

УДК 621.315.2:004.94

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2021.58.014>

ОСОБЛИВОСТІ ЕКРАНУВАННЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ПІДЗЕМНОЇ ТРИФАЗНОЇ КАБЕЛЬНОЇ ЛІНІЇ ЗА ДОПОМОГОЮ НАСИПНОГО КОМПОЗИЦІЙНОГО ҐРУНТУ З МАГНІТНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ

І.М. Кучерява, докт. техн. наук
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна
e-mail: rB.irinan@gmail.com

За допомогою дво- та тривимірної розрахункових моделей виконано комп'ютерне моделювання магнітного поля високовольтної (330 кВ) підземної кабельної лінії з використанням спеціального насипного ґрунту різних розмірів (об'єму). Додатковий ґрунт над кабелями є композиційним матеріалом з ефективними магнітними властивостями та виконує функцію магнітного екрана. Проведено порівняння результатів дво- і тривимірних комп'ютерних розрахунків. Досліджено ефективність екранування магнітного поля кабельної лінії залежно від значення магнітної проникності насипного ґрунту, його ширини та висоти. Виявлено існування оптимальної невеликої висоти насипки, необхідної для зменшення магнітного поля кабелів на поверхні землі безпосередньо над ними, та істотний вплив ширини насипного ґрунту на ефективність екранування. Обґрунтовано ефективність екранування підземних одноланцюгових трифазних кабельних ліній з використанням магнітного насипного ґрунту незначної висоти. Бібл. 14, рис. 7.

Ключові слова: підземна трифазна кабельна лінія, насипний ґрунт, композиційний матеріал, екранування магнітного поля, дво- та тривимірне комп'ютерне моделювання.

Вступ. Важливою складовою функціонування великих міст, відповідальних енергетичних об'єктів і промислових підприємств є їхнє надійне та безпечне електропостачання, що в сучасних умовах реалізується за допомогою високовольтних і надвисоковольтних кабельних ліній на основі кабелів із поліетиленовою ізоляцією [1]. Один із найбільш поширених і надійних способів побудови кабельних ліній – це прокладання кабелів під землею з розташуванням їх у траншеї або безпосередньо в ґрунті [2, 3].

На відміну від кабелів, прокладених у повітрі, підземні силові кабелі гарантують економічність, більшу стійкість і довговічність роботи завдяки захисту від погодних умов, атмосферних перенапруг, електромагнітних впливів (наприклад, від мереж електричних залізниць), а також різних видів механічних пошкоджень. Водночас кабелі для передачі електроенергії різного способу прокладання створюють навколо себе магнітне поле високого рівня [4], що призводить до негативного впливу найперше на людей, особливо в разі наближеності кабелів до житлових масивів, а також на чутливе електричне обладнання та електротехнічні комунікації, які розташовуються поблизу та на перетині із силовими кабельними лініями.

Під час прокладання силових кабелів однією з основних вимог є забезпечення екологічної безпеки кабельних ліній відповідно до чинних нормативних рівнів електромагнітного впливу на навколишнє середовище [5]. Тому необхідні допоміжні засоби зниження магнітного поля кабельних ліній, насамперед застосування зовнішніх екранів.

Крім традиційних магнітних і немагнітних провідних екранів [6, 7, 8], що дають змогу керувати магнітним полем кабельних ліній, поширеним методом зниження магнітного і температурного полів навколо кабелів є використання спеціальних "коректувальних" засипних (безпосередньо навколо кабелів) і насипних (поверх кабельних ліній) ґрунтів [9, 10, 11]. Можливе додавання спеціально підібраних ґрунтів із поліпшеними тепловими властивостями для запобігання перегріву кабелів, а також композиційних ґрунтів, що мають ефективні магнітні властивості, наприклад, завдяки вмісту магнітних часток (наприклад, дрібнодисперсних або високодисперсних магнітних часток із розміром нижче 1 мкм), і сприяють зниженню магнітного поля кабелів, яке створюється поблизу і на поверхні землі над кабелями.

Забезпечення магнітних властивостей засипного ґрунту, що охоплює дволанкову кабельну лінію, та насипного ґрунту поверх перекриття траншеї з такою лінією запропоновано та досліджено в роботі [9]. Ґрунти з ефективними магнітними властивостями, що розташовуються навколо і неподалік від силових кабелів, можуть виконувати функції своєрідних магнітних екранів [9].

До того ж насипні і засипні ґрунти можуть поєднувати роль магнітних екранів і середовища з поліпшеними тепловими властивостями (ґрунтів з певною теплопровідністю) для одночасного зменшення магнітного поля кабелів і забезпечення їхнього припустимого температурного режиму.

Вивчення різних способів екранування магнітного поля високовольтних кабельних ліній проводиться на основі комп'ютерного моделювання [6–9]. Здебільшого використовується двовимірне чисельне моделювання в припущенні, що кабелі і зовнішні екрани, призначені для зниження магнітного поля кабелів, достатньо довгі, а умови їх прокладання вздовж кабельної траси незмінні [6, 9]. Для неоднорідних умов за довжиною кабелів необхідно виконувати тривимірне комп'ютерне моделювання. Так, у статті [12] розроблено тривимірну модель розрахунку магнітного поля підземної кабельної лінії з магнітним екраном обмеженої довжини у вигляді композиційного матеріалу з магнітними властивостями, який являє собою ґрунт навколо або поблизу кабельної лінії.

Метою цієї роботи є виявлення й дослідження особливостей змінення магнітного поля на поверхні землі, що створюється надвисоковольтною підземною кабельною лінією, та шляхів підвищення ефективності екранування кабелів у разі використання насипного ґрунту з магнітними властивостями і різними геометричними параметрами.

Для досягнення мети в роботі проводиться дво- та тривимірне комп'ютерне моделювання методом скінченних елементів у стандартному пакеті програм Comsol [13]. Досліджується магнітне поле трифазної кабельної лінії напругою 330 кВ [11]. Лінія прокладена в ґрунті безтраншейно на глибині 1,5 м паралельно поверхні землі, має додатково насипний композиційний ґрунт з різними геометричними параметрами – l , h і магнітною проникністю μ_{eff} (рис. 1). Послідовність фаз кабелів – ABC (зліва направо). Струм в номінальному режимі $I_{ном} = 630$ А [11]. Треба також зазначити, що моделювання в обох випадках виконується за умови, що композиційний ґрунт має ефективну магнітну проникність, а його електропровідність не враховується (задається рівною нулю).

Двовимірне комп'ютерне моделювання. Електромагнітна задача формулюється для усталеного режиму в декартовій системі координат Oxy (рис. 1) за умови, що прокладання кабельної лінії однаково по всій довжині. (буде однаковим уздовж всієї кабельної лінії).

Задача розв'язується відносно невідомого комплексного векторного магнітного потенціалу з єдиною ненульовою z -складовою $\dot{\mathbf{A}} = (0, 0, \dot{A}_z)$.

Математична модель базується на підходах і рівняннях, наведених у [5], і детально описана в роботах [8, 9].

Модель складається з системи інтегродиференціальних рівнянь загального вигляду:

$$j\omega\sigma_i \dot{\mathbf{A}} + \nabla \times (\mu_0^{-1} \mu_r^{-1} \nabla \times \dot{\mathbf{A}}) = \sigma_i \Delta \dot{U}_i, \quad (1)$$

$$\int_{S_i} \dot{J}_z dS = \int_{S_i} (-j\omega\sigma_i \dot{A}_z + \sigma_i \Delta \dot{U}_i) dS = \dot{I}_i, \quad (2)$$

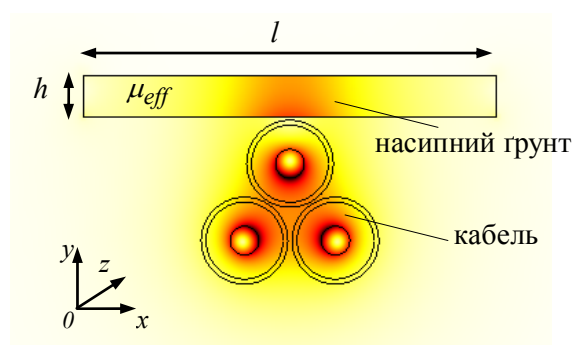


Рис. 1

де $\omega = 2\pi f$ – кутова частота струму ($f = 50$ Гц); j – уявна одиниця; індекс i відноситься до i -го провідного середовища в розрахунковій області; σ_i – електропровідність i -го середовища (жил, екранів кабелів у кабельній лінії); μ_0 і $\mu_r = \mu_{eff}$ – магнітна постійна і відносна магнітна проникність магнітного екрана у вигляді насипного композиційного ґрунту відповідно; $\mu_r = 1$ для немагнітних елементів розрахункової області; \dot{J}_z – z -складова густини струму.

Рівняння (1)–(2) містять комплексні напругу і струм, зокрема рівняння (2) записано для ділянки кола зі струмом \dot{I}_i , падінням напруги $\Delta\dot{U}_i$, площею поперечного перерізу S_i . Комплексна величина \dot{I}_i є струмом у жилі i -го кабелю. У кабельних жилах задаються струми, зміщені за фазою на 120° і однакові за амплітудою, що дорівнює номінальному значенню $I_{ном}$. Струм \dot{I}_i у металевих екранах кабелів дорівнює нулю. В області металевих екранів задається $\Delta\dot{U}_i = 0$ (тобто реалізується випадок замкнених з обох сторін на землю внутрішніх екранів кабелів). Падіння напруги на жилах однакові та зміщені за фазою, їхні значення обчислюються як: $\Delta\dot{U}_i = \Delta\dot{U}_{жс} e^{j0}$, $\Delta\dot{U}_i = \Delta\dot{U}_{жс} e^{j2\pi/3}$, $\Delta\dot{U}_i = \Delta\dot{U}_{жс} e^{j4\pi/3}$ – відповідно у фазах A, B, C . Водночас $\Delta\dot{U}_{жс}$ задається за умови рівності струмів у жилах струму в номінальному режимі. Як показали розрахунки, у такому разі різниця діючих значень струмів у жилах не перевищує 5%.

Рівняння (1)–(2) доповнюються умовою магнітної ізоляції на всіх зовнішніх границях розрахункової області:

$$\dot{A}_z = 0. \quad (3)$$

Вектор магнітної індукції дорівнює $\dot{\mathbf{B}} = \text{rot}(\dot{\mathbf{A}})$, його складові визначаються як $\dot{B}_x = \partial\dot{A}_z / \partial y$; $\dot{B}_y = -\partial\dot{A}_z / \partial x$. Досліджуються значення і розподіл величини $|\dot{\mathbf{B}}| = \sqrt{|\dot{B}_x|^2 + |\dot{B}_y|^2}$ і зокрема на поверхні землі безпосередньо над кабельною лінією.

На рис. 2 показано змінення магнітної індукції $|\dot{\mathbf{B}}|$ на поверхні землі залежно від ширини l і висоти h насипного ґрунту (розміри дано на рис. 1) за значень магнітної проникності ґрунту $\mu_{eff} = 10$ (рис. 2, а) і $\mu_{eff} = 100$ (рис. 2, б). Пунктирна лінія, відмічена $\mu_{eff} = 1$, відповідає випадку навколишнього ґрунту без магнітних властивостей.

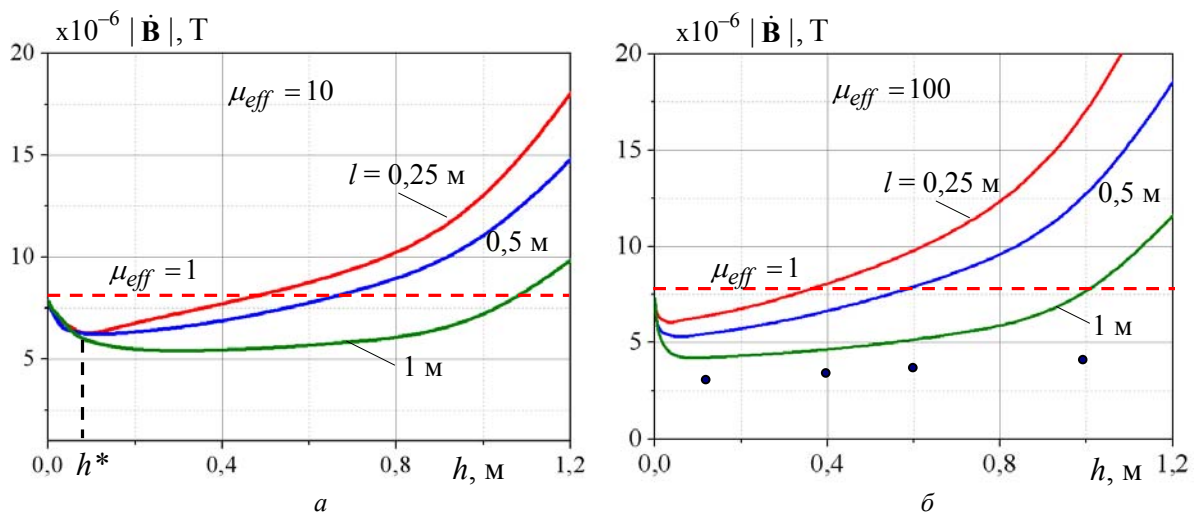


Рис. 2

Графічні дані для розглянутого випадку показують таке:

– найбільша ефективність екранування насипного композиційного ґрунту характерна для певної висоти h – не вище $\sim 0,5$ м; під більшою ефективністю екранування мається на увазі (слід розуміти) можливість отримання менших значень магнітного поля на поверхні землі порівняно з випадком відсутності додаткового магнітного ґрунту – значень нижче лінії $\mu_{eff} = 1$ на рис. 2;

– використання великого об'єму насипного ґрунту у вигляді композиційного магнітного матеріалу ($h > 0,4 \dots 0,5$ м) не є ефективним, у такому разі магнітне поле в оточуючому середовищі і на поверхні землі посилюється;

– для забезпечення більшої ефективності екранування поля за меншої ширини насипки l потрібна менша висота h ;

– є оптимальне значення висоти $h^* \approx 0,05 \dots 0,1$ м, у разі якого реалізується найбільше зниження магнітного поля на поверхні ґрунту;

– чим більша ширина додаткової насипки з магнітними властивостями, тим більший діапазон змінення її висоти можливий для зниження поля (у випадку, коли $l = 1$ м, таке значення h доходить до ~ 1 м);

– залежності на рис. 2 для $\mu_{eff} = 10$ і 100 подібні; із зростанням магнітної проникності μ_{eff} композиційного ґрунту знижуються значення магнітної індукції $|\mathbf{B}|$ на поверхні землі.

Тривимірне комп'ютерне моделювання проведено на основі моделі, розробленої і верифікованої в роботі [12]. Тестування математичної моделі в [12] виконано за допомогою порівняння чисельних результатів з даними, отриманими за аналітичним виразом. Крім того, у роботі проведена додаткова перевірка достовірності 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 тотожність результатів двох тривимірних моделей – на основі векторного і 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.

Представлена далі тривимірний модель відносно скалярного магнітного потенціалу передбачає дослідження магнітного поля підземної трифазної кабельної лінії, в якій кабелі розташовані трикутником і прокладені паралельно поверхні землі (рис. 3).

Електромагнітна задача ставиться в тривимірній постановці відносно скалярного потенціалу V_m , як функції трьох просторових координат x, y, z і часу t , на основі рівняння:

$$-\nabla \cdot (\mu_0 \mu_r (\nabla V_m - \mathbf{H}_{ext})) = 0, \quad (4)$$

де $\mathbf{H}_{ext}(x, y, t)$ – напруженість магнітного поля, що створюється нескінченно довгою кабельною лінією, коли немає магнітних екранів. Поле \mathbf{H}_{ext} має лише дві ненульові складові, що визначаються за такими виразами [14]:

$$H_{ext,x}(x, y, t) = -\frac{I_{max}}{2\pi} \left[\frac{\cos(\omega t)(y - y_1)}{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2} + \frac{\cos(\omega t + 2\pi/3)(y - y_2)}{(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2} + \frac{\cos(\omega t + 4\pi/3)(y - y_3)}{(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2} \right], \quad (5)$$

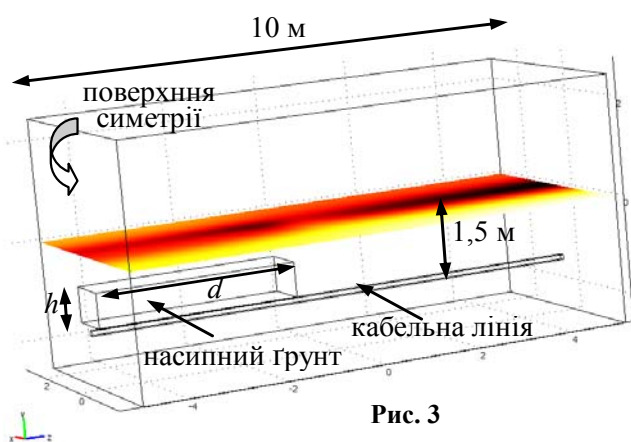


Рис. 3

$$H_{ext,y}(x,y,t) = \frac{I_{max}}{2\pi} \left[\frac{\cos(\omega t)(x-x_1)}{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2} + \frac{\cos(\omega t + 2\pi/3)(x-x_2)}{(x-x_2)^2 + (y-y_2)^2} + \frac{\cos(\omega t + 4\pi/3)(x-x_3)}{(x-x_3)^2 + (y-y_3)^2} \right]. \quad (6),$$

У (5)–(6): I_{max} – амплітуда струму в жилах кабелів; x_n, y_n – координати жили n -го кабелю ($n = 1 \dots 3$).

Напруженість магнітного поля представляється як сума двох складових: $\mathbf{H} = -\nabla V_m + \mathbf{H}_{ext}$. Складова, що характеризується скалярним магнітним потенціалом V_m , створюється магнітними зарядами в магнітному екрані (насіпному композиційному ґрунті). За використаною Comsol моделлю (Magnetic field, no current) скалярний магнітний потенціал розраховується в усій області. Кабелі в кабельній лінії замінюються областями без джерела поля. У складовій \mathbf{H}_{ext} враховується поле від струмів у кабелях і визначається їх розташування (координати) на основі виразів (5), (6).

На доповнення до рівняння (4) з виразами (5), (6) на всіх зовнішніх границях розрахункової області задається умова магнітної ізоляції:

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{B} = 0, \quad (7)$$

а на внутрішніх границях (границях підобластей) умова безперервності:

$$\mathbf{n} \cdot (\mathbf{B}_1 - \mathbf{B}_2) = 0, \quad (8)$$

де \mathbf{n} – вектор зовнішньої нормалі до відповідної граничної поверхні, а вектори магнітної індукції \mathbf{B} і напруженості поля \mathbf{H} зв'язані формулою $\mathbf{B} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H}$ (для немагнітних елементів в області розрахунку задається $\mu_r = 1$).

Тривимірна фізична модель кабельної лінії показана на рис. 3. Вона характеризується симетрією щодо вертикальної поверхні – розрахунок магнітного поля проводиться в половині області, що вміщує кабельну лінію і насипний ґрунт з розміром d за координатою z , під час варіювання висоти ґрунту h і його ширини l (рис. 4, 5). Як і в двовимірній моделі, ґрунт є композиційним магнітним середовищем з магнітною проникністю $\mu_{eff} = 100$.

На рис. 3 в площині, що відповідає поверхні землі, кольором показано характерний розподіл магнітного поля $|\mathbf{B}|$ вздовж координати z . Як видно, поле посилюється в зоні, що розташована над кабелями і віддалена від насипного ґрунту.

Рис. 4 ілюструє розподіл магнітного поля $|\mathbf{B}|$ на поверхні землі (в кольоровому зображенні) над кабельною лінією з насипним ґрунтом: $d = 4$ м, $h = 0,4$ м, $l = 1$ м (рис. 4, а) та змінення для зазначених даних магнітного поля вздовж поверхні землі (координати z) безпосередньо над кабелями за різних значень $h = 0,1 \dots 1$ м (рис. 4, б). Як свідчать розрахункові дані, у разі тонкого шару магнітного насипного ґрунту ($h = 0,1$ м) здійснюється більш ефективно екранування, що дає змогу зменшити поле над насипкою у 4,2/2,5~1,6 разів (з урахуванням максимального значення магнітної індукції за межами насипки).

З метою порівняння даних з результатами, отриманими шляхом двовимірного моделювання, значення магнітного поля в центрі насипного ґрунту для ширини насипки 1 м, розраховані за тривимірною моделлю, показані точками на рис. 2, б, які досить близькі до кривої, відміченої $l = 1$ м. Зазначимо, що дво- та тривимірні програмні моделі мають різні розміри розрахункової області та її підобластей, використані під час варіювання геометричних параметрів у різних діапазонах, що дещо ускладнює порівняльний аналіз результатів, проте моделі представляються в роботі з огляду на аналогічні залежності рівня магнітного поля від висоти насипного ґрунту з магнітними властивостями і водночас з метою більш детального представлення виявлених комп'ютерним шляхом закономірностей щодо зменшення магнітного поля над підземними кабелями з додатковим насипним композиційним ґрунтом.

Зазначимо також, що нерівності кривих на рис. 4, б і далі на рис. 5 б зумовлені недостатньо дрібним скінченно-елементним покриттям розрахункової області під час

тривимірному моделюванні та представляють собою оригінальні дані, що генеруються автоматично програмним способом.

Розподіл магнітного поля $|\dot{\mathbf{B}}|$ на поверхні землі над кабелями відображено на рис. 5, а коли $d = 4$ м, $h = 0,4$ м, $l = 3$ м. На рис. 5, б представлено змінення поля за різних значень l в інтервалі 1...3 м. Показано, що ширина області з насипним композиційним ґрунтом істотно впливає на ступінь зниження магнітного поля на поверхні землі. Для розглянутого випадку рівень поля зменшується приблизно у 5 разів у разі збільшення l від 1 до 3 м, а за ширини $l = 3$ м реалізуються навіть значення, що відповідають безпечному рівню магнітного поля 0,5 мкТ згідно з нормативними вимогами [5], чинними в Україні.

Особливості розподілу магнітного поля трифазної кабельної лінії з насипним композиційним ґрунтом. У разі використання насипного ґрунту з магнітними властивостями в матеріалі ґрунту утворюється магнітне поле. Змінення магнітного поля вздовж центральної лінії по висоті h насипки для різних значень $h = 0,05; 0,1; 1$ м, отримане за допомогою описаної вище двовимірної моделі, показано на рис. 6, а. Видно, що в усьому об'ємі насипного ґрунту генерується досить значне поле. За нижчої насипки у ній мають місце вищі значення $|\dot{\mathbf{B}}|$, максимум яких розташовується поблизу кабельної лінії. За межами насипки, все ближче до поверхні землі, поле спадає до менших значень у порівнянні з вищою насипкою. Найбільші значення поля у безпосередній близькості до поверхні землі реалізуються для випадку $h = 1$ м, вони справляють вплив на збільшення рівня поля у цій зоні і на самій поверхні землі. На доповнення до сказаного, на рис. 6, б, в представлено розподіл поля в активній зоні розрахункової області для двох різних рівнів висоти h із зазначенням максимальних значень $|\dot{\mathbf{B}}|$ в об'ємі насипного ґрунту.

На рис. 7 представлено картини векторного поля $\dot{\mathbf{B}}$ у вигляді ліній потоку навколо трифазної кабельної лінії і поблизу поверхні землі (відмічено червоною лінією) за різної

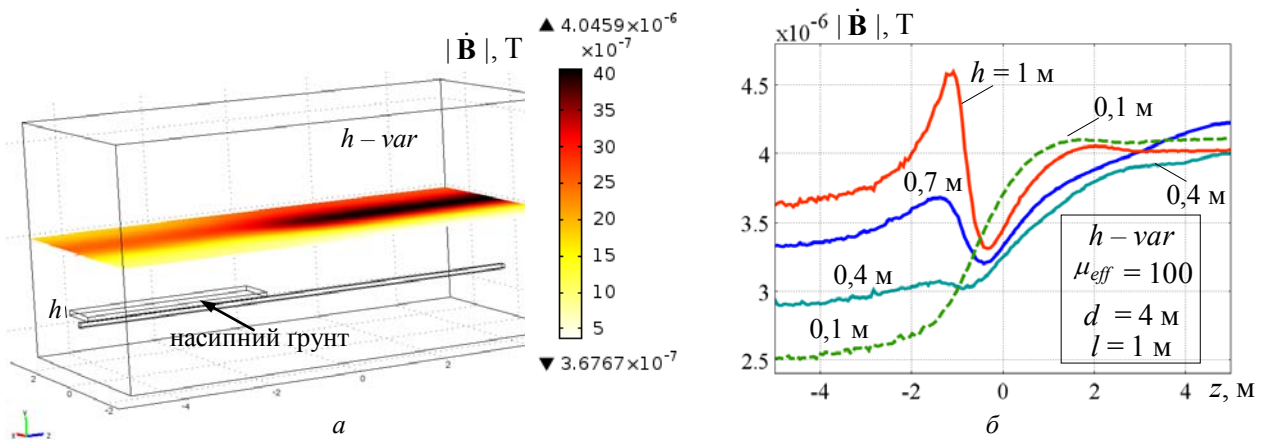


Рис. 4

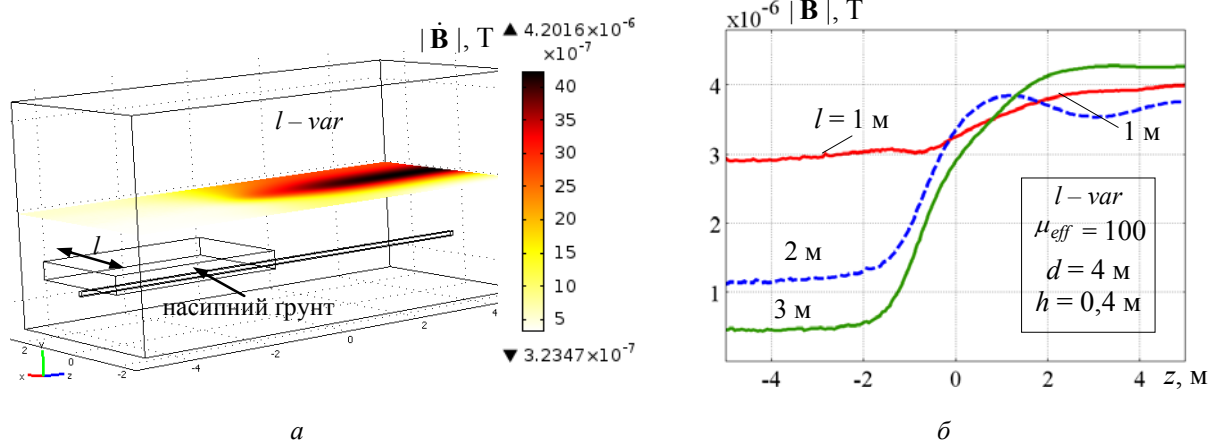


Рис. 5

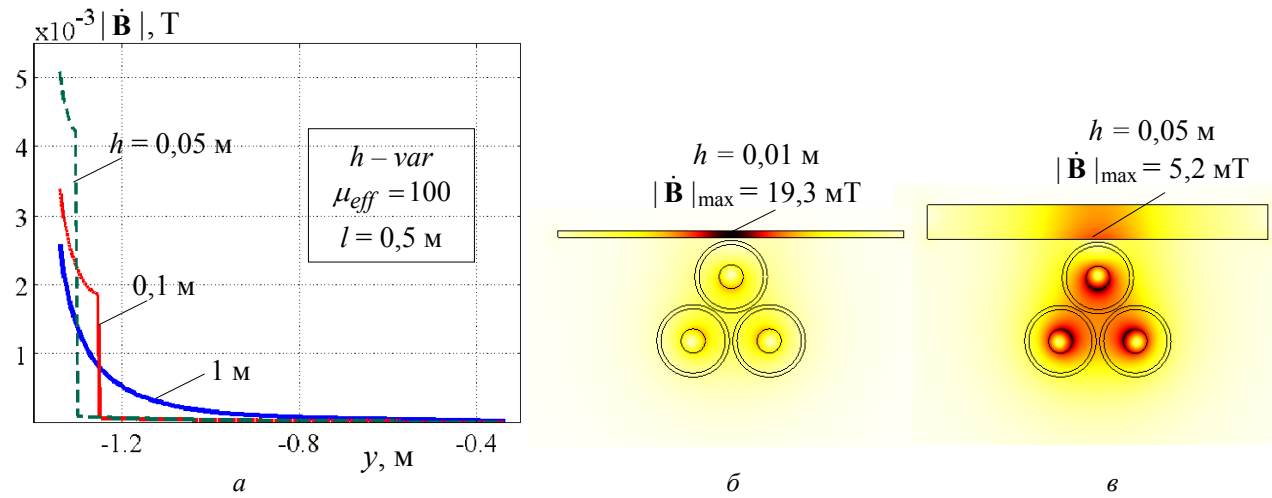


Рис. 6

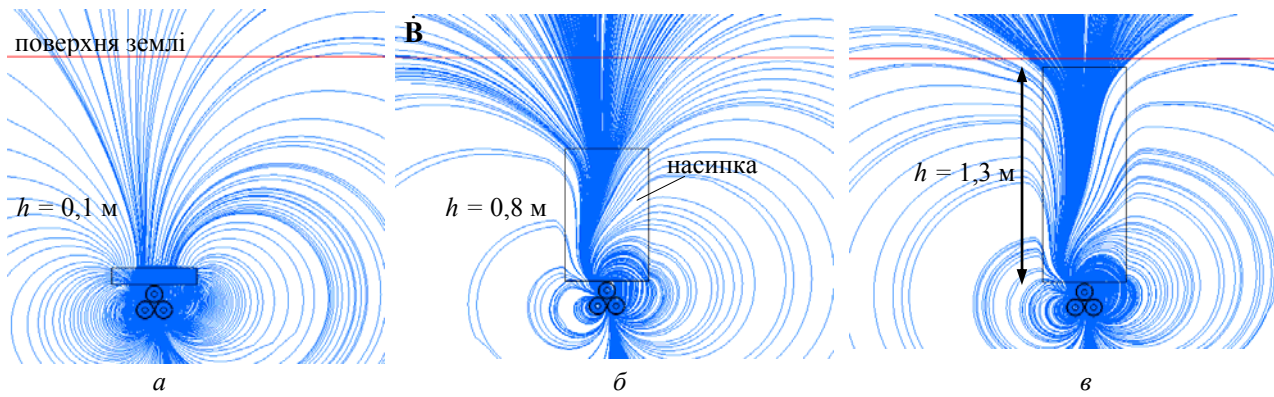


Рис. 7

висоти насипки h , $l = 0,5$ м та ефективній магнітній проникності $\mu_{eff} = 100$. Показано, що магнітне поле концентрується поблизу верхньої границі насипки і у разі зростання її висоти більші значення магнітного поля просуються все ближче до поверхні землі – поблизу неї густина ліній поля водночас збільшується. Такий розподіл поля пояснює висновок про неефективність екранування магнітного поля трифазної кабельної лінії за допомогою великого об'єму (значної висоти) насипного композиційного ґрунту з магнітними властивостями. Зазначимо, що аналогічний результат було отримано і для кабельної лінії з горизонтальним розташуванням трьох однофазних кабелів.

Висновки. Проведено дво- та тривимірне комп'ютерне моделювання магнітного поля підземної трифазної кабельної лінії (кабелі в лінії розташовані трикутником) з магнітним екраном у вигляді насипного композиційного ґрунту, що має ефективні магнітні властивості.

Досліджена ефективність використання такого типу зовнішніх екранів для кабельної лінії 330 кВ залежно від геометричних параметрів насипного ґрунту і значення його магнітної проникності.

Проведено порівняння результатів комп'ютерної реалізації дво- та тривимірної моделей. Показано, що розрахункові моделі дають близькі значення поля за рівних умов та аналогічні висновки щодо зменшення поля на поверхні землі від трифазних кабельних ліній завдяки насипному магнітному ґрунту певної невеликої висоти.

Обґрунтовано, що для розглянутої кабельної лінії великі обсяги насипного ґрунту не забезпечують ефективного екранування магнітного поля силових кабелів трикутного розташування в лінії, а для найбільшого зниження поля є оптимальні значення висоти насипки, які залежать від її магнітних властивостей і ширини. Виявлено, що за значної ширини насипного ґрунту – для розглянутого випадку $l = 3$ м – поле на поверхні землі може бути значно зменшено (майже в 5 разів) і, отже, досягнуто його безпечний рівень.

Основний результат роботи відносно необхідності лише невеликої висоти насипного ґрунту з магнітними властивостями для зменшення рівня поля на поверхні землі над кабелями справедливий для підземних одноланцюгових трифазних кабельних ліній із розташуванням кабелів трикутником або в одній площині (горизонтально) і важливий для практики прокладання і екранування кабелів.

Робота фінансувалася частково за держбюджетною темою "Розвинути теорію імпульсних і високочастотних перехідних електромагнітних процесів у енергетичних і технологічних резонансних установках та високовольтних кабельних лініях електропередачі" (Шифр "ЕЛКАБ") (Номер реєстрації 0117U007713, 2017 р.), частково за темою "Розроблення засобів створення інтелектуальних екологічно безпечних силових кабелів для традиційної та відновлюваної електроенергетики" (програма "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 на сверхвысокие напряжения. К.: Ин-т электродинамики НАН Украины, 2013, 550 с.
2. Макаров Е.Ф. Справочник по электрическим сетям 0,4–35 кВ и 110–1150 кВ. Том 3. М.: Папирус-Про, 2004, 688 с; том 4, М.: Папирус-Про, 2005, 640 с.
3. Руководство по сооружению, испытаниям и эксплуатации современных кабельных линий сверхвысокого напряжения. Харьков: Майдан, 2017, 64 с.
4. Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Мультифизическое моделирование в электротехнике. К.: Ин-т электродинамики НАН Украины, 2015, 305 с.
5. *Правила улаштування електроустановок.* Мінпаливенерго України, 2010, 776 с.
6. Sergeant P., Dupre L., Melkebeek J. Magnetic shielding of buried high voltage cables by conductive metal plates. *COMPEL*. 2008. Vol. 27. No. 1. Pp. 170–180.
7. Кучерява І.М. Екранування магнітного поля підземної кабельної лінії за допомогою Н-подібного екрана. *Техн. електродинаміка*. 2020. № 6. С. 15–20. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.06.015>
8. Кучерява І.М. Экранирование подземной кабельной линии сверхвысокого напряжения с помощью плоского ферромагнитного экрана. *Техн. електродинаміка*. 2019. № 6. С. 13–17. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.06.013>
9. 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>
10. Привезенцев В.А., Гроднев И.И., Холодный С.Д., Рязанов И.Б. Основы кабельной техники, М.-Л.: Энергия, 1967, 464 с.
11. Лях В.В., Молчанов В.М., Сантацкий В.Г., Квицинский А.А. Кабельная линия напряжением 330 кВ: некоторые аспекты проектирования. *Промэлектро*. 2009. № 6. С. 27–33.
12. Подольцев О.Д., Кучерява І.М. Тривимірна модель розрахунку магнітного поля підземної кабельної лінії. *Збірник Праць Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2020. № 56. С. 16–19. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2020.56.016>
13. Comsol multiphysics modeling and simulation software. – <http://www.comsol.com/>
14. Розов В.Ю., Реуцкий С.Ю., Пелевин Д.Е., Яковенко В.М. Исследование магнитного поля высоковольтных линий электропередачи переменного тока. *Техн. електродинаміка*. 2012. № 1. С. 3–9.

PARTICULARITIES OF MAGNETIC FIELD SHIELDING FOR UNDERGROUND CABLE LINE BY COMPOSITE FILL-UP SOIL WITH MAGNETIC PROPERTIES

I.M. Kucheriava

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine
E-mail: rB.irinan@gmail.com

The computations of the magnetic field generated by high-voltage (330 kV) underground power cable line with special fill-up soil having different dimensions (bulk) are carried out by the two- and three-dimensional computer models. The supplementary soil above the cables is the composite material with effective magnetic properties and serves as a magnetic shield. The computer results obtained by 2D and 3D models are compared. The efficiency of magnetic field shielding depending on the magnetic permeability, width, and height of the fill-up soil is studied. As revealed, there is the optimal small soil height for the best magnetic field mitigation on the top of the ground directly over the cable line. In addition, the width of the magnetic soil has an appreciable effect on shielding efficiency. The shielding of underground single-circuit three-phase power cable lines is efficient only when using the magnetic fill-up soil (or ordinary external screen made of magnetic materials) with enough small height. References 14, figures 7.

Keywords: underground power cable line, fill-up soil, composite material, shielding of the magnetic field, two- and three-dimensional computer modeling.

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. Makarov E.F. Handbook on 0,4–35 kV and 110–1150 kV power networks. Moskva: Papirus-Pro, 2004, vol. 3, 688 p.; Moskva: Papirus-Pro, 2005, vol. 4, 640 p. (Rus)
3. *Technical guide* on installation, testing and operation of modern extra-high-voltage cable lines. Kharkov: Maidan, 2017. 64 p. (Rus)
4. Podoltsev A.D., Kucheriava I.M. Multiphysics modeling in electrical engineering. Kyiv: Institute of Electrodynamics, Ukrainian Academy of Sciences, 2015, 305 p. (Rus)
5. Electric installation code. Minpalivo Ukrainy, 2010, 776 p. (Ukr)
6. Sergeant P., Dupre L., Melkebeek J. Magnetic shielding of buried high voltage cables by conductive metal plates. *COMPEL*. 2008. Vol. 27. No 1. Pp. 170–180. DOI: <https://doi.org/10.1108/03321640810836735>
7. Kucheriava I.M. Magnetic field shielding of underground power cable line by H-shaped shield. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2020. No 6. Pp. 15–20. (Rus) DOI: <https://doi.org/10.15407/technd2020.06.015>
8. 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/technd2019.06.013>
9. 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/technd2019.05.003>
10. Privezentsev V.A., Grodnev I.I., Kholodnyi S.D., Ryazanov I.B. Foundations of cable technologies. Moskva-Leningrad: Energiya, 1967. 464 p.
11. Lyach V.V., Molchanov V.M., Santatskii V.G., Kvitsinskii A.A. 330 kV cable line: some aspects of designing. *Promelektro*, 2009. No 6. Pp. 27–33. (Rus)
12. Podoltsev O.D., Kucheriava I.M. Three-dimensional model for computation of magnetic field of underground cable line. *Pratsi Institutu Elektrodynamiki NAN Ukrainy*. 2020. No 56. Pp. 16–19. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2020.56.016>
13. *Comsol* multiphysics modeling and simulation software. – <http://www.comsol.com/>
14. 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)

Надійшла: 17.02.2021

Received: 17.02.2021