

ЗНИЖЕННЯ РІВНЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ПІДЗЕМНОЇ КАБЕЛЬНОЇ ЛІНІЇ НА ВІДПОВІДАЛЬНИХ ДІЛЯНКАХ ЗА ДОПОМОГОЮ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАГНІТНИХ ЕКРАНІВ КІНЦЕВОЇ ДОВЖИНИ

А.А. Щерба*, чл. кор НАН України, О.Д. Подольцев**, докт. техн. наук,
І.М. Кучерява, докт. техн. наук
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна.
E-mail: podol@ied.org.ua

У роботі виконано чисельний розрахунок та аналіз тривимірного магнітного поля підземної кабельної лінії з магнітними екранами кінцевої довжини, які використовуються для зменшення рівня поля на поверхні землі. Як екрани пропонується використовувати насипний та засипний ґрунт, що містить магнітні частки і внаслідок цього має ефективні магнітні властивості ($\mu_{\text{eff}} = 1 \div 1000$). Досліджено ефективність використання такого типу екранів для підземної кабельної лінії напругою 330 кВ залежно від їхніх геометричних розмірів та значення ефективної магнітної проникності μ_{eff} . Показано, що застосування засипного ґрунту з магнітними властивостями дає змогу досягти п'ятикратного зниження магнітного поля на поверхні землі, і такий тип екрана є більш ефективним, ніж екран у вигляді насипного ґрунту з магнітними властивостями. Комп'ютерні розрахунки показали немонотонний характер змінення магнітного поля на поверхні землі над крайовими зонами магнітного екрана. Виявлено також, що подовжній розмір крайових зон має порядок глибини, на якій розташовані кабелі. Бібл. 16, рис. 9.

Ключові слова: підземна кабельна лінія, тривимірне магнітне поле, магнітний екран, композиційний матеріал з магнітними властивостями, зниження рівня магнітного поля, скінченно-елементний аналіз.

Вступ. Розвиток електроенергетики безпосередньо пов'язаний з удосконаленням пристроїв передачі електроенергії на великі відстані. До пристроїв транспортування електричної енергії відносяться кабельні лінії та повітряні лінії електропередачі високої напруги. Кабельні мережі на основі кабелів з ізоляцією зі зшитого поліетилену повною мірою відповідають сучасним вимогам щодо надійності [1]. Такі кабелі можуть прокладатися різними способами, в тому числі в землі без траншеї у великих містах і промислових центрах з додатковими засобами зниження створюваного ними магнітного поля для того, щоб забезпечити захист навколишнього середовища та задовольнити сучасним високим вимогам екологічної безпеки.

Як засоби захисту від високого рівня магнітного поля промислової частоти, створюваного кабельними лініями, застосовуються магнітні та електромагнітні екрани [2–4]. У роботі [5] досліджуються випадки використання тонких і об'ємних екранів, виконаних з магнітного композиційного матеріалу.

Основна мета екранування силових кабелів – досягнення безпечного рівня магнітного поля відповідно до діючих санітарних норм і правил електромагнітної безпеки [6, 7]. Екранування кабельних ліній може здійснюватися на певних ділянках їхнього прокладання у зв'язку, наприклад, з перетинанням з комунікаціями або розташуванням поблизу густонаселених пунктів.

Методом дослідження магнітного поля кабельних ліній, що широко використовується, є комп'ютерне моделювання. При цьому в більшості випадків виконується двовимірне чисельне моделювання в припущенні, що лінія і магнітні екрани, які застосовуються задля зниження магнітного поля на поверхні землі, є нескінченно протяжними, а умови їхнього прокладання незмінні за довжиною [3–5, 8, 9].

У роботі вивчаються особливості екранування поля магнітними екранами кінцевої довжини. Виконується чисельний розрахунок тривимірного магнітного поля підземної трифазної кабельної лінії за наявності магнітного екрана з метою виявлення впливу його розмірів на ефективність екранування. Як магнітні екрани розглядаються елементи конструкції кабельної лінії, виконані, на відміну від традиційного виконання, з композиційного матеріалу з магнітними властивостями. Зокрема, досліджується використання засипного ґрунту з магнітними властивостями (ЗМГ), який охоплює кабельну лінію на певній ділянці її довжини і містить магнітні частки, а також насипного ґрунту з магніт-

ними властивостями (НМГ) на певній ділянці, розташованій на заданій висоті над кабелями (проілюстровано далі на рис. 1, а, б).

Метою роботи є кількісне дослідження ефективності зниження магнітного поля кабельної лінії на поверхні землі залежно від магнітних властивостей та геометричних розмірів магнітних екранів кінцевої довжини, які виконано з композиційного матеріалу і є одночасно елементами конструкції такої лінії, а саме, засипним і насипним ґрунтом.

Дослідження в роботі проводиться за допомогою комп'ютерного моделювання на основі математичної моделі відносно скалярного магнітного потенціалу. Аналогічний підхід до моделювання магнітних систем представлено у роботі [10]. Відомі також моделі магнітних пристроїв зі струмом у розрахункових областях, з використанням скалярного потенціалу [11, 12].

Математична модель розрахунку тривимірного магнітного поля. Під час побудови моделі та проведення розрахунків приймалися наступні припущення.

1. Розглядалася надвисоковольтна кабельна лінія напругою 330 кВ, прокладена в землі на глибині 1,5 м паралельно поверхні землі (рис. 1). Три однофазні кабелі в лінії розташовані трикутником. У жилах кабелів протікає трифазна система струмів, рівномірно розподілених в перетині жил.

2. Додатковий ґрунт (ЗМГ або НМГ) у кабельній лінії на певній її ділянці довжиною $2l$ вико-

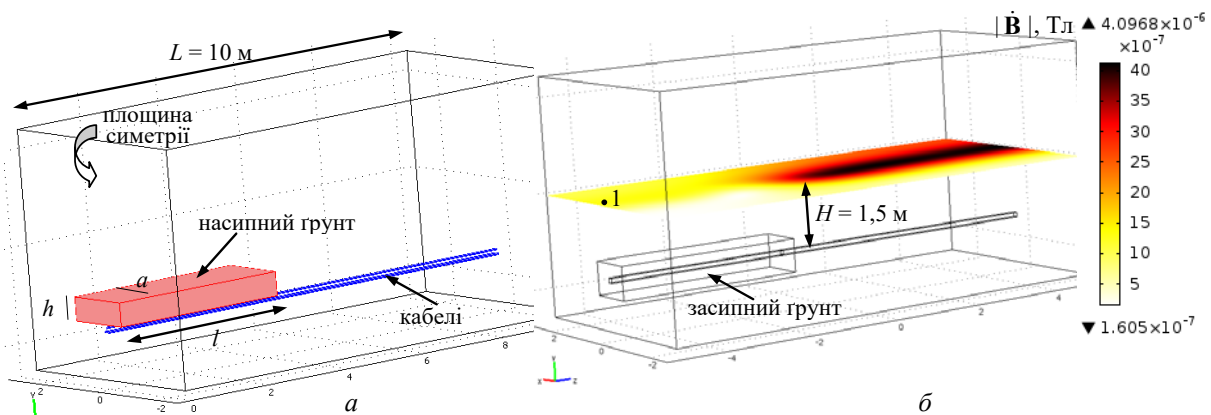


Рис. 1

наний з композиційного матеріалу, що має магнітні властивості і, внаслідок цього, виконує роль магнітного екрана.

3. Обрана модель лінії має симетрію відносно вертикальної поверхні (рис. 1, а), що надає змогу виконувати розрахунок поля лише в половині області, коли довжина ЗМГ / НМГ становить l .

4. Розраховується магнітне поле кабельної лінії безпосередньо на поверхні землі над цією лінією з урахуванням ЗМГ / НМГ.

Польова задача розв'язувалася у тривимірній постановці відносно скалярного магнітного потенціалу V_m як функції трьох просторових координат і часу

$$-\nabla \cdot (\mu_0 \mu_r (\nabla V_m - \mathbf{H}_{ext})) = 0. \quad (1)$$

де μ_0 – магнітна постійна; μ_r – відносна магнітна проникність відповідного середовища; $\mathbf{H}_{ext}(x, y, t)$ – напруженість магнітного поля, створюваного нескінченно протяжною кабельною лінією за відсутності магнітних екранів. Це поле має лише дві складові (лінія нескінченна вздовж координати z), які розраховуються згідно з [13] у такий спосіб

$$H_{ext,x}(x, y, t) = -\frac{I_{max}}{2\pi} \left[\frac{\cos(\omega t)(y - y_1)}{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2} + \frac{\cos(\omega t + 2\pi/3)(y - y_2)}{(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2} + \frac{\cos(\omega t + 4\pi/3)(y - y_3)}{(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2} \right], \quad (2)$$

$$H_{ext,y}(x, y, t) = \frac{I_{max}}{2\pi} \left[\frac{\cos(\omega t)(x - x_1)}{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2} + \frac{\cos(\omega t + 2\pi/3)(x - x_2)}{(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2} + \frac{\cos(\omega t + 4\pi/3)(x - x_3)}{(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2} \right], \quad (3)$$

де I_{max} – амплітуда струму в жилах кабелів; $\omega = 314$ рад; x_n, y_n – координати жили n -го кабелю.

Зазначимо, що під час отримання рівняння (1) використовувалося представлення в усій розрахунковій області напруженості магнітного поля у вигляді суми двох складових: $\mathbf{H} = -\nabla V_m + \mathbf{H}_{ext}$, одна з яких характеризується скалярним магнітним потенціалом V_m і створюється магнітними зарядами в магнітному екрані (композиційному ґрунті). Відповідно до використаної Comsol моделі (Magnetic field, no current) скалярний магнітний потенціал розраховується в усій розрахунковій області. Наявність кабелів та їхнє розташування враховується в рівнянні (1) складової магнітного поля \mathbf{H}_{ext} за виразами (2), (3). Більш детально модель та її особливості представлено у роботі [14].

Комп'ютерні розрахунки виконувалися для визначеності в момент часу $t = 0$. Розрахунковим шляхом було встановлено, що розподіл поля в безпосередній близькості від провідників залежить від моменту часу, однак у роботі досліджується тільки поле вдалині від провідників (на поверхні ґрунту), і його величина практично не залежить від вибору розрахункового часу t . Можливий також альтернативний варіант розрахунку поля для комплексних значень магнітного потенціалу \dot{V}_m і представлення при цьому виразів (2), (3) у комплексному вигляді. Проте для такого розрахунку потрібен комп'ютер з великою оперативною пам'яттю. Ця обставина є особливо важливою під час розрахунку тривимірної області з дрібною сіткою в області магнітного екрана.

Граничними умовами задачі (1) на всіх зовнішніх границях розрахункової області була умова магнітної ізоляції – $\mathbf{n} \cdot \mathbf{V} = 0$ (\mathbf{n} – вектор зовнішньої нормалі до відповідної граничної поверхні). Вектори напруженості поля \mathbf{H} і магнітної індукції \mathbf{B} зв'язані формулою $\mathbf{B} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H}$ (для немагнітних елементів розрахункової області $\mu_r = 1$).

Розв'язання сформульованої задачі проводилося чисельним методом кінцевих елементів, реалізованим у програмі Comsol [15].

У роботі проведено перевірку вірогідності моделі на основі комп'ютерного моделювання магнітного поля відносно векторного магнітного потенціалу з компонентами $\mathbf{A} = (A_x, A_y, A_z)$. Така верифікація показала ідентичність результатів двох тривимірних моделей – на основі векторного та скалярного потенціалу. Зазначимо, що переваги використання скалярного потенціалу магнітного поля на відміну від векторного потенціалу з трьома складовими виявляються саме для тривимірних магнітних полів з великим обсягом розрахунків.

Описану вище тривимірну модель відносно скалярного магнітного потенціалу використано задля дослідження магнітного поля підземної трифазної кабельної лінії, в якій кабелі розташовані трикутником (послідовність фаз кабелів – ABC) і прокладені паралельно поверхні землі. Відзначимо також, що додатковий композиційний ґрунт має ефективну магнітну проникність, а його електропровідність не враховується (передбачається рівною нулю).

Результати комп'ютерного моделювання. Характеристики кабелів у розглянутій кабельній лінії на напругу 330 кВ наведено у [16]. Алюмінієві жили кабелів мають перетин 800 мм^2 . Номінальний струм лінії – 630 А.

Далі представлено результати розрахунку магнітного поля на поверхні землі безпосередньо над кабельною лінією для двох варіантів: 1) засипний ґрунт на ділянці довжиною $2l$ (l – половина довжини екрана) має магнітні властивості; 2) насипний ґрунт на такій ділянці має магнітні властивості. В обох випадках магнітні властивості визначаються ефективною магнітною проникністю μ_{eff} .

Під час розрахунку поля варіюються поперечні та поздовжні розміри магнітного середовища, заповненого ґрунтом, а також значення його проникності μ_{eff} . Аналіз розрахункових результатів спрямовано на виявлення впливу розмірів і властивостей такого магнітного екрана на ефективність екранування магнітного поля, обумовлену ступенем зменшення магнітного поля на поверхні землі безпосередньо над кабельною лінією.

1. *Кабельна лінія із засипним ґрунтом, що має магнітні властивості.* Розрахункову модель підземної кабельної лінії із засипним ґрунтом та її основні розміри показано на рис. 1, а. Картина на рис. 1, б відображає в кольорі розподіл магнітної індукції $|\mathbf{B}|$ на поверхні землі безпосередньо над лінією за напівдовжини засипання $l=4$ м, ширини $a=1$ м, висоти $h=0,7$ м і магнітній проникності засипного ґрунту $\mu_{eff}=100$. Показано, що магнітна індукція на поверхні землі над засипкою з магнітними властивостями зменшується в кілька разів. Кількісне змінення цього поля за поздовжньою координа-

тою z для різних значень $\mu_{eff} = 1-1000$ показано на рис. 2, де пряма лінія на рівні 4,3 мкТл відповідає максимальному значенню поля безпосередньо над центром кабелів уздовж осі Oz і рівню магнітного поля на такій центральній лінії без врахування НМГ. Значення 4,3 мкТл не є найбільшим значенням на всій поверхні землі для обраних струмів у кабелях, а максимальне значення 4,8 мкТл реалізується на рівні землі в області, трохи зміщеної від центральної прямої уздовж координати z .

Дані рис. 2 показують наступне: 1) застосування магнітного екрана у вигляді засипного ґрунту дає змогу знизити магнітне поле на поверхні землі до 1,2 мкТл за $\mu_{eff} = 100$; 2) довжина крайової зони, де магнітне поле зростає від мінімального значення до значення поля без екранів, становить приблизно $b = 2$ м (крайова зона показана на рис. 2 затіненням). Довжина цієї зони залежить від глибини розташування кабелів у землі (у розрахунках приймалася фіксована глибина $H = 1,5$ м). Як показують розрахунки, довжина крайової зони $b \cong H$. На рис. 2 також відображено в кількісному відношенні збільшення ефективності екранування із зростанням μ_{eff} ЗМГ.

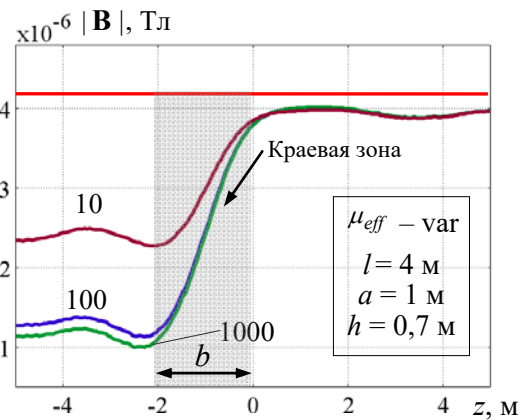


Рис. 2

Вплив довжини зони з магнітним засипним ґрунтом ($l - var$) на ефективність екранування ілюструється на рис. 3. На графіку проведено штрих-пунктирну лінію $\mu_{eff} = 1$, що відповідає магнітному полю в області за відсутності магнітної засипки. Як видно, у зазначеному діапазоні змінення $l = 0-8$ м зі збільшенням довжини засипки рівень поля на поверхні землі над ЗМГ зменшується зі значення 4,8 мкТл до $\sim 1,0$ мкТл.

Як видно з рис. 2 і 3, змінення поля за позовжньою координатою z не досягає значення 4,8 мкТл, що відповідає відсутності магнітного екрана. Особливо це проявляється за довжини ЗМГ від 4 м і трохи вище. Проте для невеликої довжини $l = 0,25-1$ м спостерігається наближення кривих до 4,8 мкТл за межами засипного ґрунту (рис. 3). Це дає змогу стверджувати, що саме обмежений розмір розрахункової області за позовжньою координатою призводить до трохи заниженого значення поля на його границі.

Зазначимо також, що дані рис. 2 та 3 показують зменшення значення поля в зоні перед краєм екрана для деяких випадків – $l = 4-8$ м. Такий ефект відсутній за довжині екрана $l = 0,2-1$ м, коли різко зростає вплив поля струмів на ділянці з обох боків від коротких екранів і у меншому ступені проявляється крайовий ефект.

Характер змінення магнітної індукції в центральній точці l на поверхні землі (див. рис. 1, б) залежно від позовжнього розміру області із засипкою l , відображено на рис. 4. Як видно, ефективне магнітне екранування поля в обраній локальній точці відбувається вже за позовжнього розміру ЗМГ $2l \approx 2$ м. У разі подальшого збільшення розміру $2l$ ефективність екранування поля підвищується незначно, хоча при цьому значно зростають витрати магнітного матеріалу.

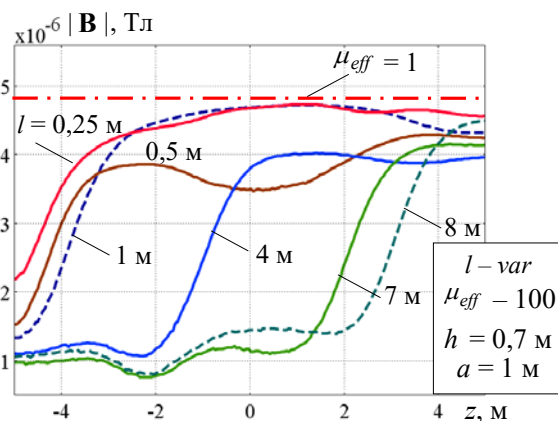


Рис. 3

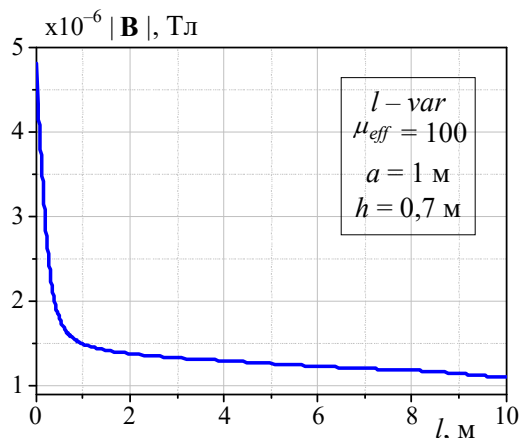


Рис. 4

Цей результат є основою практичної рекомендації – за необхідності зменшення магнітного поля кабельної лінії в деякій локальній області на поверхні землі безпосередньо над кабелями засипний ґрунт повинен мати магнітні властивості на ділянці довжиною приблизно 2 м або довжиною, рівною $\sim H$ – глибині прокладання кабелів.

Вплив поперечних геометричних розмірів h та a ЗМГ на ефективність зниження магнітного поля на поверхні землі показано на рис. 5, a та $б$, відповідно. Наведене сімейство кривих свідчить, що у разі змінення висоти засипного ґрунту в зазначених межах 0,5–1,2 м, поле на поверхні землі змінюється не так значно, як у разі варіювання ширини ЗМГ. В останньому випадку можливе зниження поля над ЗМГ більш ніж у 2 рази за розширення області додаткового засипання від 0,25 до 2 м.

2. *Кабельна лінія з насипним ґрунтом з магнітними властивостями.* У проведених розрахунках передбачалося, що НМГ розташований над кабелями на висоті 10 см. Результати розрахунків магнітного поля для різних розмірів області з НМГ за різних значеннях його магнітної проникності μ_{eff} показано на рис. 6–9.

Змінення магнітного поля $|\mathbf{B}|$ за координатою z на поверхні землі над кабельною лінією з НМГ, що характеризується $\mu_{eff}=10\div 1000$, наведено на рис. 6. З порівняння значень поля на поверхні землі, показаних на рис. 2 та 6, видно, що такий тип магнітного екрана характеризується більше низькою ефективністю, ніж використання ЗМГ. Крім того, у разі використання НМГ має місце крайовий ефект, що проявляється в немонотонному змінненні поля в кінцевій зоні. Ефективність екранування практично однакова за $\mu_{eff}=100$ і 1000, що дає змогу рекомендувати для практичного використання ґрунт з магнітними властивостями в межах $\mu_{eff}=50\text{--}100$.

Характер змінення напруженості магнітного поля $|\mathbf{B}|$ на поверхні землі над кабелями вздовж координати z за різної довжини НМГ $l=2, 4, 8$ м показано на рис. 7. Як видно, поле через прояв крайового ефекту є немонотонним, причому "коливальний" характер змінення магнітного поля особливо

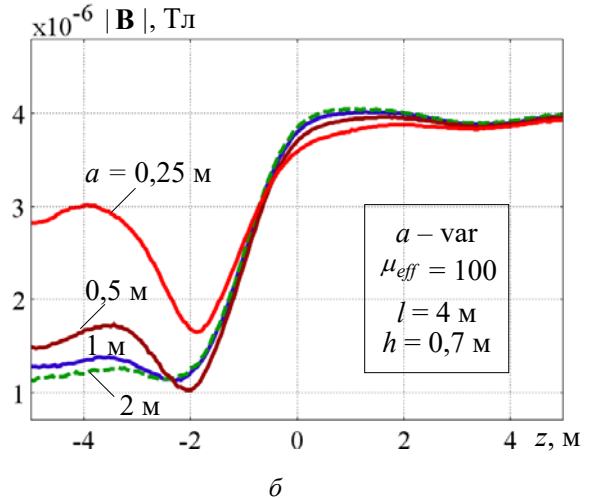
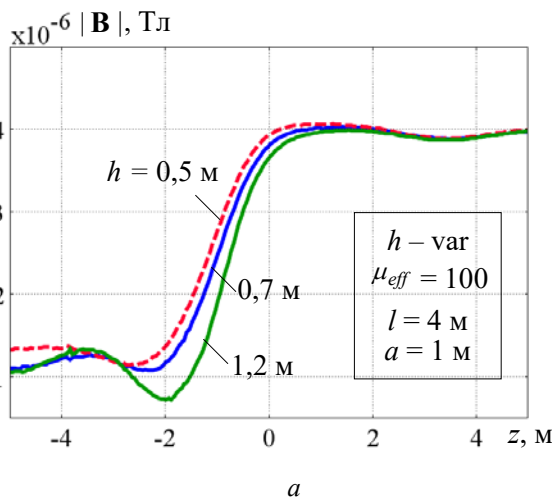


Рис. 5

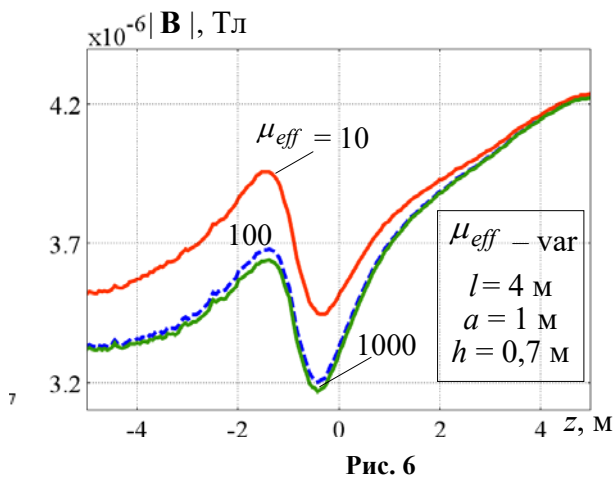


Рис. 6

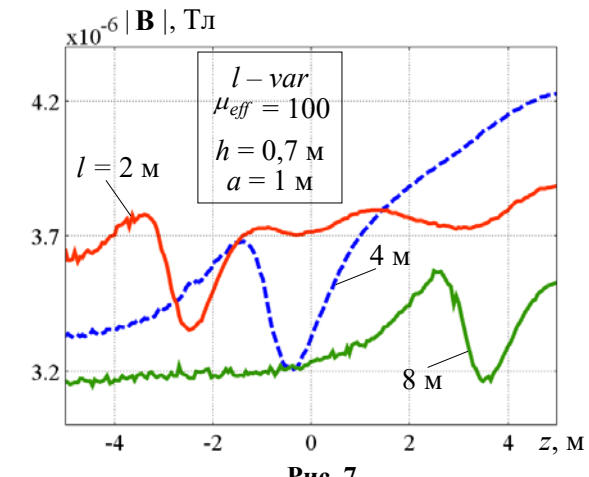


Рис. 7

проявляється у разі невеликої довжині НМГ l .

На рис. 8 показано змінення на поверхні землі над кабельною лінією магнітного поля за напрямком поздовжньої координати z за різних значень висоти шару НМГ h . Дані рис. 8 показують, що у випадку більш тонкого шару НМГ ($h = 0,1$ м) здійснюється більш ефективне екранування, що дає змогу знизити поле над насипкою в $4,8/2,5=1,9$ разів. За великої висоти НМГ $h=1$ м поле в крайових зонах досягає більших значень, що свідчить про неефективність магнітного екрана із зазначеними параметрами. Для пояснення цього відзначимо, що магнітне поле на поверхні землі в області розташування НМГ формується під дією струмів на ділянці лінії, розташованій безпосередньо під екраном (позначимо це поле як $B_1(x, y, z)$), і від струмів на двох прилягаючих ділянках, розташованих з обох сторін від екрана (поле $B_2(x, y, z)$) – прояв тривимірного характеру поля. Наявність екрана призводить до зниження поля $B_1(x, y, z)$ на поверхні землі безпосередньо над екраном поля і до збільшення поля $B_2(x, y, z)$. Саме зі збільшенням поля B_2 пов'язане значне поле за великої висоти магнітного матеріалу h , що наближається до поверхні ґрунту. Детальне пояснення високої ефективності екранування магнітного поля трифазної кабельної лінії за допомогою незначної висоти НМГ представлено у роботі [14].

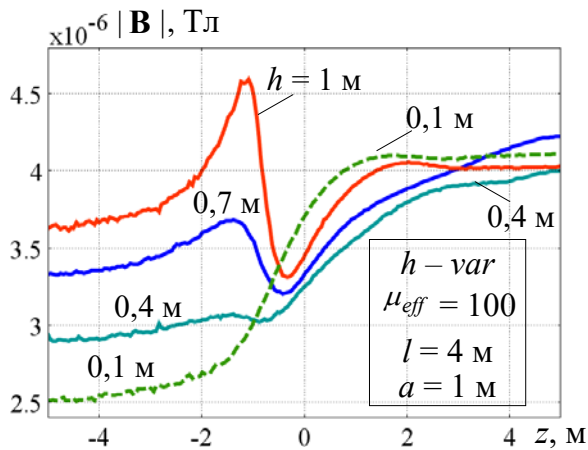


Рис. 8

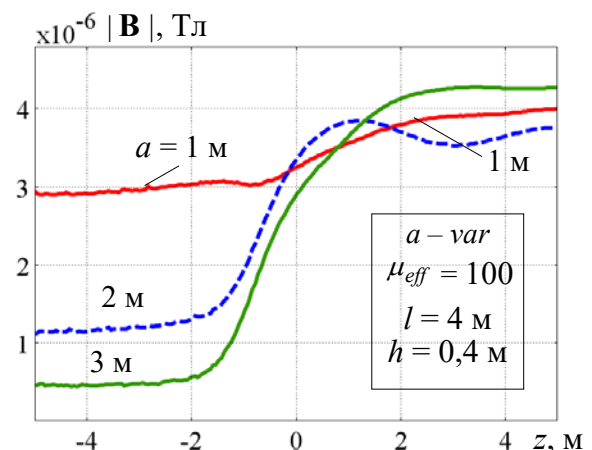


Рис. 9

Рис. 9 ілюструє магнітне поле $|B|$ на поверхні землі над кабельною лінією у разі змінення ширини a НМГ. Видно, що ширина області НМГ істотно впливає на ефективність екранування. Для розглянутого випадку поле зменшується приблизно в 5 разів у разі збільшення a від 1 до 3 м.

Висновки. У роботі виконано чисельний розрахунок тривимірного магнітного поля підземної кабельної лінії з магнітними екранами кінцевої довжини, що використовуються задля зменшення рівня поля на поверхні землі. Екранами є насипний і засипний ґрунт, що містить магнітні частки і внаслідок цього має ефективні магнітні властивості ($\mu_{\text{eff}} = 1 \div 1000$). Досліджено ефективність використання такого типу екранів для кабельної лінії напругою 330 кВ залежно від геометричних розмірів та ефективної магнітної проникності μ_{eff} екранів.

Показано, що застосування засипного ґрунту з магнітними властивостями дає змогу отримати п'ятикратне зниження магнітного поля на поверхні землі. Такий тип екрана є більш ефективним, ніж екран у вигляді насипного ґрунту з магнітними властивостями. Обґрунтовано висновок про те, що для ефективного зниження магнітного поля на поверхні землі в локальній області довжина магнітного екрана повинна становити не менш глибини прокладання кабелів (рис. 4).

Комп'ютерні розрахунки свідчать про немонотонний характер змінення магнітного поля на поверхні землі над крайовими зонами магнітного екрана, що обумовлено струмами, які протікають у віддаленості від екрана, і характерно для тривимірного магнітного поля. Поздовжній розмір крайових зон складає порядку глибини прокладання кабелів.

Роботу виконано частково за держбюджетною темою "Розвинути теорію імпульсних і високочастотних перехідних електромагнітних процесів в енергетичних і технологічних резонансних установках та високовольтних кабельних лініях електропередачі" (Шифр "ЕЛКАБ") та частково за темою "Розроблення засобів створення інтелектуальних екологічно безпечних силових кабелів для традиційної та відновлюваної електроенергетики" Цільової комплексної програми наукових досліджень НАН України "Інтелектуальна екологічно безпечна енергетика з традиційними та відновлюваними джерелами енергії" ("Нова енергетика", 2019–2021 рр), КПКВК 6541030.

1. Шидловский А.К., Щерба А.А., Золотарев В.М., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Кабели с полимерной изоляцией. К.: Ин-т электродинамики НАН Украины, 2013. 550 с.
2. Грешняков Г.В., Доронин Н.В., Коровкин Н.В. Комбинированные магнитные экраны для силовых кабельных линий. *Кабели и провода*. 2015. № 5. С. 8–13.
3. Кучерявая И.Н. Экранирование подземной кабельной линии сверхвысокого напряжения с помощью плоского ферромагнитного экрана. *Технічна електродинаміка*. 2019. № 6. С. 13–17. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.06.013>
4. Machado V.M. Magnetic field mitigation shielding of underground power cables. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2012. Vol. 48. No 2. Pp. 707–710.
5. Щерба А.А., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Магнитное поле подземной кабельной линии 330 кВ и способы его уменьшения. *Техн. електродинаміка*. 2019. № 5. С. 3–9. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.05.003>
6. Шевель Д.М. Электромагнитная безопасность. К.: ВЕК+, К.: НТИ, 2002. 432 с.
7. Правила улаштування електроустановок. Київ: Мінпаливенерго України, 2010. 776 с.
8. D'Amore M., Menghi E., Sarto M.S. Shielding techniques of the low-frequency magnetic field from cable power lines. *IEEE Internat. Symposium on Electromagnetic Compatibility*. Istanbul, 18–22 Aug., 2003. Vol. 1. Pp. 203–208.
9. De Wulf M., Wouters P., Sergeant P., Dupré L., Hoferlin E., Jacobs S., Harlet P. Electromagnetic shielding of high-voltage cables. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2007. No 316. Pp. 908–911.
10. Zhou P., Fu W.N., Lin D., Stanton S., Cendes Z.J. Numerical modeling of magnetic devices. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2004. Vol. 40. Is. 4. Pp. 1803–1809. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2004.830511>
11. Biro O., Preis K., Vrisk G., Richter K.R., Ticar I. Computation of 3D magnetostatic fields using a reduced scalar potential. *IEEE Transactions on Magnetics*. 1993. Vol. 29. Is. 2. Pp. 1329–1332. DOI: <https://doi.org/10.1109/20.250643>
12. Петухов И.С., Акинин К.П. Замена обмотки электрической машины намагниченной средой при моделировании магнитного поля в области лобовых частей. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2016. Вип. 45. С. 108–112.
13. Розов В.Ю., Реуцкий С.Ю., Пелевин Д.Е., Яковенко В.М. Исследование магнитного поля высоковольтных линий электропередачи переменного тока. *Технічна електродинаміка*. 2012. № 1. С. 3–9.
14. Кучерява І.М. Особливості екранування магнітного поля підземної трифазної кабельної лінії за допомогою насипного композиційного ґрунту з магнітними властивостями. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2021. Вип. 58. С. 14–22. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2021.58.014>
15. Comsol Multiphysics. URL: <http://www.comsol.com/> (дата звернення 25.03.2021)
16. Лях В.В., Молчанов В.М., Судакова И.В., Павличенко В.П. Кабельная линия напряжением 330 кВ – новый этап развития электрических сетей Украины. *Електрические сети и системы*. 2009. № 3. С. 16–21.

THE REDUCTION OF MAGNETIC FIELD OF UNDERGROUND CABLE LINE IN ESSENTIAL AREAS BY MEANS OF FINITE-LENGTH COMPOSITE MAGNETIC SHIELDS

A.A. Shcherba, A.D. Podoltsev, I.M. Kucheriava
Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,
pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine.
E-mail: podol@ied.org.ua

In the article, the numerical calculation and analysis of three-dimensional magnetic field of underground power cable line with finite-length magnetic shields used to reduce the level of this field on the ground are carried out. Both fill-up soil and filling soil containing magnetic particles and then having effective magnetic properties ($\mu_{eff} = 1 \div 1000$) are proposed to used as magnetic shields. The shielding efficiency is studied for underground 330 kV cable line depending on the dimensions and effective magnetic permeability (μ_{eff}) of the shields. As shown, the use of filling soil with mag-

netic properties gives a possibility to reduce the field on the ground five times. This type of shielding is more efficient as compared to magnetic fill-up soil. The computed results reveal the non-monotonic variation of magnetic field on the ground above the soil edge zones. The longitudinal size of these zones is in the order of the depth of the cables. References 16, figures 9.

Keywords: underground cable line, three-dimensional magnetic field, magnetic shield, composite material with magnetic properties, magnetic field reduction, finite-element analysis.

1. Shidlovskii A.K., Shcherba A.A., Zolotarev V.M., Podoltsev A.D., Kucheriava I.M. Extra-high voltage cables with polymer insulation. Kyiv: Institute of Electrodynamics, Ukrainian Academy of Sciences. 2013. 550 p. (Rus)
2. Greshniakov G.V., Doronin M.V., Korovkin N.V. Combined magnetic shields for cable power lines. *Kabeli i provoda.* , 2015. No 5. Pp. 8–13. (Rus)
3. Kucheriava I.M. Shielding of underground extra-high voltage cable line by plane ferromagnetic shield. *Tekhnichna Elektrodynamika.* 2019. No 6. Pp. 13–17. (Rus) DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.06.013>
4. Machado V.M. Magnetic field mitigation shielding of underground power cables. *IEEE Transactions on Magnetics.* 2012. Vol. 48. No 2. Pp. 707–710.
5. Shcherba A.A., Podoltsev O.D., Kucheriava I.M. The magnetic field of underground 330 kV cable line and ways for its reduction. *Tekhnichna Elektrodynamika.* 2019. No 5. Pp. 3–9. (Rus) DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.05.003>
6. Shevel D.M. Electromagnetic safety. Kyiv: Vek+, Kyiv: NTI, 2002. 432 p. (Rus)
7. Electric installation code. Minpalivo Ukrainy, 2010. 776 p. (Ukr)
8. D’Amore M., Menghi E., Sarto M.S. Shielding techniques of the low-frequency magnetic field from cable power lines. *IEEE Internat. Symposium on Electromagnetic Compatibility.* Istanbul, 18–22 Aug., 2003. Vol. 1. Pp. 203–208.
9. De Wulf M., Wouters P., Sergeant P., Dupré L., Hoferlin E., Jacobs S., Harlet P. Electromagnetic shielding of high-voltage cables. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials.* 2007. No 316. Pp. 908–911.
10. Zhou P., Fu W.N., Lin D., Stanton S., Cendes Z.J. Numerical modeling of magnetic devices. *IEEE Transactions on Magnetics.* July 2004. Vol. 40. Is. 4. Pp. 1803–1809. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2004.830511>
11. Biro O., Preis K., Vrisk G., Richter K.R., Tigar I. Computation of 3D magnetostatic fields using a reduced scalar potential. *IEEE Transactions on Magnetics.* 1993. Vol. 29. Is. 2. Pp. 1329–1332. DOI: <https://doi.org/10.1109/20.250643>
12. Petukhov I.S., Akinin K.P. Replacing of the electrical machine winding with magnetized medium at modeling of magnetic field in overhang parts. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiki NAN Ukrainy.* 2016. Is. 45. Pp. 108–112.
13. Rozov V.Yu., Reutskiy S.Yu., Pelevin D.E., Yakovenko V.N. Investigation of magnetic field of high-voltage AC transmission lines. *Tekhnichna Elektrodynamika.* 2012. No 1. Pp. 3–9. (Rus)
14. Kucheriava I.M. Particularities of magnetic field shielding for underground cable line by composite fill-up soil with magnetic properties. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiki NAN Ukrainy.* 2021. Is. 58. Pp. 14–22. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2021.58.014>
15. Comsol multiphysics modeling and simulation software. URL: <https://www.comsol.com/> (accessed at 25.03.2021).
16. Lyach V.V., Molchanov V.M., Sudakov I.V., Pavlichenko V.P. 330 kV cable line is a new step in development of Ukrainian power networks. *Elektricheskie seti i sistemy.* 2009. No 3. Pp. 16–21. (Rus)

Надійшла 29.03.2021
Остаточний варіант 24.05.21