальне рішення $X_k^*(t)$ k -го роя використовується глобальне рішення $X_j^*(t)$, отримане j -м роєм, яке є на-

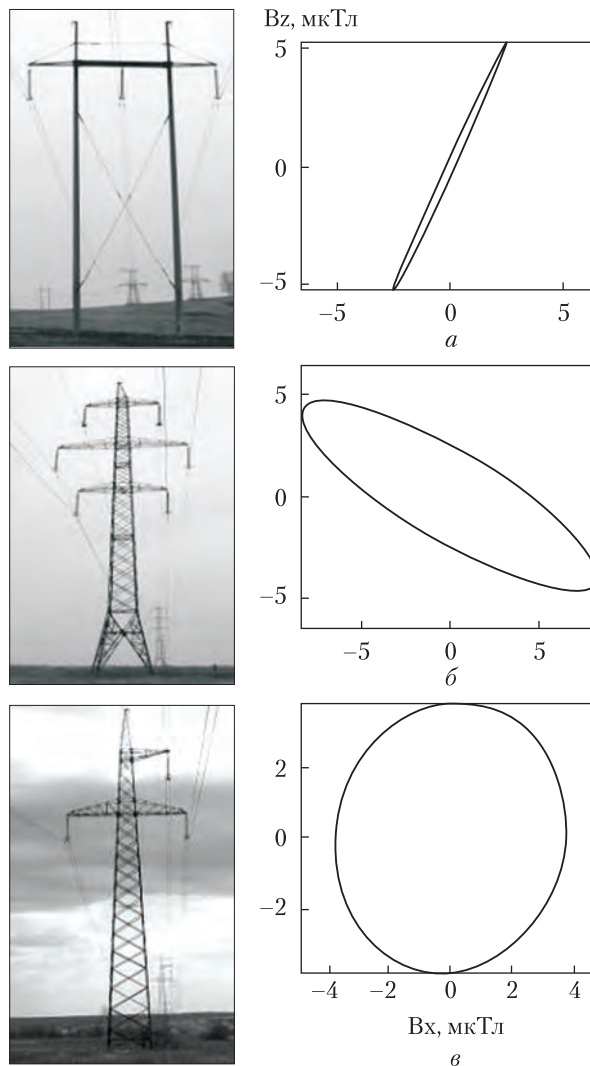


Рис. 3. Типи високовольтних ЛЕП, поширені в Україні: a – горизонтальний підвіс провідів; $б$ – вертикальний підвіс провідів; $в$ – підвіс провідів типу «трикутник» та відповідні годографи вектора магнітного поля

багато кращим відносно глобального рішення $X_k^*(t)$ k -го роя на підставі співвідношення переваги (2).

Фактично в такому підході реалізується основна ідея методу послідовного звуження області компромісів – з вихідної множини можливих рішень на підставі інформації про відносну важливість локальних рішень послідовно видаляються всі парето-оптимальні рішення, які не можуть бути обрані згідно з наявною інфор-

Компенсаційні обмотки САЕ

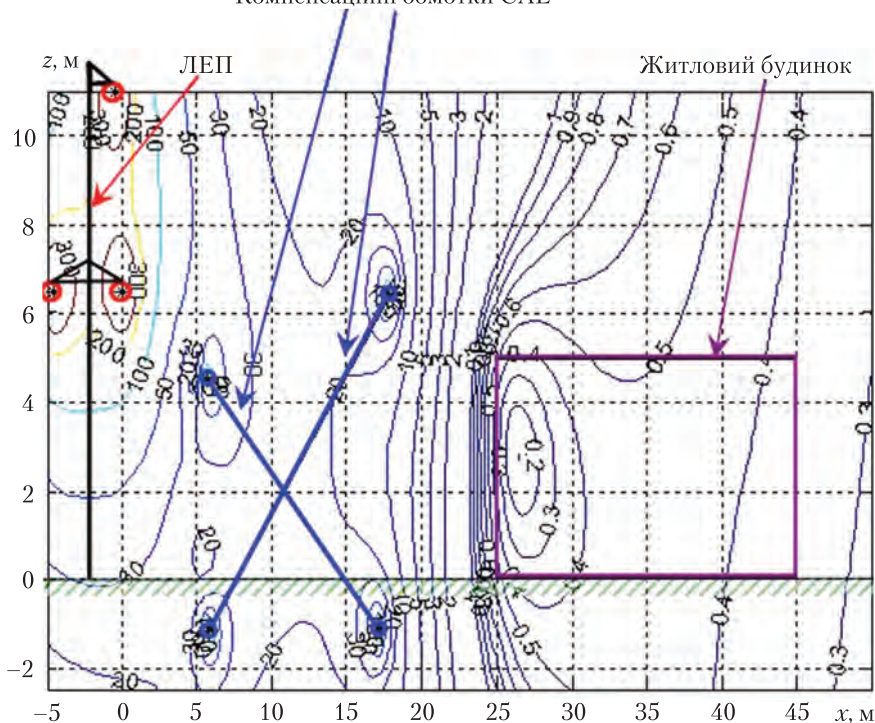


Рис. 4. Розподіл індукції магнітного поля (мкТл) при використанні синтезованої системи активного екранування

мацією про співвідношення переваг. Видалення здійснюється доти, доки не буде отримано глобально оптимальне рішення. У результаті застосування такого підходу на кожному кроці звуження не буде видалено жодного потенційно оптимального рішення [18].

Отже, запропоновано схему системи активного екранування, яка показана на рис 2. Тут введені матричні передавальні функції W_0 формування індукції вихідного магнітного поля $B_0(t)$, породжуваного струмами ЛЕП $I_0(t)$ в точках розташування магнітометрів, і матричні передавальні функції W_{0z} формування індукції вихідного магнітного поля $B_{0z}(t)$, породжуваного цими самими струмами ЛЕП $I_0(t)$ в L точках P розглянутого простору, матричні передавальні функції W_y формування індукції компенсуючого магнітного поля $B_y(t)$, породжуваного струмами $I_y(t)$ обмоток магнітних виконавчих органів у точках розташування магнітометрів, і матричні переда-

вальні функції W_{yz} формування індукції компенсуючого магнітного поля $B_{yz}(t)$, породжуваного цими самими струмами $I_y(t)$ обмоток магнітних виконавчих органів у L точках P розглянутого простору. Зауважимо, що елементи цих матричних передавальних функцій є коефіцієнтами, розрахованими за законом Біо—Савара [16].

Матричні передавальні функції W_p та W_z регуляторів формування керуючих сигналів $\bar{u}_p(t)$ та $\bar{u}_z(t)$ обмотками магнітних виконавчих органів відповідно в розімкненому і замкненому контурі регулювання. При цьому елементи матричних передавальних функцій регуляторів замкнених контурів регулювання W_z описують ПІД-регулятори, а елементи матричних передавальних функцій регуляторів розімкнених контурів регулювання W_p описують фазообертачі у вигляді ланок чистого запізнювання із заданою фазою запізнювання ϕ і коефіцієнтом підсилення. Матрична пере-

давальна функція W_{pez} описує динаміку підсилювачів потужності з внутрішніми регуляторами струмів в обмотках магнітних виконавчих органів. Матричні передавальні функції W_u і W_{ul} описують динаміку магнітометрів вимірювання індукції магнітного поля в місцях установки магнітометрів усередині розглянутого простору і поблизу ЛЕП, необхідних для реалізації контурів управління за замкненим і розімкненим принципами управління. f_u та f_{ul} — перешкоди вимірювання індукції магнітного поля за допомогою магнітометрів, встановлених відповідно всередині розглянутого простору і поблизу ЛЕП [9].

Реалізація цієї схеми дозволяє синтезувати САЕ з необхідною ефективністю, ґрунтуючись на даних про конструкцію і технічні параметри ЛЕП, а також на координатах зони простору, що захищається.

Аналіз особливостей просторово-часового розподілу магнітного поля від ЛЕП різного конструктивного виконання

Складність синтезу САЕ значною мірою визначається особливостями просторово-часової структури магнітного поля, створюваного різними типами ЛЕП. В Україні найбільш поширені три типи високовольтних ЛЕП (рис. 3).

Розглянемо структуру магнітного поля цих ЛЕП. Так, у ЛЕП (рис. 3а) з опорою типу ЛБ 330-3 [14] проводи розташовані в горизонтальній площині. Годограф вектора її магнітного поля є фактично прямою лінією, що свідчить про відсутність обертання магнітного поля такої ЛЕП і можливість його екранування мінімальною кількістю компенсаційних обмоток.

Двоколова ЛЕП з опорами типу У 330-2 типу «бочка» (рис. 3б) та одноколова ЛЕП з опорою У 330-1Т типу «трикутник» (рис. 3в) створюють еліпсоподібне поляризоване магнітне поле, що обертається і характеризується відповідними годографами у вигляді еліпсів. Активне екранування такого магнітного поля становить найбільші труднощі.

Результат синтезу системи активного екранування

Розглянемо результат синтезу САЕ для найскладнішого випадку — для екранування магнітного поля реальної однокової ЛЕП, яка створює обертове магнітне поле з повною поляризацією (рис. 3в) за її номінальної напруги 110 кВ та номінального струму 1000 А.

Така ЛЕП без екранування створює в житловому будинку (рис. 4) магнітне поле з індукцією 2,1 мкТл, що в понад 4 рази перевищує нормативний рівень 0,5 мкТл.

Синтезована САЕ для цієї ЛЕП має дві компенсаційні обмотки, розміщені між ЛЕП і житловим будинком. При використанні САЕ індукція магнітного поля в житловому будинку, розрахунковий розподіл якої наведено на рис. 4, зменшується до безпечного рівня 0,5 мкТл. Як впливає з рис. 5, синтезована САЕ забезпечує екранування магнітного поля від ЛЕП з ефективністю понад 4 одиниці і дозволяє нормалізувати рівень індукції магнітного поля всередині будинку до безпечного рівня.

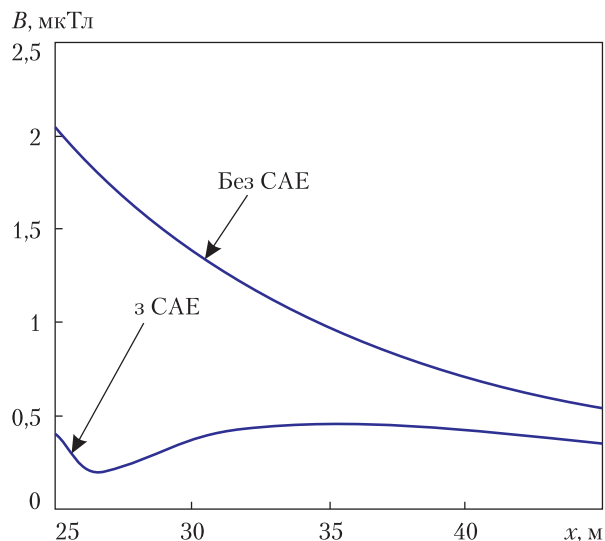


Рис. 5. Результати розрахунку розподілу індукції магнітного поля всередині житлового будинку при використанні синтезованої системи активного екранування

Експериментальні дослідження

Експериментальну перевірку ефективності розроблених САЕ здійснено на масштабному лабораторному макеті, що включає макети ЛЕП, компенсаційних обмоток і власне системи управління САЕ. Лабораторний макет (рис. 6) виконано так, щоб розподіл індукції магнітного поля в зоні захисту макету відповідав реальному розподілу магнітного поля ЛЕП (110 кВ, 1000 А) (рис. 3в). Для цього вибрано лінійний масштаб макету 1:11 при струмі макету ЛЕП 91 А.

На рис. 7 наведено результати експериментальних досліджень розподілу індукції магнітного поля в середньому перерізі зони захисту з синтезованою САЕ. Результати експерименту підтверджують спроможність синтезованої САЕ нормалізувати індукцію

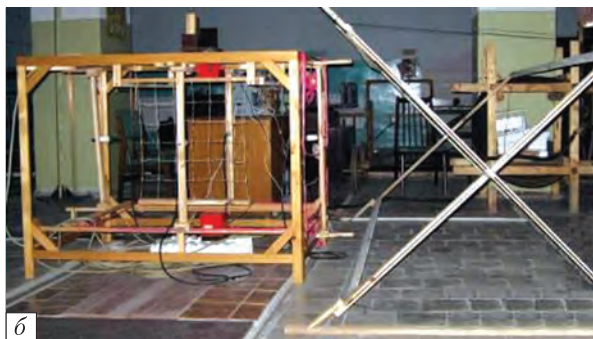


Рис. 6. Зовнішній вигляд масштабного макету ЛЕП (а) і компенсаційних обмоток та зони захисту (б)

магнітного поля в зоні захисту до безпечного рівня 0,5 мкТл [14].

Крім того, результати експерименту добре збігаються з результатами теоретичних досліджень, про що свідчать побудовані на основі розрахунку та експерименту криві, наведені на рис. 8. При цьому похибка моделювання не перевищує 10%.

Отже, виконані експериментальні дослідження підтверджують правильність теоретичних положень, можливість реалізації і високу ефективність екранування магнітного поля ЛЕП за допомогою синтезованих систем активного екранування.

Достовірність отриманих результатів підтверджується також їх збігом з результатами незалежних експериментальних досліджень, виконаних у США та Ізраїлі [5, 11].

Аналіз економічної доцільності впровадження систем активного екранування

Тепер розглянемо економічну доцільність впровадження в Україні синтезованих систем активного екранування, порівнявши їх з іншими доступними методами нормалізації магнітного поля діючих ЛЕП – реконструкцією ЛЕП або використанням закордонних технологій – на прикладі екранування магнітного поля для будинку розмірами 60×20×18 м, розташованого поблизу ЛЕП 110 кВ.

Реконструкція ЛЕП – встановлення кабельної вставки 250 м між сусідніми опорами ЛЕП:

вартість 1 м кабелю 110 кВ – 100\$;

вартість кабелю трифазної кабельної лінії довжиною 250 м – 75 тис. \$;

вартість проектно-монтажних робіт – 75 тис. \$;

загальна вартість реалізації методу – **150 тис. \$ (4 млн грн).**

Використання САЕ фірми EMF Services (США):

вартість виготовлення САЕ – 10 тис. \$;

вартість проектно-монтажних та налагоджувальних робіт – від 90 тис. \$;

загальна вартість реалізації технології – від **100 тис. \$ (2,7 млн грн)**.

Використання синтезованої САЕ:

вартість виготовлення експериментального зразка САЕ – 8 тис. \$;

вартість розробки та проектно-монтажних робіт – 12 тис. \$;

загальна вартість реалізації методу – **20 тис. \$ (540 тис. грн)**.

У підсумку реконструкція ЛЕП 110 кВ обійдеться в 4 млн грн, використання американської технології екранування – не менш як 2,7 млн грн, а застосування технології захисту на основі синтезованої системи активного екранування коштуватиме близько 500 тис. грн. При цьому очікувана економічна ефективність від впровадження синтезованої системи становитиме від 2,0 до 3,5 млн грн.

Отже, використання синтезованої системи активного екранування порівняно з іншими відомими методами потребує у 5–7 разів менших матеріальних затрат.

Висновки

Уперше в Україні запропоновано метод синтезу ефективної системи активного екранування (САЕ) техногенного магнітного поля промислової частоти, яке створюється високовольтними лініями електропередачі (ЛЕП), розташованими поблизу житлових будинків.

На основі запропонованого методу синтезу створено лабораторний макет САЕ, експериментальні дослідження якого підтвердили правильність теоретичних положень та можливість реалізації необхідної ефективності екранування (5 одиниць) для найскладнішого випадку обертання магнітного поля ЛЕП, а також відповідність розробки найкращим світовим зразкам.

Розроблений метод синтезу САЕ становить основу для створення наукових засад вітчизняної технології екранування магнітного поля високовольтних повітряних ЛЕП до безпечно-го для людей рівня за мінімальних матеріальних витрат.

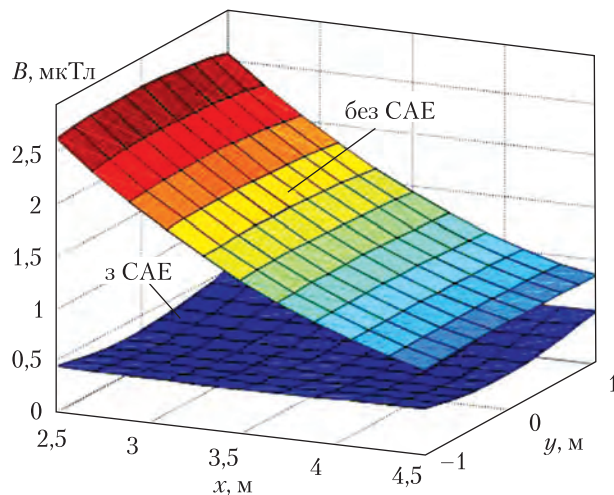


Рис. 7. Результати експериментальних досліджень розподілу індукції магнітного поля всередині зони захисту при використанні синтезованої системи активного екранування

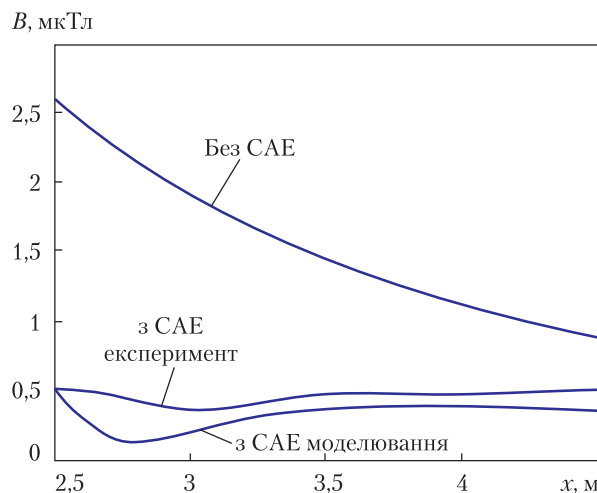


Рис. 8. Розрахунковий та експериментальний розподіл індукції магнітного поля в зоні захисту при використанні синтезованої системи активного екранування

Подальші дослідження планується спрямувати на розроблення методів підвищення ефективності екранування САЕ, а також на створення спільно з підприємствами енергетичного комплексу України експериментального зразка САЕ та його випробування на діючих високовольтних повітряних ЛЕП.

Доповідач висловлює глибоку подяку за допомогу в роботі й аналіз отриманих результатів директору Інституту технічних проблем магнетизму НАН України члену-кореспонденту НАН України В.Ю. Розову,

а також співробітникам відділу проблем управління магнітним полем Інституту технічних проблем магнетизму НАН України та особисто його керівнику доктору технічних наук Б.І. Кузнецову.

REFERENCES

1. Pelevin D.Ye. The methods of reducing of the magnetic fields of overhead power lines outside the security zones. *Technical Electrodynamics*. 2014. (5): 14.
[Пелевин Д.Е. Методы снижения магнитного поля воздушных линий электропередачи за пределами охранных зон. *Технічна електродинаміка*. 2014. № 5. С. 14–16.]
2. Rozov V.Yu., Reutskyi S.Yu., Pelevin D.Ye., Yakovenko V.N. The study of magnetic fields of high voltage AC power lines. *Technical Electrodynamics*. 2012. (1): 3.
[Розов В.Ю., Реуцкий С.Ю., Пелевин Д.Е., Яковенко В.Н. Исследование магнитного поля высоковольтных линий электропередачи переменного тока. *Технічна електродинаміка*. 2012. № 1. С. 3–9.]
3. 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. (3): 6.
[Розов В.Ю., Гринченко В.С., Пелевин Д.Е., Чунихин К.В. Моделирование электромагнитного поля в помещениях жилых домов, расположенных вблизи линий электропередачи. *Технічна електродинаміка*. 2016. № 3. С. 6–9.]
4. World Health Organization. Electromagnetic fields (EMF). <http://www.who.int/peh-emf/project/en/>
5. Active Magnetic Shielding (Field Cancellation). <http://www.emfservices.com/afcs.html>
6. Beltran H., Fuster V., García M. Magnetic field reduction screening system for a magnetic field source used in industrial applications. IX Congreso Hispano Luso de Ingeniería Eléctrica (9CHLIE). Marbella (Málaga), 2005. P. 84–99.
7. Celozzi S., Garzia F. Active shielding for power-frequency magnetic field reduction using genetic algorithms optimization. *IEE Proc. Sci. Meas. Technol.* 2004. **151**(1): 2.
8. Brake H.J.M., Wieringa H.J., Rogalla H. Improvement of the performance of a mu-metal magnetically shielded room by means of active compensation (biomagnetic applications). *Meas. Sci. Technol.* 1991. **2**(7): 596.
9. Yamazaki K., Kato K., Kobayashi K., Igarashi A., Sato T., Haga A., Kasai N. MCG Measurement in the environment of active magnetic shield. *Neurol. Clin. Neurophysiol.* 2004. **40**: 1.
10. Schnabel A., Voigt J., Burghoff M., Knappe-Gruneberg S. Magnetic Shielding State of art, new magnetic shielding and active magnetic shielding for low noise applications. (Rome, Italy, 2003). **51**(5): 137.
11. Shenkman A., Sonkin N., Kamensky V. Active protection from electromagnetic field hazards of a high voltage power line. *HAIT Journal of Science and Engineering B*. 2005. **2**(2): 254.
12. Brake H.J.M., Huonker R., Rogalla H. New results in active noise compensation for magnetically shielded rooms. *Meas. Sci. Technol.* 1993. **4**: 1370.
13. Kato K., Yamazaki K., Sato T., Haga A., Okitsu T., Muramatsu K., Ueda T., Yoshizawa M. Shielding Effect of Panel Type Active Magnetic Compensation. *IEEE Transactions on Fundamentals and Materials*. 2005. **125**(2): 99.
14. Electrical Installation Regulations. 3rd edition, revised and enlarged. (Kyiv: Minpalyvenergo, 2010).
[Правила улаштування електроустановок (ПУЕ). К.: Мінпаливенерго України, 2010.]
15. Rozov V.Yu., Reutskyi S.Yu., Pelevin D.Ye., Pyliugina O.Yu. The magnetic field of transmission lines and the methods of its mitigation to a safe level. *Technical Electrodynamics*. 2013. (2): 3.
[Розов В.Ю., Реуцкий С.Ю., Пелевин Д.Е., Пилигина О.Ю. Магнитное поле линий электропередачи и методы его снижения до безопасного уровня. *Технічна електродинаміка*. 2013. № 2. С. 3–9.]
16. Rozov V.Yu., Reutskyi S.Yu., Pyliugina O.Yu. The method of calculation of the magnetic field of three-phase power lines. *Technical Electrodynamics*. 2014. (5): 11.
[Розов В.Ю., Реуцкий С.Ю., Пилигина О.Ю. Метод расчета магнитного поля трехфазных линий электропередачи. *Технічна електродинаміка*. 2014. № 5. С. 11–13.]
17. Nikolova N.K., Bakr M.H. *Electromagnetics I. Matlab Experiments Manual for EE2FH3*. (Department of Electrical and Computer Engineering McMaster University, 2012).

18. Kuznetsov B.I., Nikitina T.B., Voloshko A.V., Bovdyj I.V., Vinichenko E.V., Kobilyanskiy B.B. Synthesis of an active shielding system of the magnetic field of power lines based on multiobjective optimization. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2016. (6): 26.
[Кузнецов Б.И., Никитина Т.Б., Бовдуй И.В., Волошко А.В., Виниченко Е.В., Кобылянский Б.Б. Синтез систем активного экранирования магнитного поля воздушных линий электропередачи на основе многокритериальной оптимизации. *Електротехніка і електромеханіка*. 2016. № 6. С. 26–30.]
19. Clerc M. *Particle Swarm Optimization*. (London, ISTE Ltd, 2006).
20. Gazi V., Passino K.M. *Swarm Stability and Optimization*. (Springer, 2011).
21. Kuznetsov B.I., Nikitina T.B., Voloshko A.V., Bovdyj I.V., Vinichenko E.V., Kobilyanskiy B.B. Experimental research of magnetic field sensors spatial arrangement influence on efficiency of closed loop of active screening system of magnetic field of power line. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2017. (1): 16.
[Кузнецов Б.И., Никитина Т.Б., Бовдуй И.В., Волошко А.В., Виниченко Е.В., Кобылянский Б.Б. Экспериментальное исследование влияния пространственного расположения датчиков магнитного поля на эффективность замкнутой системы активного экранирования магнитного поля линий электропередачи. *Електротехніка і електромеханіка*. 2017. № 1. С. 16–20.]

A.V. Voloshko

Institute of Technical Problems of Magnetism,
National Academy of Sciences of Ukraine (Kharkiv)

SYNTHESIS OF ACTIVE SHIELDING SYSTEMS OF POWER TRANSMISSION LINES MAGNETIC FIELD

According to the materials of scientific report at the meeting
of the Presidium of the NAS of Ukraine, March 29, 2017

Developed new method of synthesis of active shielding systems of technogenic magnetic fields of the high voltage power lines within a given region of space using controlled magnetic fields. The synthesis is reduced to the solution of the problem of nonlinear multiobjective programming with constraints, in which computing the objective functions and constraints is based on Maxwell's equations solutions. The problem is solved by a stochastic multi-agent optimization multiswarm particles. Experimentally verified the synthesis method of active shielding close-loop systems of the magnetic field on the developed layout of three-phase high voltage power lines. Experimentally confirmed the possibility of reducing the magnetic induction to the standard level for residential premises.

Keywords: power transmission line, power frequency magnetic field, active shielding system, multi-objective synthesis, stochastic multi-agent optimization, experimental researches.