

УДК 621.3.013; 621.315.2 **Володимир Грінченко**^{1*}, к.т.н., с.д., <https://orcid.org/0000-0002-6195-3011>

Олександр Ткаченко¹, к.т.н., <https://orcid.org/0000-0001-7307-7293>

Тетяна Білан², к.т.н., с.д., <https://orcid.org/0000-0002-0280-6716>

¹Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України, вул. Пожарського, 2/10, м. Харків, 61046, Україна;

e-mail: ipmach@ipmach.kharkov.ua

²Інститут загальної енергетики НАН України, вул. Антоновича, 172, м. Київ, 03150, Україна;

e-mail: info@ienenergy.kiev.ua

*Автор-кореспондент: vsgrinchenko@gmail.com

ОГЛЯД СИСТЕМ КОНТУРНОГО ЕКРАНУВАННЯ ДЛЯ НОРМАЛІЗАЦІЇ МАГНІТНОГО ПОЛЯ КАБЕЛЬНИХ ЛІНІЙ ВИСОКОЇ НАПРУГИ

Анотація. Роботу присвячено огляду відомих систем контурного екранування, що можуть бути використані для нормалізації магнітного поля кабельних ліній високої напруги. Метою роботи є визначення найбільш перспективних систем. У результаті проведеного огляду наукових публікацій та патентів, присвячених методам та засобам зменшення магнітного поля ліній електропередавання, визначено основні дослідницькі колективи, які займаються розробками систем контурного екранування для нормалізації магнітного поля кабельних ліній: два колективи – в Італії, по одному – в Іспанії та Україні. Системи контурного екранування, розроблені кожним із колективів, мають свої особливості, проте можуть бути класифіковані за такими ознаками: кількість контурних екранів у системі екранування; форма контурних екранів, що використовуються в системі екранування; спосіб підвищення ефективності екранування магнітного поля кабельних ліній. За кількістю контурних екранів системи можна поділити на три групи: одноелементні, двоелементні та багатоелементні. За формою контурних екранів можна виділити дві групи систем екранування – що складаються з прямокутних контурних екранів або контурних екранів з трьох кабелів, з'єднаних паралельно. За способом підвищення ефективності екранування системи можна поділити на чотири групи: перші використовують феромагнітні осердя, що охоплюють силові та екранні кабелі; другі – допоміжні конденсатори, під'єднані до екранних кабелів; треті – спеціальне розташування контурів між кабельною лінією та областю екранування; четверті – збільшення перерізу екранних кабелів. За результатами проведеного огляду, найбільш перспективними системами контурного екранування для нормалізації магнітного поля кабельних ліній високої напруги визначено одноелементні з допоміжними осердями, а саме «High Magnetic Coupling Passive Loop» та «одноконтурний екран з феромагнітними осердями та несиметричним магнітним зв'язком».

Ключові слова: магнітне поле, екранування, кабельна лінія, гранично допустимий рівень, промислового частота.

1. Вступ

Кабельні лінії високої напруги (КЛ) широко використовуються в розвинених країнах світу для передачі електричної енергії в містах і є найбільш перспективним засобом передачі електричної енергії в Україні. Це зумовлено тим, що ширина охоронної зони КЛ на порядок менша за ширину охоронної зони повітряної лінії, відповідно, траса КЛ не вимагає відчуження великих і дорогих міських земельних ділянок [1]. Так, згідно [2] відстань від крайнього проводу повітряної лінії на напругу 110 кВ до межі охоронної зони складає 20 м, а відстань від крайнього кабелю підземної КЛ – 1 м.

При прокладанні сучасних КЛ використовують силові одножилінні кабелі з ізоляцією зі зшитого поліетилену. Правила улаштування електроустановок дозволяють прокласти кабелі за схемою «у площині» або за схемою «у трикутник» [3, С. 269]. При використанні схеми «у трикутник» утворюване магнітне поле (МП) є меншим. Проте схема «у площині» (при заземленні струмопровідних екранів кабелів з обох кінців з транспозицією екранів або при заземленні екранів з одного кінця) забезпечує краще тепловідведення від силових кабелів та, відповідно, більшу пропускну спроможність кабельної лінії.

Задачу розрахунку МП КЛ розглянуто у багатьох літературних джерелах [4–8]. Оскільки довжина КЛ зазвичай набагато перевищує відстань між силові-

© В. ГРІНЧЕНКО, О. ТКАЧЕНКО, Т. БІЛАН, 2022

ми кабелями, прокладеними паралельно один до одного, то задача розрахунку МП КЛ вирішується у двовимірній постановці (рис. 1, а). Якщо струми у власних екранах кабелів відсутні або ними можна знехтувати, то МП КЛ утворюється струмами, що протікають в жилах кабелів. Відповідно, діюче значення магнітної індукції B можна визначити за допомогою її просторових компонент [8]:

$$B = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{|\dot{B}_x|^2 + |\dot{B}_y|^2}, \quad (1)$$

$$\dot{B}_x = \sum_p -\frac{\mu_0 \dot{I}_p}{2\pi} \cdot \frac{y - y_p}{(x - x_p)^2 + (y - y_p)^2}, \quad (2)$$

$$\dot{B}_y = \sum_p \frac{\mu_0 \dot{I}_p}{2\pi} \cdot \frac{x - x_p}{(x - x_p)^2 + (y - y_p)^2}, \quad (3)$$

де \dot{B}_x та \dot{B}_y – відповідно, горизонтальна та вертикальна компоненти комплексної амплітуди магнітної індукції; p – індекс, що пробігає номери кабелів; \dot{I}_p – комплексна амплітуда струму в жилі p -ого кабелю; (x_p, y_p) – координати центра перерізу p -ого кабелю; (x, y) – координати точки спостереження; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнітна стала.

Вважаємо, що глибина прокладання КЛ дорівнює $d = 1,5$ м [3, С. 252], діюче значення струму – $I_{rms} = 1000$ А, відстань s між сусідніми кабелями – 0,2 або 0,5 м. Більше значення відстані між кабелями відповідає їх прокладанню в зоні муфтових з'єднань [3, С. 255]. Згідно [3, С. 249] перевірка відповідності МП КЛ гранично допустимому рівню виконується на висоті $h = 0,5$ м над поверхнею землі (рис. 1, а). Таким чином, для лівого силового кабелю маємо $x_1 = -s, y_1 = -d, \dot{I}_1 = \sqrt{2} I_{rms} \cdot \exp\left(-j \cdot \frac{2\pi}{3}\right)$, для центрального – $x_2 = 0, y_2 = -d, \dot{I}_2 = \sqrt{2} I_{rms}$, для правого – $x_3 = s, y_3 = -d, \dot{I}_3 = \sqrt{2} I_{rms} \times \exp\left(j \cdot \frac{2\pi}{3}\right)$, де j – уявна одиниця. Розподіл МП КЛ на висоті $y = h$, обчислений за допомогою (1)–(3), представлено на рис. 1, б. Як видно з розподілу безпосередньо над КЛ рівень МП сягає 17–

41 мкТл. Водночас гранично допустимий рівень МП в зоні житлової забудови становить 10 мкТл [3, С. 249]. На відстані 5 м від центрального кабелю МП КЛ становить 2–6 мкТл, та сягає 1,7 мкТл на відстані 10 м. Це може бути неприпустимим, якщо поряд із КЛ знаходиться житлова будівля, оскільки усередині житлових приміщень гранично допустимий рівень МП становить 0,5 мкТл [3, С. 249]. Загалом прийняті в Україні гранично допустимі рівні для магнітного поля промислової частоти відповідають сучасній світовій тенденції з уведення в дію більш жорстких стандартів. У табл. 1 наведено гранично допустимі рівні для низькочастотного магнітного поля, прийняті в країнах світу [9].

Традиційно для нормалізації МП КЛ використовують електромагнітні або магнітні (інша назва – магнітостатичні) екрани [10–16]. Принцип дії електромагнітного екрана є таким: під дією первинного змінного МП в екрані індукуються струми провідності, ці струми створюють вторинне поле, та в результаті суперпозиції первинного поля й вторинного утворюється результуюче поле, яке в області, що екранується, є слабкішим за первинне. Тому електромагнітні екрани виробляють з матеріалів із високою електропровідністю, а саме алюмінію або міді. Зазвичай використовують алюміній, бо він є дешевшим. На рис. 1, в, г представлені типові електромагнітні екрани, що використовуються для зменшення МП КЛ. Магнітні екрани виготовляють із матеріалів, що мають порівняно велику магнітну проникність. Принцип дії цих екранів полягає у тому, що лінії індукції первинного МП викривляються та проходять переважно крізь товщу стінок екрана, що має малий магнітний опір порівняно з магнітним опором навколишнього простору. Тому профілі магнітних екранів переважно замкнені або напівзамкнені (рис. 1, д, е).

Проте на даний момент перспективними засобами нормалізації МП КЛ є системи контурного екранування [17–30]. Найпростішим контурним екраном є прямокутний електропровідний контур. Ефективність такого екрана досліджена в [17]. У свою чергу, системи екранування можуть містити декілька контурних екранів, прямокутної або спеціальної форми, та допоміжні елементи, що підвищують індуктивний зв'язок між екранними і

Таблиця 1. Гранично допустимі рівні (ГДР) низькочастотного магнітного поля для населення
Table 1. Reference levels of the low-frequency magnetic field for the public and population

Країна	ГДР, мкТл	Країна	ГДР, мкТл	Країна	ГДР, мкТл
Бельгія	0,4/10/100	Німеччина	100	Фінляндія	0,4/100/500
Ізраїль	0,4/100	Норвегія	0,4/200	Франція	1/100
Італія	3/10/100	Росія	5	Хорватія	40/100
Нідерланди	0,4/200	Словенія	10/100	Швейцарія	1/100

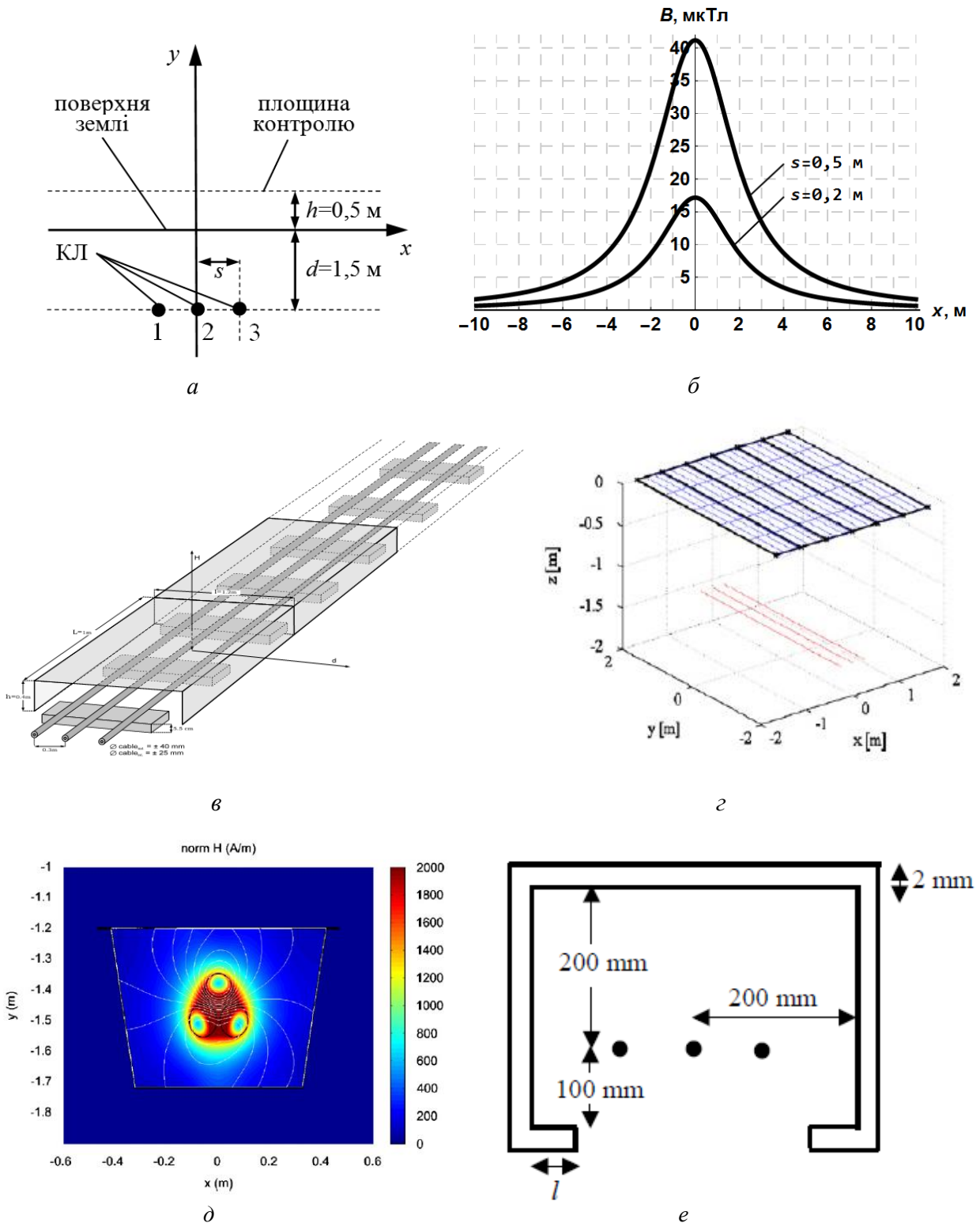


Рис. 1. Поперечний переріз траси КЛ (а), розподіл МП КЛ на висоті 0,5 м над землею (б) та традиційні екрани для зменшення МП КЛ: в – U-подібний електромагнітний екран [10]; г – плоский електромагнітний екран [11]; д – замкнений магнітний екран [11]; е – напівзамкнений магнітний екран [15]

Fig. 1. Cross-section of cable line route (а), cable line magnetic field distribution at a height of 0.5 m above the ground level (б), and common use shields for cable line magnetic field mitigation: в – U-shaped electromagnetic shield [10]; г – plane electromagnetic shield [11]; д – closed magnetic shield [11]; е – un-closed magnetic shield [15]

силовими кабелями, або що змінюють реактивний опір контурних екранів або їхніх окремих гілок.

Принцип дії контурного екрана аналогічний до принципу дії електромагнітного екрана: первинне змінне МП створює змінний магнітний потік крізь контурний екран, і відповідно до закону електромагнітної індукції в кабелях контурного екрана індукуються електричні струми. Тому кабелі контурних екранів, як і електромагнітні екрани, виготовляють з алюмінію, який має відносно високу електричну провідність при порівняно низькій вартості. При зменшенні МП КЛ контурний екран доцільно розміщувати таким чином, щоб його кабелі були паралельні силовим кабелям. Таке розташування дає змогу збільшити магнітний потік скрізь контурний екран та, відповідно, підвищити наведені струми та ефективність екранування.

Метою представленої роботи є визначення найбільш перспективних систем контурного екранування, що можуть бути використані для нормалізації магнітного поля кабельних ліній високої напруги.

Проведений огляд наукових публікацій та патентів, присвячених методам та засобам зменшення МП ліній електропередавання, показав, що провідними закордонними дослідницькими колективами, які займаються розробкою систем контурного екранування МП КЛ, є такі:

а) колектив з Politecnico di Torino (Турін, Італія) під керівництвом Dr. Aldo Canova [18–24];

б) колектив з Seville University (Севілья, Іспанія) під керівництвом Dr. Juan Carlos del Pino López [25, 26];

в) колектив з Prysmian S.p.A. (Мілан, Італія) під керівництвом Dr. Paolo Maioli [28–30].

Системи контурного екранування, розроблені кожним з колективів, мають свої особливості. Проте ці системи можуть бути класифіковані за такими ознаками: кількість контурних екранів у системі екранування; форма контурних екранів, що використовуються в системі екранування; спосіб підвищення ефективності екранування МП КЛ.

2. Одноелементні системи контурного екранування

Під «одноелементними» ми розуміємо системи екранування, які складаються з одного контурного екрана, всі кабелі якого з'єднані паралельно, та допоміжних елементів для підвищення ефективності екранування. Розробкою одноелементних систем контурного екранування для нормалізації МП КЛ займається колектив під керівництвом Dr. Aldo Canova. Результати їхніх досліджень представлено в роботах [18–23], а запропоновані конструкції систем екранування захищено патентом [24]. Так, пропонується використовувати контурний екран з трьох кабелів,

з'єднаних паралельно. На рис. 2 наведено декілька конструкцій таких екранів. Для посилення індуктивного зв'язку між контурним екраном та КЛ використовуються феромагнітні осердя, які охоплюють силові кабелі. Системи екранування на рис. 2, а, б мають спільну ознаку: екранні кабелі намотані на феромагнітні осердя. Проте Dr. Aldo Canova з колегами віддають перевагу системі контурного екранування, представлений на рис. 2, в, та яку вони назвали High Magnetic Coupling Passive Loop (НМСРЛ). Як видно, конструкція НМСРЛ є більш простою порівняно з тими, що представлено на рис. 2, а, б. Ефективність НМСРЛ досліджено в лабораторних умовах на відповідних фізичних макетах. Результати лабораторних досліджень, представлені в [18, 19], показали, що ефективність екранування МП КЛ може сягати 10 одиниць.

На рис. 2, в показано, що уздовж кожного силового кабелю прокладено один екранний кабель НМСРЛ. У той же час для уникнення локального перегріву силового кабелю вздовж лінії прилягання екранного кабелю, останній може бути замінений (розщеплений) на декілька паралельних. У [19] проаналізовано розподіли екранованого магнітного поля при використанні НМСРЛ, виконаного з трьох кабелів відповідно до рис. 2, в, та при розщепленні кожного з кабелів екрана на 2 з еквівалентним сумарним перерізом. Показано, що різниця максимальних значень магнітної індукції в обох випадках є несуттєвою, незважаючи на відмінності розподілу екранованого поля. Відповідно, можна стверджувати, що розщеплення не впливає на ефективність НМСРЛ. Результати подальших досліджень, представлених в [21–23], показали доцільність розщеплення екранного кабелю на 4 кабелі з еквівалентним сумарним перерізом. При практичній реалізації НМСРЛ, яку встановлено на діючу КЛ в зоні муфтових з'єднань, використано саме розщеплення на 4 екранні кабелі, розташованих рівномірно навколо кожного з силових кабелів (рис. 2, г). Найбільш повний аналіз цього типу НМСРЛ наведено в [23].

Таким чином, система контурного екранування НМСРЛ має низку переваг: ефективність екранування МП КЛ може сягати 10 одиниць та більше; систему екранування апробовано на діючих КЛ; конструкція системи є відносно простою. Водночас в [18–23] не представлено способу (методики) розрахунку величин струмів, індукованих в екранних кабелях НМСРЛ, які необхідні для аналізу теплового впливу НМСРЛ на силові кабелі та, відповідно, для визначення зміни пропускну здатності КЛ. Так само не представлено способу розрахунку ефективності екранування МП КЛ. Наприклад, в [18] стверджується, що ефектив-

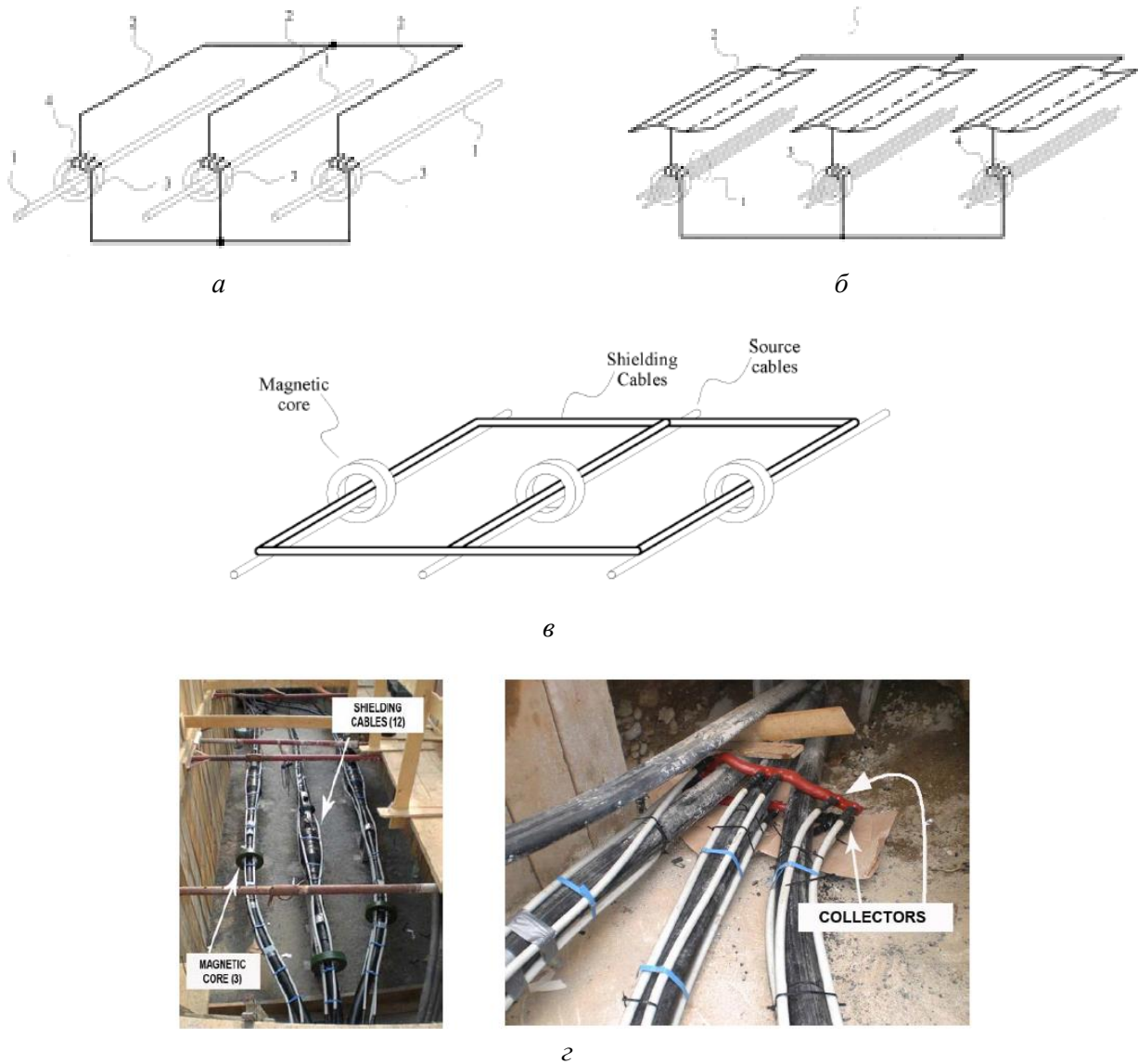


Рис. 2. Одноелементні системи контурного екранування: *a, б* – схематичне зображення [24]; *в* – HMCPL [19]; *г* – приклади практичної реалізації HMCPL [20]
Fig. 2. Single-element contour shielding systems: *a, б* – sketches of shielding systems [24]; *в* – sketch of HMCPL [19]; *г* – operative HMCPL [20]

ність екранування дорівнює 10, а в [21] представлено розподіл ефективності екранування, згідно з яким її значення може сягати 27 одиниць. Вочевидь, ефективність HMCPL є функцією координат точки спостереження та залежить від параметрів системи контурного екранування (геометричні розміри екранних кабелів, їхня електрична провідність, розміри феромагнітних осердь і їхні магнітні властивості). Проте цю функцію не знайдено, а в [21] стверджується: «Passive loop systems are quite complex to be analyzed».

Інший тип одноелементної системи контурного екранування, що також складається з трьох екранних кабелів, з'єднаних паралельно, розгля-

нуто в [25, 26] дослідницьким колективом з Seville University. Особливість цієї системи полягає у використанні допоміжних конденсаторів певної ємності, під'єднаних до екранних кабелів (рис. 3, *a*), завдяки чому ефективність екранування МП КЛ може сягати 10–19 одиниць в залежності від перерізу екранних кабелів. У [27] такі системи контурного екранування з допоміжними конденсаторами названо резонансними. Суттєвим недоліком таких систем екранування є істотна залежність ефективності екранування від величини ємності використаних конденсаторів, причому малі відхилення ємності від оптимального значення можуть викликати значне зменшення ефективності екранування.

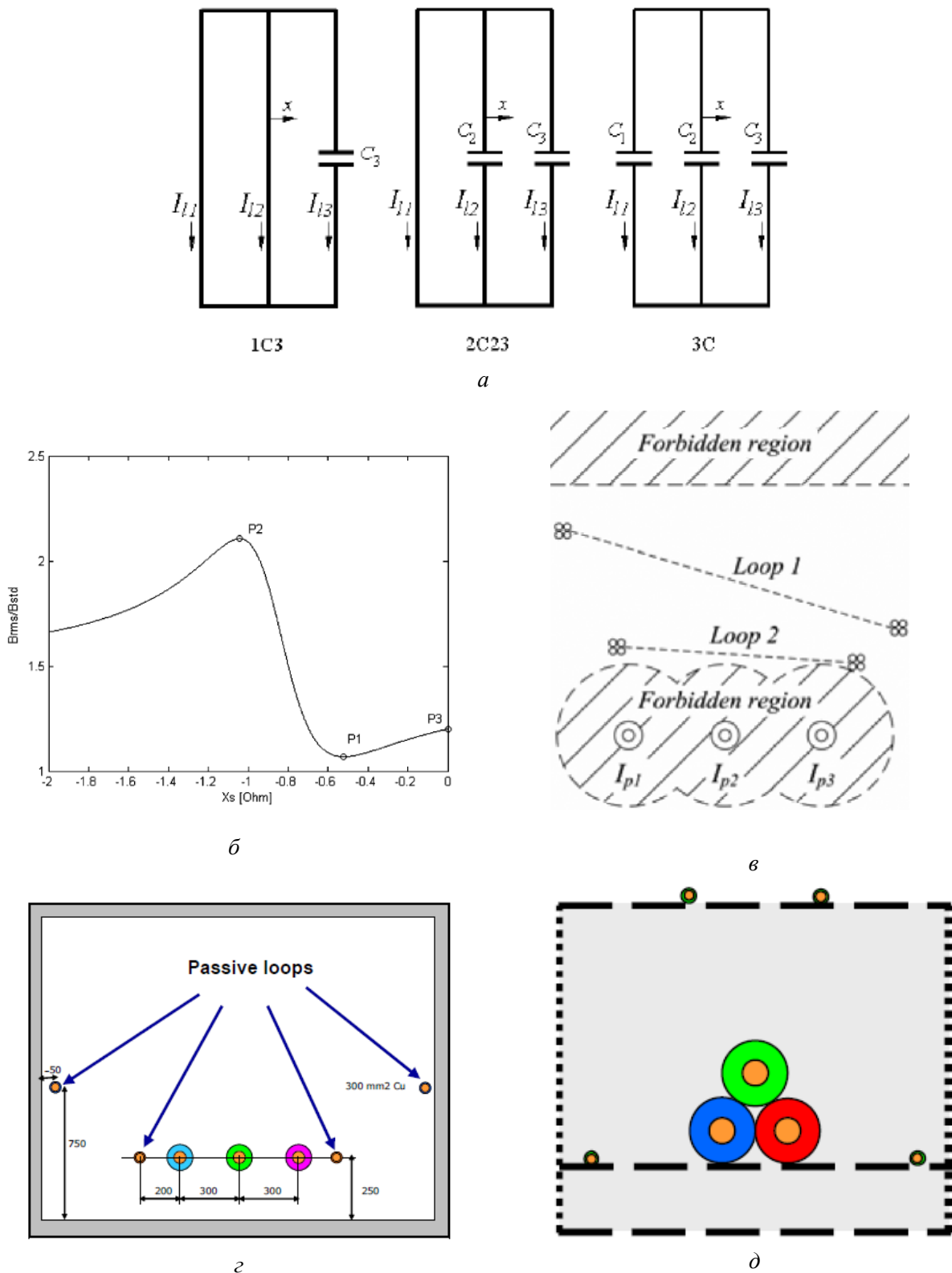


Рис. 3. Схематичне зображення резонансних систем контурного екранування [25] (а) та характер залежності їхньої ефективності від ємності використаних конденсаторів [31] (б); схематичне зображення двоелементних систем контурного екранування при використанні допоміжних конденсаторів [26] (в) та у разі їх відсутності [28, 29] (г, д)

Fig. 3. Sketches of resonance shielding systems [25] (a) and a character of dependence of their efficiency on capacitor capacity [31] (б); sketches of double-element shielding systems with extra capacitors [26] (в) and without them [28, 29] (г, д)

Цей ефект було виявлено іншим колективом в [31] при дослідженні ефективності екранування МП повітряних ліній електропередавання за допомогою схожих систем контурного екранування, що містять допоміжні конденсатори. На рис. 3, б наведено залежність ефективності екранування МП повітряної лінії від ємнісного опору, на якій видно значне спадання ефективності в околиці її максимуму. Такий характер залежності ефективності системи екранування від ємності, яка зменшується внаслідок деградації конденсаторів, ускладнює експлуатацію системи.

3. Двоелементні системи контурного екранування

Під «двоелементними» ми розуміємо системи екранування, які складаються з двох контурних екранів, пов'язаних лише індуктивно. Розробкою таких систем контурного екранування для нормалізації МП КЛ займається колектив під керівництвом Dr. Juan Carlos del Pino López. Запропоновані ними системи екранування складаються з двох прямокутних контурних екранів [25, 26]. Один контурний екран розташований поблизу КЛ, інший – між КЛ і поверхнею землі, яка є границею області екранування (рис. 3, в). Вирішенню задачі оптимізації параметрів двоелементної системи контурного екранування присвячено [26]. У цій роботі визначено положення контурних екранів, струми в екранах та ємності допоміжних конденсаторів, які знаходяться в інтервалі від 2,4 до 7,4 мФ залежно від перерізу екранних кабелів та кількості витків кабелю в кожному з контурних екранів. Ефективність екранування системи коливається в інтервалі від 22,7 до 83,1 при використанні контурних екранів з перерізом 480 мм² (кожний контурний екран складається з чотирьох кабелів з перерізом 120 мм²), та в інтервалі від 42,4 до 201,2 при використанні контурних екранів з перерізом 960 мм² (кожний контурний екран складається з восьми кабелів перерізом 120 мм²). Водночас такі двоелементні системи екранування мають істотні недоліки. По-перше, їхню ефективність, яка залежить від точки спостереження, не було верифіковано експериментально на фізичному макеті або на діючій КЛ. По-друге, двоелементні системи екранування з допоміжними конденсаторами належать до класу «резонансних систем контурного екранування», обговорених вище. Відповідно, зміна ємності конденсаторів при їх експлуатації може викликати значні зміни ефективності екранування.

Для повноти огляду слід звернути увагу на системи контурного екранування, запропоновані в [28, 29]. Вони складаються з двох контурних екранів, один з яких розташований в площині КЛ, інший – на деякій висоті над КЛ (рис. 3, г, д). Використан-

ня допоміжних конденсаторів не передбачено. В роботах відзначається, що система екранування з таким розташуванням екранних кабелів не впливає на тепловий режим КЛ, проте аналізу ефективності екранування запропонованих систем не наведено.

4. Багатоелементні системи контурного екранування

Під «багатоелементними» ми розуміємо системи екранування, які складаються з більш ніж двох контурних екранів. Розробкою таких систем контурного екранування займається колектив під керівництвом Dr. Paolo Maioli. Результати досліджень представлено в роботах [28, 29], а запропоновані конструкції систем екранування захищено патентом [30]. Такі багатоелементні системи екранування можуть містити від 5 до 16 контурних екранів. На рис. 4, а, б представлено, відповідно, схематичне зображення системи з 5 контурних екранів та приклад практичної реалізації системи з 9 контурних екранів. Хоча подібні системи контурного екранування не містять допоміжних феромагнітних осердь або конденсаторів, проте згідно [29] забезпечують досить високу ефективність екранування МП КЛ. На рис. 4, в наведено залежність ефективності екранування системи з 16 контурних екранів від площі перерізу екранних кабелів. Як видно, може бути досягнуто ефективність екранування МП КЛ понад 20 одиниць. Проте це вимагає значного підвищення металоємності системи екранування.

Підсумки огляду закордонних наукових публікацій структуровано в табл. 2, де зведено відомі системи контурного екранування та відзначено їхні відмінні ознаки. Найбільш перспективною системою можна вважати НМСРЛ, представлену на рис. 2, в. Її ефективність перевірено на діючих КЛ (рис. 2, г), експлуатація є простою порівняно з резонансними системами контурного екранування (для яких необхідно проводити моніторинг ємності конденсаторів), а металоємність та габарити НМСРЛ є набагато меншими, ніж у багатоелементних систем контурного екранування.

5. Дослідження систем контурного екранування МП КЛ в Україні

В Україні дослідженнями систем контурного екранування для нормалізації МП КЛ займалися в Державній установі «Інститут технічних проблем магнетизму НАН України» (Харків, Україна). Об'єктом дослідження було МП КЛ в зоні муфтових з'єднань. В [1] для нормалізації МП запропоновано використовувати одноконтурний екран з феромагнітними осердями та несиметричним магнітним зв'язком (рис. 5, а). Такий екран забезпечує високу ефективність екранування МП КЛ, що експеримен-

Таблиця 2. Відомі закордонні системи контурного екранування
Table 2. Shielding systems designed abroad

Система контурного екранування	Число використаних контурних екранів	Форма контурних екранів	Спосіб підвищення ефективності екранування
рис. 2, в	1	Три кабелі, з'єднані паралельно	Допоміжні феромагнітні осердя, що охоплюють силові та екранні кабелі
рис. 3, а	1	Три кабелі, з'єднані паралельно	Допоміжні конденсатори певної ємності, під'єднані до екранів
рис. 3, в	2	Прямокутний контур	Допоміжні конденсатори певної ємності, під'єднані до екранів
рис. 3, г, д	2	Прямокутний контур	Розміщення «верхнього» контурного екрана між кабельною лінією та областю екранування
рис. 4, а, б	5–16	Прямокутний контур	Збільшення металоємності системи екранування

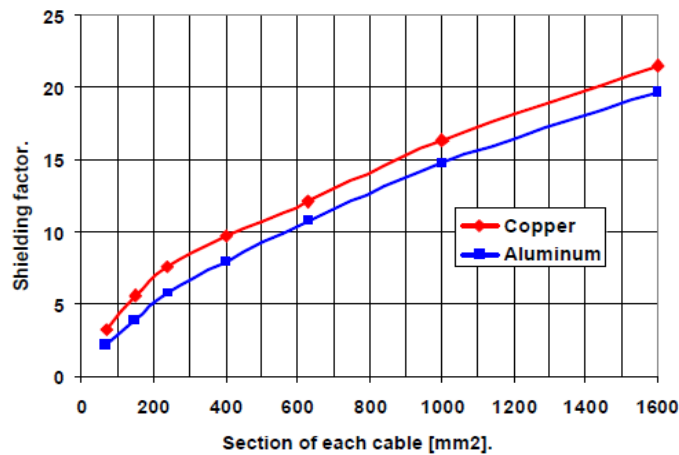
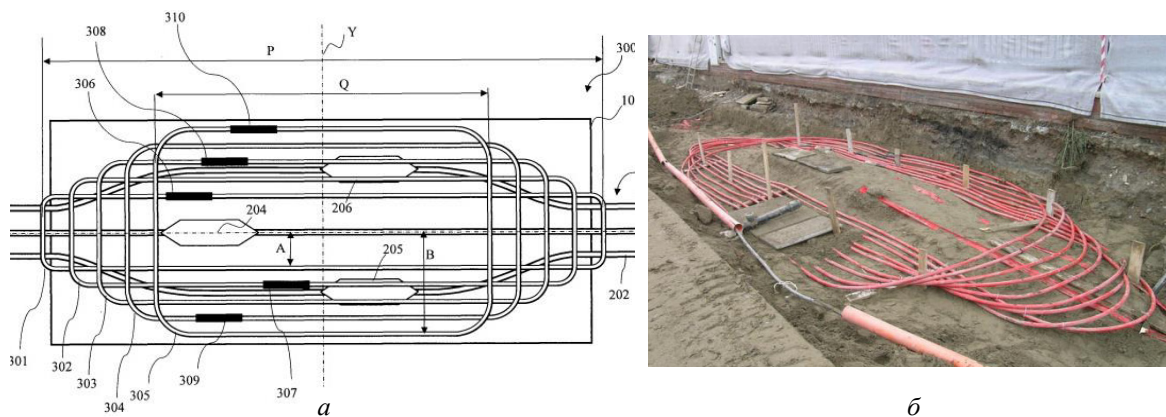


Рис. 4. Схематичне зображення системи з 5 контурних екранів [30] (а); приклад практичної реалізації системи з 9 контурних екранів [28] (б); залежність ефективності екранування системи з 16 контурних екранів від площі перерізу екранних кабелів [29] (в)

Fig. 4. Sketch of shielding system made of 5 passive loops [30] (a); operative shielding system made of 9 passive loops [28] (b); dependence of the shielding efficiency from a cross-section of shielding cables for shielding system made of 16 passive loops [29] (c)

тально підтверджено в [1] на повномасштабному фізичному макеті екрана (рис. 5, б). Так, при типовій для зон муфтових з'єднань відстані 0,5 м між силовими кабелями, рекомендованій ширині екра-

на 1,5 м та при його розташуванні над кабельною лінією на висоті 0,3 м, ефективність екранування МП КЛ становила 7 одиниць. Особливістю одно-контурного екрана з феромагнітними осердями та

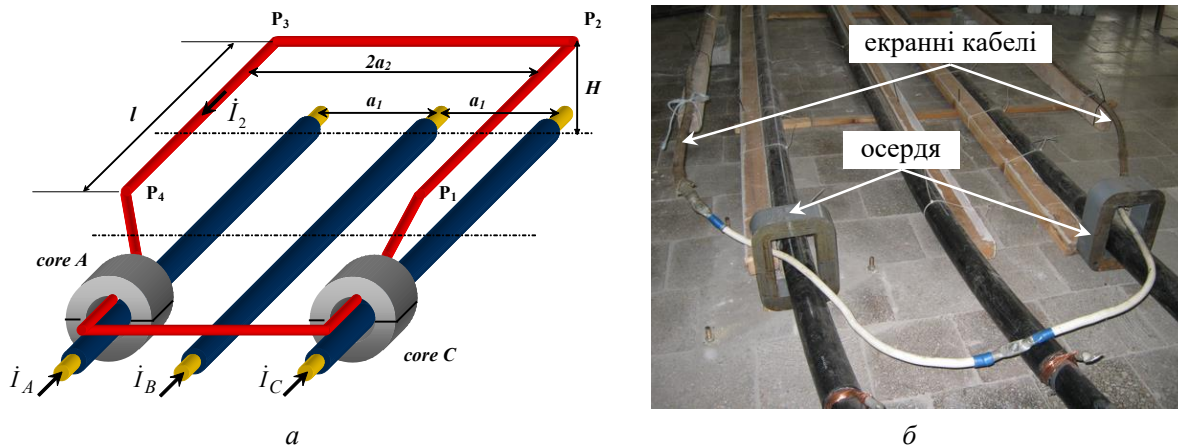


Рис. 5. Одноконтурний екран з феромагнітними осерддями та несиметричним магнітним зв'язком [1]: схематичне зображення (а) та фото повномасштабного фізичного макета (б)
Fig. 5. Single-loop shield with ferromagnetic cores and asymmetric magnetic coupling [1]: sketch (a) and photo of full-scale experimental setup (б)

несиметричним магнітним зв'язком є те, що його екранні кабелі віддалено від КЛ на висоту, рівну 0,4–0,6 відстані між сусідніми силовими кабелями. Це дозволяє мінімізувати тепловий вплив на КЛ у порівнянні з відомими контурними екранами аналогічної ефективності та, відповідно, уникнути зниження пропускної спроможності КЛ [32].

6. Висновки

Величина магнітного поля кабельних ліній електропередачі високої напруги на висоті 0,5 м над поверхнею землі може перевищувати гранично допустимий рівень 10 мкТл, затверджений в Україні для зони житлової забудови.

Перспективними засобами нормалізації магнітного поля кабельних ліній є системи контурного екранування. Відомі системи контурного екранування можуть бути класифіковані за такими ознаками: кількість контурних екранів у системі екранування; форма контурних екранів, що використовуються в системі екранування; спосіб підвищення ефективності екранування магнітного поля кабельних ліній. За кількістю контурних екранів системи поділяються на одноелементні, двоелементні та багатоеlementні (які можуть складатися з 16 контурних екранів). Відомі системи екранування складаються або з прямокутних контурних екранів, або контурних екранів з трьох кабелів, з'єднаних паралельно. Для підвищення ефективності систем контурного екранування можуть використовуватися феромагнітні осерддя, що охоплюють силові та екранні кабелі, допоміжні конденсатори, під'єднані до екранних кабелів, спеціальне розташування контурів між кабельною лінією та областю екранування, збільшення металоемності контурних екранів, тощо.

До найбільш перспективних систем контурного екранування для нормалізації магнітного поля кабельних ліній високої напруги можна віднести систему High Magnetic Coupling Passive Loop, запропоновану в Politecnico di Torino (Турін, Італія), та одноконтурний екран з феромагнітними осерддями та несиметричним магнітним зв'язком, запропонований в Державній установі «Інститут технічних проблем магнетизму НАН України» (Харків, Україна).

7. Фінансування роботи.

Представлену роботу виконано в рамках проєктів 0121U111836, 0120U100470 та 0122U000178, які фінансуються Національною академією наук України.

Посилання

1. Rozov V.Y., Grinchenko V.S., Yerisov A.V., Dobrodeyev P.N. Efficient shielding of three-phase cable line magnetic field by passive loop under limited thermal effect on power cables. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2019, no. 6, pp. 50–54. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2019.6.07>
2. Про затвердження Правил охорони електричних мереж: Постанова Кабінету Міністрів України від 4 березня 1997 р. № 209 у редакції від 5 квітня 2017 р.
3. Правила улаштування електроустановок. Видання офіційне. Міненерговугілля України. Х.: Видавництво «Форт», 2017. 760 с.
4. Moro F., Turri R. Accurate calculation of the right-of-way width for power line magnetic field impact assessment. *Progress in Electromagnetics Research*, 2012, vol. 37, pp. 343–364. <http://dx.doi.org/10.2528/PIERB11112206>
5. Moro F., Turri R. Fast analytical computation of power-line magnetic fields by complex vector method. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2008, vol. 23, no. 2, pp. 1042–1048. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2007.915212>

6. Mimos E.I., Tsanakas D.K., Tzinevrakis A.E. Optimum phase configurations for the minimization of the magnetic fields of underground cables. *Electrical Engineering*, 2010, vol. 91, no. 6, pp. 327—335. <https://doi.org/10.1007/s00202-009-0126-x>
7. Song Y.L., Yu C., Chuang F.C., Tseng Y.C., Zou J.Y., Hsu S.K., Ma T.G., Wu T.L., Chang L.M. Evaluation of magnetic field from varied permutation power transmission line at high technology nano-Fab. *IEEE 4th International Conference on Power Electronics Systems and Applications*, 2011, pp. 1—4. <https://doi.org/10.1109/PESA.2011.5982953>
8. Karady G.G., Nunez C.V., Raghavan R. The feasibility of magnetic field reduction by phase relationship optimization in cable systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1998, vol. 13, no. 2, pp. 647—654. <https://doi.org/10.1109/61.660956>
9. *Exposure limits for low-frequency fields (public)*. World Health Organization. Available online: <http://apps.who.int/gho/data/node.main.EMFLIMITSPUBLICLOW?lang=en>
10. Hoeffelman J. Shielding of underground power cables, From theory to practical implementation. *18th International Conference on Electricity Distribution. Round Table on Magnetic Field Mitigation Techniques*, 2003, pp. 8—13.
11. De Wulf M., Wouters P., Sergeant P., Dupre' L., Hoferlin E., Jacobs S., Harlet P. Electromagnetic shielding of high-voltage cables. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2007, no. 316, pp. e908—e911. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2007.03.137>
12. Zucca M., Lorusso G., Fiorillo F., Roccato P.E., Annibale M. Highly efficient shielding of high-voltage underground power lines by pure iron screens. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2008, vol. 320, no. 20, pp. 1065—1069. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2008.04.096>
13. Cardelli E., Faba A., Pirani A. Nonferromagnetic open shields at industrial frequency rate. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2010, vol. 46, no. 3, pp. 889—898. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2009.2031110>
14. Sergeant P., Koroglu S. Electromagnetic losses in magnetic shields for buried high voltage cables. *Progress in Electromagnetics Research*, 2011, vol. 115, pp. 441—460. <http://dx.doi.org/10.2528/PIER11022206>
15. Riba Ruiz J.R., Alabern Morera X. Magnetic shields for underground power lines. *International Conference on Renewable Energies and Power Quality*, 2004, paper 230.
16. del-Pino-López J.C., Cruz-Romero P., Serrano-Iribarnegaray L., Martínez-Román J. Magnetic field shielding optimization in underground power cable duct banks. *Electric Power Systems Research*, 2014, vol. 114, pp. 21—27. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2014.04.001>
17. Wall C.A., Arnera P.L., Barbieri M.B. Implementation of a tool for magnetic field mitigation using passive loops. *2012 6th IEEE/PES Transmission and Distribution: Latin America Conference and Exposition*, pp. 1—5. <https://doi.org/10.1109/TDC-LA.2012.6319095>
18. Canova A., Giaccone L. Magnetic field mitigation of power cable by high magnetic coupling passive loop. *20th International Conference on Electricity Distribution*, 2009, paper 0163.
19. Canova A., Giaccone L. A novel technology for magnetic-field mitigation: high magnetic coupling passive loop. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2011, vol. 26, no. 3, pp. 1625—1633. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2010.2099671>
20. Canova A., Giaccone L. Magnetic mitigation of HV cable junction zone. *8th International Conference on Insulated Power Cables*, 2011, paper B.1.6.
21. Canova A., Bavastro D., Freschi F., Giaccone L., Repetto M. Magnetic shielding solutions for the junction zone of high voltage underground power lines. *Electric Power Systems Research*, 2012, vol. 89, pp. 109—115. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2012.03.003>
22. Canova A., Freschi F., Giaccone L., Guerrisi A., Repetto M. Magnetic field mitigation by means of passive loop: technical optimization. *COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, 2012, vol. 31, no. 3, pp. 870—880. <https://doi.org/10.1108/03321641211209762>
23. Canova A., Freschi F., Giaccone L., Guerrisi A. The high magnetic coupling passive loop: A steady-state and transient analysis of the thermal behavior. *Applied Thermal Engineering*, 2012, vol. 37, pp. 154—164. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.11.010>
24. Canova A., Giaccone L. Passive shielding system of a meshed and conductive type with high magnetic coupling passive loop: Patent no. PCT/IB2009/000445, 2009.
25. Cruz P., Hoeffelman J., del Pino J.C. Mitigación de campos magnéticos en líneas subterráneas de potencia mediante el empleo de lazos pasivos. *IEEE Latin America Transactions*, 2008, vol. 6, no. 2, pp. 59—65.
26. del-Pino-López J.C., Cruz-Romero P. The effectiveness of compensated passive loops for mitigating underground power cable magnetic fields. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2011, vol. 26, no. 2, pp. 674—683. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2009.2039150>
27. Дикой В.П., Токарский А.Ю., Рубцова Н.Б., Мисриханов М.Ш. Тросовые экраны и их применение на ВЛ-500 кВ. *Повышение эффективности работы энергосистем. Тр. ИГЭУ.*, 2001, Вып. 4, С. 209—215.
28. Maioli P., Zaccone E. Thermal design of HV electric systems with EMF mitigation devices. *International Colloquium Power Frequency Electromagnetic Fields*, 2009, paper R.18.
29. Maioli P., Zaccone E. Passive loops technique for electromagnetic fields mitigation: applications and theoretical considerations. *Jicable International Conference on Insulated Power Cables*, 2007, pp. 231—236.
30. Maioli P. Shielding of high voltage cables: Patent No.: US 8,895,851 B2, 2014.
31. Faria J.A.B., Almeida M.E. Accurate calculation of magnetic-field intensity due to overhead power lines with or without mitigation loops with or without capacitor compensation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2007, vol. 22, no. 2, pp. 951—959. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2006.883025>
32. Tkachenko O., Grinchenko V., Dobrodeyev P. Thermal effect of single loop shield on high-voltage cable line capacity. *Problemele Energeticii Regionale*, 2021, no. 1 (49), pp. 1—11. <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2021.1-49.01>

REVIEW OF PASSIVE LOOP SYSTEMS FOR NORMALIZATION OF HIGH-VOLTAGE CABLE LINE MAGNETIC FIELD

Volodymyr Grinchenko^{1*}, Ph.D., Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-6195-3011>

Oleksandr Tkachenko¹, Ph.D., <https://orcid.org/0000-0001-7307-7293>

Tetiana Bilan², Ph.D., Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-0280-6716>

¹A. Pidhornyi Institute of Mechanical Engineering Problems of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2/10, Pozharskoho Street, Kharkiv, 61046, Ukraine;

e-mail: ipmach@ipmach.kharkov.ua

²Institute of General Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine, 172, Antonovycha Street, Kyiv, 03150, Ukraine;

e-mail: info@ienergy.kiev.ua

*Corresponding author: vsgrinchenko@gmail.com

Abstract. *The paper is devoted to the review of known passive loop systems that can be used to normalize the high-voltage cable line magnetic field. The purpose is to identify the most promising systems. We review the most cited scientific papers and patents about the reduction of the power line magnetic field. We identify the top research groups engaged in the design of passive loop systems. The two groups are from Italy, the one each is from Spain and Ukraine. The passive loop systems developed by each group have their own features. We classify the systems according to the following characteristics: the number of passive loops in the shielding system, the shape of passive loops used in the shielding system, and the way to increase the shielding efficiency of cable line magnetic field. According to the number of passive loops, the systems can be divided into three types: single-element, double-element and multi-element. According to the shape of passive loops, two types of shielding systems can be distinguished, namely, the systems using rectangular passive loops and the systems using passive loops made of three cables connected in parallel. According to the method of the shielding efficiency increasing, the system can be divided into four types: the first use ferromagnetic cores covering power and shield cables, the second use additional capacitors connected to shield cables, the third use a unique arrangement of loops between the cable line and the shielding area, the fourth use an increase in the cross-section of shield cables, respectively, an increase in the quantity of metal. The review shows the most promising passive loop systems for normalizing the high-voltage cable line magnetic field are single-element systems with additional cores, namely «High Magnetic Coupling Passive Loop» and «Single-loop shield with ferromagnetic cores and asymmetric magnetic coupling».*

Keywords: magnetic field, shielding, cable line, reference level, power frequency.

References

1. Rozov V.Y., Grinchenko V.S., Yerisov A.V., Dobrodeyev P.N. Efficient shielding of three-phase cable line magnetic field by passive loop under limited thermal effect on power cables. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2019, no. 6, pp. 50–54. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2019.6.07>
2. On the approval of the Rules for the protection of electrical networks: Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine of March 4, 1997 No. 209 as amended on April 5, 2017 [in Ukrainian].
3. Electrical installation regulations. Kharkiv, Fort Publ., 2017. 760 p. [in Ukrainian].
4. Moro F, Turri R. Accurate calculation of the right-of-way width for power line magnetic field impact assessment. *Progress in Electromagnetics Research*, 2012, vol. 37, pp. 343–364. <http://dx.doi.org/10.2528/PIERB11112206>
5. Moro F, Turri R. Fast analytical computation of power-line magnetic fields by complex vector method. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2008, vol. 23, no. 2, pp. 1042–1048. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2007.915212>
6. Mimos E.I., Tsanakas D.K., Tzinevrakis A.E. Optimum phase configurations for the minimization of the magnetic fields of underground cables. *Electrical Engineering*, 2010, vol. 91, no. 6, pp. 327–335. <https://doi.org/10.1007/s00202-009-0126-x>
7. Song Y.L., Yu C., Chuang F.C., Tseng Y.C., Zou J.Y., Hsu S.K., Ma T.G., Wu T.L., Chang L.M. Evaluation of magnetic field from varied permutation power transmission line at high technology nano-Fab. *IEEE 4th International Conference on Power Electronics Systems and Applications*, 2011, pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/PESA.2011.5982953>

8. Karady G.G., Nunez C.V., Raghavan R. The feasibility of magnetic field reduction by phase relationship optimization in cable systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1998, vol. 13, no. 2, pp. 647–654. <https://doi.org/10.1109/61.660956>
9. *Exposure limits for low-frequency fields (public)*. World Health Organization. Available online: <http://apps.who.int/gho/data/node.main.EMFLIMITSPUBLICLOW?lang=en>
10. Hoeffelman J. Shielding of underground power cables, From theory to practical implementation. *18th International Conference on Electricity Distribution. Round Table on Magnetic Field Mitigation Techniques*, 2003, pp. 8–13.
11. De Wulf M., Wouters P., Sergeant P., Dupre' L., Hoferlin E., Jacobs S., Harlet P. Electromagnetic shielding of high-voltage cables. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2007, no. 316, pp. e908–e911. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2007.03.137>
12. Zucca M., Lorusso G., Fiorillo F., Roccato P.E., Annibale M. Highly efficient shielding of high-voltage underground power lines by pure iron screens. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2008, vol. 320, no. 20, pp. 1065–1069. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2008.04.096>
13. Cardelli E., Faba A., Pirani A. Nonferromagnetic open shields at industrial frequency rate. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2010, vol. 46, no.3, pp. 889–898. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2009.2031110>
14. Sergeant P., Koroglu S. Electromagnetic losses in magnetic shields for buried high voltage cables. *Progress in Electromagnetics Research*, 2011, vol. 115, pp. 441–460. <http://dx.doi.org/10.2528/PIER11022206>
15. Riba Ruiz J.R., Alabern Morera X. Magnetic shields for underground power lines. *International Conference on Renewable Energies and Power Quality*, 2004, paper 230.
16. del-Pino-López J.C., Cruz-Romero P., Serrano-Iribarnegaray L., Martínez-Román J. Magnetic field shielding optimization in underground power cable duct banks. *Electric Power Systems Research*, 2014, vol. 114, pp. 21–27. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2014.04.001>
17. Wall C.A., Arnera P.L., Barbieri M.B. Implementation of a tool for magnetic field mitigation using passive loops. *2012 6th IEEE/PES Transmission and Distribution: Latin America Conference and Exposition*, pp. 1–5. <https://doi.org/10.1109/TDC-LA.2012.6319095>
18. Canova A., Giaccone L. Magnetic field mitigation of power cable by high magnetic coupling passive loop. *20th International Conference on Electricity Distribution*, 2009, paper 0163.
19. Canova A., Giaccone L. A novel technology for magnetic-field mitigation: high magnetic coupling passive loop. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2011, vol. 26, no. 3, pp. 1625–1633. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2010.2099671>
20. Canova A., Giaccone L. Magnetic mitigation of HV cable junction zone. *8th International Conference on Insulated Power Cables*, 2011, paper B.1.6.
21. Canova A., Bavastro D., Freschi F., Giaccone L., Repetto M. Magnetic shielding solutions for the junction zone of high voltage underground power lines. *Electric Power Systems Research*, 2012, vol. 89, pp. 109–115. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2012.03.003>
22. Canova A., Freschi F., Giaccone L., Guerrisi A., Repetto M. Magnetic field mitigation by means of passive loop: technical optimization. *COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, 2012, vol. 31, no. 3, pp. 870–880. <https://doi.org/10.1108/03321641211209762>
23. Canova A., Freschi F., Giaccone L., Guerrisi A. The high magnetic coupling passive loop: A steady-state and transient analysis of the thermal behavior. *Applied Thermal Engineering*, 2012, vol. 37, pp. 154–164. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.11.010>
24. Canova A., Giaccone L. Passive shielding system of a meshed and conductive type with high magnetic coupling passive loop: Patent no. PCT/IB2009/000445, 2009.
25. Cruz P., Hoeffelman J., del Pino J.C. Mitigación de campos magnéticos en líneas subterráneas de potencia mediante el empleo de lazos pasivos. *IEEE Latin America Transactions*, 2008, vol. 6, no. 2, pp. 59–65.
26. del-Pino-López J.C., Cruz-Romero P. The effectiveness of compensated passive loops for mitigating underground power cable magnetic fields. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2011, vol. 26, no. 2, pp. 674–683. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2009.2039150>
27. Dikoi V.P., Tokarskiy A.Yu., Rubtsova N.B., Misrikhanov M.Sh. Rope shields and their application on 500 kV overhead lines. *Improvement of power system efficiency. Proceedings of ISPU*, 2001, Issue. 4, pp. 209–215.
28. Maioli P., Zaccone E. Thermal design of HV electric systems with EMF mitigation devices. *International Colloquium Power Frequency Electromagnetic Fields*, 2009, paper R.18.
29. Maioli P., Zaccone E. Passive loops technique for electromagnetic fields mitigation: applications and theoretical considerations. *Jicable International Conference on Insulated Power Cables*, 2007, pp. 231–236.
30. Maioli P. Shielding of high voltage cables: Patent No.: US 8,895,851 B2, 2014.
31. Faria J.A.B., Almeida M.E. Accurate calculation of magnetic-field intensity due to overhead power lines with or without mitigation loops with or without capacitor compensation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2007, vol. 22, no. 2, pp. 951–959. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2006.883025>
32. Tkachenko O., Grinchenko V., Dobrodeyev P. Thermal effect of single loop shield on high-voltage cable line capacity. *Problemele Energeticii Regionale*, 2021, no. 1 (49), pp. 1–11. <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2021.1-49.01>

Надійшла до редколегії: 27.10.2022