

СПОСОБИ ЗМЕНШЕННЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ПІДЗЕМНИХ СИЛОВИХ КАБЕЛІВ В ПОЛІЕТИЛЕНОВИХ ТРУБАХ З КОМПОЗИЦІЙНОГО МАГНІТНОГО МАТЕРІАЛУ

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

За допомогою комп'ютерного моделювання досліджено магнітне поле високовольтної (330 кВ) підземної одноланцюгової кабельної лінії, прокладеної в поліетиленовій трубі з магнітними властивостями, з використанням спеціального насипного/засипного ґрунту різних розмірів (об'єму). Труба та додатковий ґрунт навколо і поблизу кабелів виготовляються з композиційного матеріалу з ефективними магнітними властивостями і можуть виконувати функцію магнітного екрана, зменшуючи рівень поля навколо кабельної лінії. Вивчено ефективність екранування поля кабельної лінії залежно від висоти і ширини композиційного насипного/засипного ґрунту. Виявлено існування оптимальної невеликої висоти насипки, необхідної для найбільшого зменшення магнітного поля кабелів на поверхні землі безпосередньо над ними, та вплив ширини насипного та засипного ґрунту на ефективність екранування. Проаналізовано характерні особливості розподілу магнітного поля в розглянутих екрануючих елементах кабельної лінії залежно від наявності чи відсутності композиційного засипного ґрунту і висоти насипного ґрунту з ефективними магнітними властивостями. Обґрунтовано ефективність екранування підземних одноланцюгових трифазних кабельних ліній з використанням магнітного насипного ґрунту визначеної невеликої висоти (об'єму). Бібл. 11, рис. 4.

Ключові слова: підземна трифазна кабельна лінія, прокладання кабелів в трубі, насипний/засипний ґрунт, композиційний матеріал, екранування магнітного поля, комп'ютерне моделювання.

Вступ. Прокладання в районах міської забудови сучасних високовольтних і надвисоковольтних кабельних ліній (напругою до 500 кВ) здійснюється, як правило, в ґрунті, в спеціальних кабельних спорудах (тунелях, каналах), в поліетиленових трубах, тобто за умови забезпечення додаткового захисту від ушкоджень [1–4]. Для захисту силових кабелів на ділянках перетину з автодорогами і залізницями, інженерними спорудами і природними завадами використовуються труби і спеціальне приладдя з різних термопластикових матеріалів – поліетилену, поліпропілену, полівінілхлориду. Особливо підходять для прокладання силових кабелів на напругу 6–500 кВ труби з полімерних композицій високої термостійкості [2]. Наприклад, на практиці силові кабелі захищаються шляхом використання термостійких труб зі спеціальних пластикових матеріалів китайської фірми Power Cable Protection Pipe та американської компанії Eagle (останні під назвою electrical conduit) [3]. Припускається розміщення трьох фаз одного кабельного ланцюга в одній трубі. Поліетиленові труби є одним з найбільш прийнятних рішень для підземних кабельних ліній, а згідно з висновком статті [2] прокладання кабельних ліній у трубах не є основною причиною зниження пропускної здатності кабелів. До того ж, поліетиленові труби мають невелику вагу, високу міцність та ізоляційні властивості, стійкість до корозійних впливів, окислення і проникнення вологи, довготривалий строк експлуатації, забезпечують захист кабелів від зовнішніх механічних впливів.

У сучасних умовах актуальним питанням є задоволення високих нормативних вимог до техніко-екологічної (електромагнітної) безпеки широко використовуваних високовольтних кабельних ліній – мається на увазі необхідність забезпечення регламентованого рівня магнітного поля кабелів в оточуючому середовищі за рахунок вдосконалення та розроблення нових способів спорудження кабельних ліній, а також використання допоміжних засобів та новітніх технологічних рішень для зменшення магнітного поля, що створюється кабелями. У цьому напрямку в роботі [5] запропоновано використання поліетиленових труб, у матеріал яких введено дрібнодисперсні магнітні частки, за рахунок чого забезпечуються ефективні магнітні властивості труб. Такі труби можуть виконувати роль магнітних екранів. Окрім того, що стосується кабелів підземного прокладання, ґрунти з магнітними властивостями, завдяки додаванню в їх склад магнітної фракції (мікро- або нано-розмірних магнітних часток), теж здатні екранувати магнітне поле кабельних ліній [6, 7], зокрема в роботі [6] розглянуто

засипні ґрунти (ґрунти безпосередньо навколо кабелів) та насипні ґрунти (зверху кабелів) з ефективними магнітними властивостями – магнітною проникністю μ_{eff} до 100.

Зазначимо, що насипні та засипні ґрунти можуть поєднувати роль магнітних екранів і середовища з поліпшеними тепловими властивостями (так званих коректуючих ґрунтів, тобто спеціально підібраних ґрунтів з заданою теплопровідністю) для одночасного зменшення магнітного поля кабелів і забезпечення їх допустимого температурного режиму. Саме дотримання припустимого рівня нагріву кабелів важливо для довготривалої експлуатації кабелів з визначеною пропускну здатністю [8, 9].

Метою роботи є кількісне дослідження ефективності зниження магнітного поля підземної надвисоковольтної (330 кВ) трифазної кабельної лінії на поверхні ґрунту, яка прокладена в поліетиленовій трубі з магнітними властивостями та в навколишньому і близько розташованому ґрунті, що також має магнітні властивості і різні геометричні параметри.

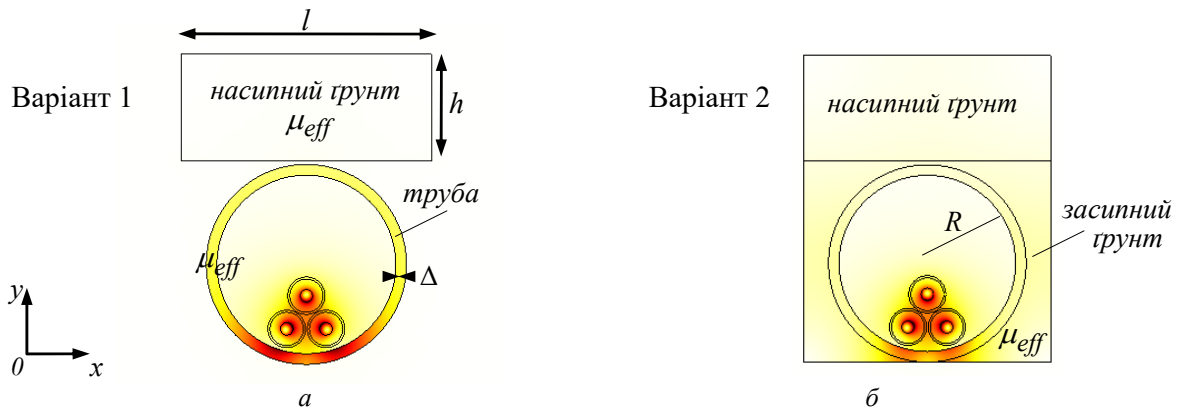


Рис. 1

Навколишнім ґрунтом вважається засипний магнітний ґрунт (ЗМГ), а близько розташованим – насипний композиційний ґрунт (НМГ), що насипається зверху труби з кабелями (рис. 1, а, б).

Робота виконується за допомогою двовимірного чисельного моделювання методом скінченних елементів у програмі Comsol [10] для діючої в Україні кабельної лінії [8]. Досліджувана підземна лінія прокладена в трубі безтраншейно на глибині 1,5 м паралельно поверхні землі, має додатково насипний/засипний композиційний ґрунт з геометричними параметрами – l, h і магнітною проникністю $\mu_{eff} \rightarrow = 100$ (рис. 1). Кабелі в лінії розташовані трикутником. Послідовність фаз кабелів – ABC зліва направо. У жилах кабелів протікає трифазна система струмів, рівномірно розподілених у перетині жил. Алюмінієві жили кабелів мають розмір поперечного перетину 800 мм^2 . Струм у номінальному режимі $I_{ном} = 630 \text{ А}$ [8]. Поліетиленова труба радіусом 25 см, товщиною 3 см теж виконана з композиційного матеріалу, що має магнітну проникність μ_{eff} . Комп'ютерне моделювання проводиться за умови, що електропровідність композиційного ґрунту не враховується (задається рівною нулю).

Модель для дослідження. Задача формулюється для усталеного режиму в декартовій системі координат Oxy (рис. 1) у припущенні, що умови прокладання кабельної лінії однакові за всією довжиною, а кабелі і екрануючі елементи (труба, НМГ/ЗМГ) достатньо довгі і незмінні вздовж кабельної траси. Невідомою електромагнітної задачі є комплексна величина векторного магнітного потенціалу з ненульовою z -складовою $\dot{\mathbf{A}} = (0, 0, \dot{A}_z)$.

Математична модель базується на підходах і рівняннях, наведених у [11], і детально описана в роботах [5, 6].

Основою моделі є система інтегро-диференціальних рівнянь загального вигляду

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

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

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 (в загальному випадку жил, екранів кабелів); μ_0 і $\mu_r = \mu_{eff}$ – магнітна постійна і відносна магнітна проникність магнітного екрана у вигляді НМГ/ЗМГ та труби з композиційного матеріалу, відповідно; $\mu_r = 1$ для немагнітних елементів розрахункової області, зокрема елементів кабелів, природного ґрунту, повітряного середовища всередині труби; \dot{J}_z – z -складова густини струму в провідниках.

Рівняння (1)–(2) містять комплексні напругу і струм. 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, рівною номінальному значенню $I_{ном}$. Струм \dot{I}_i в металевих екранах кабелів дорівнює нулю. В області екранів задається $\Delta\dot{U}_i = 0$ (реалізується випадок замкнених з обох сторін на землю внутрішніх екранів кабелів). Падіння напруги на жилах однакові та зміщені за фазою, їх значення розраховуються за виразами: $\Delta\dot{U}_i = \Delta\dot{U}_{жс} e^{j0}$, $\Delta\dot{U}_i = \Delta\dot{U}_{жс} e^{j2\pi/3}$, $\Delta\dot{U}_i = \Delta\dot{U}_{жс} e^{j4\pi/3}$, відповідно у фазах A, B, C . При цьому $\Delta\dot{U}_{жс}$ задається за умови рівності струмів у жилах струму в номінальному режимі. Як показали розрахунки, у такому разі різниця діючих значень струмів в 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 $\dot{\mathbf{B}} = \text{rot}(\dot{\mathbf{A}})$. Складові вектора поля 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 $|\dot{\mathbf{B}}| = \sqrt{|\dot{B}_x|^2 + |\dot{B}_y|^2}$ в активній розрахунковій області і на поверхні землі безпосередньо над кабельною лінією.

Результати комп'ютерного моделювання. На рис. 1 у кольоровому зображенні показано характерний розподіл магнітного поля $|\dot{\mathbf{B}}|$ в активній зоні області розрахунку для двох варіантів композиційного ґрунту. Як видно, у разі використання такого ґрунту магнітне поле концентрується в області жил кабелів і під ними в нижній частині матеріалу труби. Магнітний матеріал труби вступає у взаємодію з магнітним полем кабелів і змінює його розподіл, особливо це виявляється за наявності ЗМГ. При цьому, за рахунок перерозподілу поля, за однакової висоти НМГ $h = 0,5$ м для варіанту 1 в трубі реалізується значення $|\dot{\mathbf{B}}| = 8,1$ мТ, а для варіанту 2 – $|\dot{\mathbf{B}}| = 5,9$ мТ.

Дані рис. 2 ілюструють змінення магнітної індукції на поверхні землі в залежності від довжини l і висоти h композиційного ґрунту навколо труби з кабельною лінією. Крива 1 відповідає випадку лише НМГ над трубою; крива 2 – використанню НМГ і ЗМГ довжиною $l = 0,7$ м. Верхня пунктирна лінія представляє значення поля у немагнітному природному ґрунті (без спеціального НМГ або ЗМГ). Нижня пунктирна лінія побудована для випадку НМГ і ЗМГ з довжиною $l = 1$ м.

Залежності рис. 2 показують наступне:

- ефективність екранування за допомогою одного НМГ проявляється лише при певній висоті h – не більше $\sim 0,4$ м; використання великого об'єму НМГ ($h > 0,4$ м) не є ефективним – магнітне поле в оточуючому середовищі і на поверхні землі посилюється (крива 1);

- існує оптимальне значення висоти НМГ $h^* \approx 0,05 \dots 0,07$ м (крива 1), у разі якого реалізується найбільше зниження магнітного поля на поверхні землі;

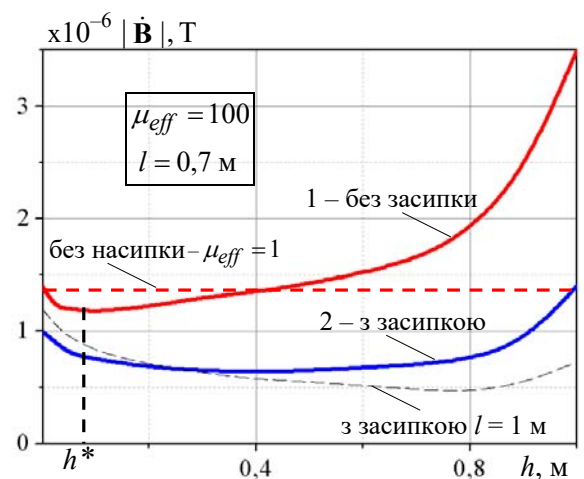


Рис. 2

– найбільш ефективним способом екранування магнітного поля кабелів є використання обох варіантів композиційного ґрунту – НМГ і ЗМГ (крива 2); під більшою ефективністю екранування мається на увазі можливість отримання менших значень магнітного поля на поверхні землі у порівнянні з випадком відсутності додаткового магнітного ґрунту – значень нижче лінії $\mu_{eff} = 1$ на рис. 2;

– у разі збільшення ширини додаткових НМГ і ЗМГ, зростає ефективність екранування магнітного поля і збільшується діапазон змінення висоти НМГ, можливий для найкращого зниження поля (нижня пунктирна крива, відмічена $l = 1$ м).

На доповнення розрахункових даних рис. 2, на рис. 3, а наведено змінення магнітної індукції $|\dot{\mathbf{B}}|$ вздовж центральної вертикальної лінії по висоті насипки (прямої LM на рис. 3, б) за різних значень h НМГ. Розподіл магнітного поля (у кольорі) в об'ємі НМГ з висотою $h = 0,1$ м представлено на рис. 3, б. Показано, що за більш низької насипки в ній генеруються більш високі значення $|\dot{\mathbf{B}}|$, максимум яких знаходиться ближче до кабельної лінії. Найбільша величина поля відповідає меншій висоті НМГ – $h = 0,1$ м. Для цього випадку у безпосередній близькості до поверхні землі поле зменшується до менших значень у порівнянні з висотою $h = 0,5$ м.

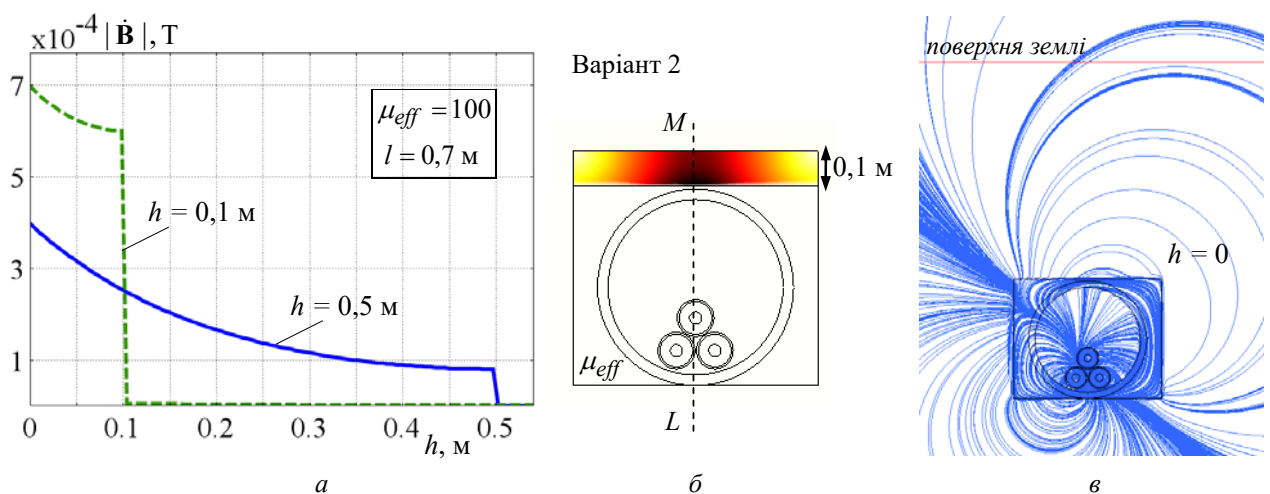


Рис. 3

Пояснення залежностей на рис. 2 відносно необхідності невеликої висоти НМГ для більшого зменшення рівня магнітного поля на поверхні землі може бути проведено за допомогою картин вектора магнітної індукції $\dot{\mathbf{B}}$ (у вигляді ліній потоку) навколо кабельної лінії та поблизу поверхні землі для двох варіантів прокладання кабелів в композиційній трубі та різній висоті h НМГ (рис. 4).

У загальному випадку розподіл магнітного поля поблизу провідників залежить від моменту часу. Однак найбільший інтерес для дослідження представляє, перш за все, характер розподілу поля в зоні неподалік від поверхні ґрунту. До того ж, як показано розрахунковим шляхом, зі змінням часу картини магнітного поля змінюються обертально в площині поперечного перетину кабелів (Oxy), а суттєві особливості залишаються незмінними.

Як свідчить рис. 4, магнітне поле проникає в магнітний матеріал труби, НМГ та ЗМГ. У разі відсутності композиційної засипки поле більше концентрується в стінках труби (рис. 4, а), а у разі використання ЗМГ магнітне поле перерозподіляється, охоплюючи об'єм магнітних середовищ замкненими потоками кругового характеру (рис. 4, б). Загальною особливіст. для двох розглянутих варіантів є концентрація поля саме на верхній границі НМГ, а також просування більших значень магнітної індукції все ближче до поверхні землі у разі збільшення висоти НМГ. Аналогічний висновок було отримано для підземних трифазних кабельних ліній без додаткового захисту (безтрубного прокладення) з трикутним і горизонтальним розташуванням кабелів і наявності НМГ.

Для порівняння результатів для варіанту 2 на рис. 3, в наведено розподіл магнітного поля (лініями потоку) навколо кабельної лінії, що має ЗМГ і не має магнітної насипки ($h = 0$).

Згідно з результатами роботи [6] використання ЗМГ є найбільш ефективним з точки зору реалізації екрануючих властивостей у порівнянні з насипним композиційним ґрунтом. Як показано у да-

ній роботі, збільшити ступінь пом'якшення магнітного поля на поверхні землі дає змогу варіант 2 – наявність ЗМГ та НМГ невеликого обсягу.

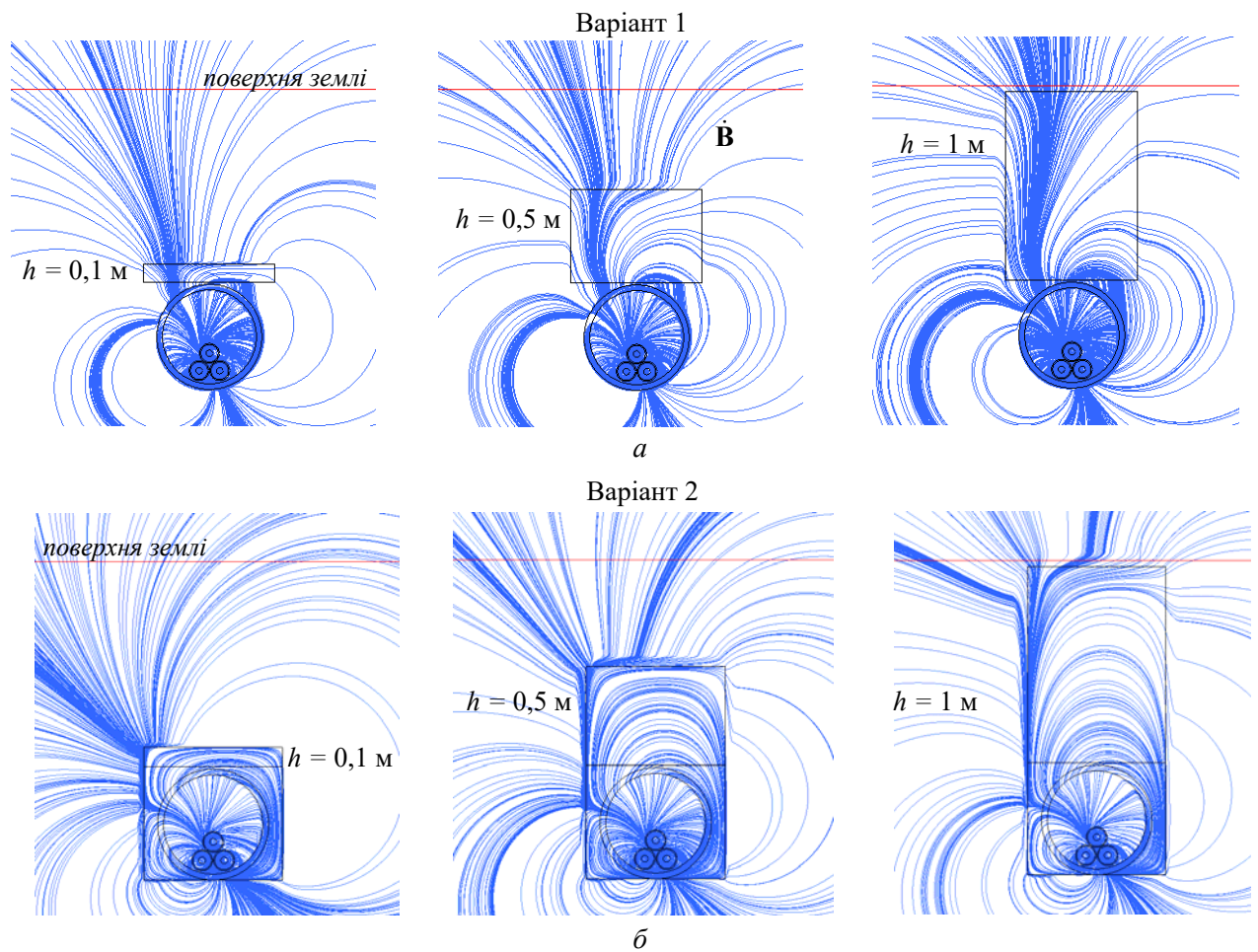


Рис. 4

Висновки. 1. Досліджено магнітне поле одноланцюгової надвисоковольтної кабельної лінії, прокладеної в поліетиленовій трубі, виготовленій з композиційного магнітного матеріалу, і в спеціальному насипному/засипному ґрунті, який має ефективні магнітні властивості, завдяки додаванню в матеріал магнітної компоненти дрібної дисперсності. Такі труби і композиційні ґрунти можуть виконувати роль магнітних екранів, що зменшують магнітне поле на поверхні землі. Використання додаткових магнітних ґрунтів дозволяє досягти зменшення поля на рівні поверхні ґрунту над кабелями більше ніж у 2,5 рази (рис. 2).

2. Проаналізовано особливості характеру розподілу і змінення магнітного поля кабельної лінії в оточуючому середовищі і в трубі залежно від висоти і ширини композиційного насипного/засипного ґрунту.

3. Для розглянутої кабельної лінії проведено кількісний аналіз ефективності зниження рівня магнітного поля на поверхні ґрунту за рахунок застосування насипного/засипного ґрунту з магнітними властивостями.

4. Дано пояснення виявленого факту, що великі обсяги композиційного засипного, а особливо насипного ґрунту не забезпечують найбільшої ефективності екранування магнітного поля силових кабелів (рис. 4). Існують оптимальні значення висоти таких спеціальних ґрунтів для забезпечення найбільшого зменшення магнітного поля кабелів на поверхні землі (рис. 2).

5. Для практики прокладання кабельних ліній в трубах з магнітними властивостями найбільш ефективні екрануючі можливості реалізуються за наявності композиційних засипного та насипного ґрунтів визначеного обсягу (для розглянутого випадку у разі насипного магнітного ґрунту з висотою $h = 0,1-0,5$ м, рис. 2).

Робота фінансувалася частково за держбюджетною темою "Розвинути теорію імпульсних і високо-частотних перехідних електромагнітних процесів в енергетичних і технологічних резонансних установках та високовольтних кабельних лініях електропередачі" (Шифр "ЕЛКАБ"), (№ держреєстрації 0117U007713), 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. Макаров Е.Ф. Справочник по электрическим сетям 0,4–35 кВ и 110–1150 кВ. Т. 3. М.: Папирус-Про, 2004. 688 с.
2. Дмитриев М.В. Кабельные линии, проложенные в полиэтиленовых трубах. Тепловой расчет. *Новости электротехники*. 2013. № 4 (82). С. 11–17.
3. Дмитриев М.В. Требования к трубам для прокладки силовых кабельных линий. *Кабель-news*. 2014. № 6. С. 22–26.
4. Boukrouche F., Moreau C., Pelle J., Beaubert F., Harmand S., Moreau O. Mock-up study of the effect of wall distance on the thermal rating of power cables in ventilated tunnels. *IEEE Trans. on Power Delivery*. 2017. Vol. 32. No 6. Pp. 2453–2461. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2016.2629285>
5. Щерба А.А., Подольцев О.Д., Кучерява И.М. Дослідження магнітного поля силових кабелів, прокладених у поліетиленових трубах з магнітними властивостями. *Технічна електродинаміка*. 2020. № 3. С. 15–21. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.03.015>
6. Щерба А.А., Подольцев А.Д., Кучерява И.Н. Магнитное поле подземной кабельной линии 330 кВ и способы его уменьшения. *Технічна електродинаміка*. 2019. № 5. С. 3–9. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.05.003>
7. Кучерява И.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>
8. 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.
9. Leon F., Anders G.J., Effects of backfilling on cable ampacity analyzed with the finite element method. *IEEE Trans. on Power Delivery*. 2008. Vol. 23. No 2. Pp. 537–543. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2008.917648>
10. *Comsol multiphysics modeling and simulation software*. URL: <http://www.comsol.com/> (дата доступу 21.03.2021)
11. Подольцев А.Д., Кучерява И.Н. Мультифизическое моделирование в электротехнике. К.: Ин-т электродинамики НАН Украины, 2015. 305 с.

METHODS FOR MITIGATION OF MAGNETIC FIELD GENERATED BY UNDERGROUND POWER CABLES IN POLYETHYLENE PIPES MADE OF COMPOSITE MAGNETIC MATERIAL

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

The magnetic field of a high-voltage (330 kV) underground single-circuit power cable line, laid in a polyethylene pipe having magnetic properties, with the use of special loose-fill/fill-up soil of different dimensions (bulk) is studied by computer modeling. The pipe and additional soil around and near the cables are made of a composite material with effective magnetic properties and can act as a magnetic shield that reduces the level of the field on the ground. The efficiency of field shielding depending on the height and width of the composite loose-fill/fill-up soil is analyzed. The existence of the optimal not large (in height) fill-up soil for the best mitigation of the magnetic field on the ground directly above the cables, and the influence of the width of the loose-fill/fill-up soils on the shielding efficiency are revealed. The characteristic features of the magnetic field distribution within the considered shielding elements of the cable line depending on the availability or non-availability of composite loose-fill soil and the height of the fill-up soil with effective magnetic properties are presented. The shielding efficiency of underground single-circuit three-phase power cable lines when using the magnetic fill-up soil with a certain small height (volume) is grounded. References 11, figures 4.

Key words: underground three-phase cable line, cables laid in pipe, loose-fill/fill-up soil, composite material, magnetic field shielding, computer modeling.

1. Makarov E.F. Handbook on 0,4–35 kV and 110–1150 kV power networks. Vol. 3. Moskva: Papirus-Pro, 2004. 688 p. (Rus)
2. Dmitriev M.V. Cable lines laid in polyethylene pipes. Thermal calculation. *Novosti elektrotechniki*. 2013. No 4 (82). Pp. 11–17. (Rus)
3. Dmitriev M.V. Requirements to pipes for laying of power cable lines. *Kabel-news*. 2014. No 6. Pp. 22–26. (Rus)
4. Boukrouche F., Moreau C., Pelle J., Beaubert F., Harmand S., Moreau O. Mock-up study of the effect of wall distance on the thermal rating of power cables in ventilated tunnels. *IEEE Trans. on Power Delivery*. 2017. Vol. 32. No 6. Pp. 2453–2461. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2016.2629285>
5. Shcherba A.A., Podoltsev O.D., Kucheriava I.M. The study of magnetic field of power cables in polyethylene pipes with magnetic properties. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2020. No 3. Pp. 15–21. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.03.015> (Ukr)
6. 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. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.05.003> (Rus)
7. Kucheriava I.M. Particularities of magnetic field shielding for underground cable line by composite fill-up soil with magnetic properties. *Pratsi Institutu Elektrodynamiki NAN Ukrainy*. 2021. Is. 58. Pp.14-22. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2021.58.014> (Ukr)
8. 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)
9. Leon F., Anders G.J., Effects of backfilling on cable ampacity analyzed with the finite element method. *IEEE Trans. on Power Delivery*. 2008. Vol. 23. No 2. Pp. 537–543. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2008.917648>
10. *Comsol* multiphysics modeling and simulation software. URL: <http://www.comsol.com/> (accessed at 21.03.2021).
11. Podoltsev A.D., Kucheriava I.M. Multiphysics modeling in electrical engineering. Kyiv: Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2015. 305 p. (Rus)

Надійшла 24.05.2021
Остаточний варіант 23.02.2022