

ДОСЛІДЖЕННЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ СИЛОВИХ КАБЕЛІВ, ПРОКЛАДЕНИХ У ПОЛІЕТИЛЕНОВИХ ТРУБАХ З МАГНІТНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ

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

Розраховано та проаналізовано магнітне поле на поверхні землі підземної одноланцюгової кабельної лінії на напругу 330 кВ у разі, коли кабелі лінії прокладені в поліетиленових трубах. На відміну від традиційного випадку передбачається, що у поліетиленових трубах додана магнітна дрібнодисперсна фракція, і за рахунок цього поліетиленовий матеріал має ефективні магнітні властивості. Такі труби можуть виконувати функції магнітного екрану, що знижує магнітне поле на поверхні ґрунту. Досліджено два різні конструктивні варіанти: 1) кожен фазний кабель розташований в окремій трубі з магнітними властивостями і 2) всі три кабелі знаходяться в загальній трубі. Показано, що використання трьох поліетиленових труб як магнітних екранів є неефективним, а у разі однієї загальної для всіх кабелів труби поле на поверхні землі може бути знижено на порядок. Досліджено вплив ефективної магнітної проникності матеріалу труби, а також розмірів труби (радіуса, товщини стінки) і форми (замкненої у перерізі або напівкруглої труби) на ефективність екранування магнітного поля на поверхні ґрунту. Бібл. 14, рис. 6.

Ключові слова: підземна кабельна лінія, поліетиленова труба, ефективна магнітна проникність, магнітний екран, допустимий рівень магнітного поля, комп'ютерне моделювання.

Вступ. Світовими тенденціями у галузі сучасного розвитку кабельної техніки є: застосування високовольтних силових кабелів з ізоляцією зі зшитого поліетилену, вдосконалення способів спорудження кабельних ліній, виконаних на основі таких кабелів і забезпечення високого рівня техніко-екологічної безпеки кабельних систем [1].

Існує декілька основних способів прокладки кабельних ліній на напругу 6–500 кВ – у ґрунті, залізобетонних лотках, поліетиленових трубах, кабельних тунелях. Останнім часом поліетиленові труби широко застосовуються для прокладки силових кабелів високої та надвисокої напруги [2, 3]. Такі труби забезпечують, насамперед, захист й герметизацію кабелів, характеризуються механічною міцністю, пластичністю, стійкістю до вигинів на трасі прокладки, мають малу вагу, прийнятну вартість, тривалий термін експлуатації без додаткового обслуговування, а також простий ремонт і заміну кабелю в ході його експлуатації. Саме тому поліетиленові труби є одним з найкращих рішень для підземної прокладки силових кабелів.

У роботі [3] описано переваги та досвід застосування полімерних труб як важливого елемента кабельної системи. Вплив поліетиленових труб на теплові процеси в кабелях досліджено у статті [2], в якій зроблено висновок про те, що прокладання кабельних ліній у трубах не є основною причиною зниження їхньої пропускної спроможності. Деякі практичні питання вибору матеріалу, діаметра і товщини труб розглянуто у роботі [4].

У зв'язку з актуальністю використання поліетиленових труб для прокладання сучасних високовольтних кабелів на протяжних ділянках трас (не менше 500 м), а також необхідністю зниження рівня магнітного поля, створюваного кабелями у навколишньому просторі при їхньому прокладанні у густонаселених районах мегаполісів, у даній роботі пропонується використання поліетиленових труб, що мають магнітні властивості. Для надання таких властивостей на етапі виготовлення труб у поліетилен пропонується додавати магнітну компоненту, наприклад, магнітні мікро- або наночастки, і, таким чином, надавати матеріалу ефективні магнітні властивості. У цьому випадку, з одного боку, підвищується теплопровідність матеріалу труб, що є сприятливим фактором щодо відведення тепла від кабелів. З іншого боку, поліетиленові труби з магнітними властивостями можуть виконувати роль магнітних екранів, які зменшують магнітне поле силових кабелів на поверхні ґрунту, наприклад, до рівня, регламентованого нормативними документами [5]. Існує також альтернативний спосіб надання магнітних властивостей поліетиленовим трубам – на поверхню труб при їхньому укладанні наносить-

ся у вигляді тонкого шару плівка з полімерного матеріалу, що має магнітні властивості. Обидва зазначені способи можуть бути реалізовані на практиці. Однак питання визначення ефективності зниження магнітного поля, що створюється кабельними лініями, за допомогою таких магнітних екранів залишається невивченим. У той же час усі можливі шляхи зниження магнітного поля на поверхні землі до регламентованого рівня (0,5 мкТл відповідно до санітарних норм України [5]) є предметом дослідження багатьох робіт, наприклад, [6–11].

Метою даної роботи є кількісне дослідження ефективності зниження рівня магнітного поля, що створюється трифазною підземною кабельною лінією на поверхні ґрунту, за умови, що кабелі в лінії прокладені у поліетиленових трубах, які мають магнітні властивості, а значить виконують додатково роль магнітних екранів.

Опис фізичної і математичної моделей кабельної лінії. Дослідження виконується для надвисоковольтної підземної кабельної лінії (напругою 330 кВ) з номінальним струмом 630 А. Така лінія сьогодні використовується для постачання сталеливарного комплексу заводу "Дніпросталь" [12]. Лінія складається з трьох однофазних кабелів, розташованих в ґрунті трикутником на глибині 1,5 м. Характеристики кабелів наведено у статті [12].

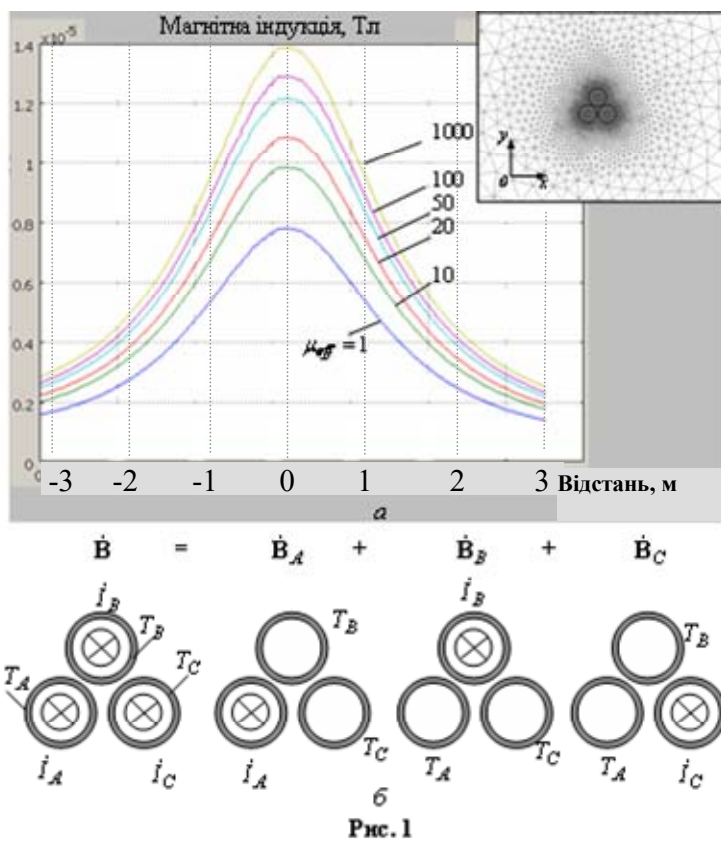


Рис. 1

жилах кабелів. У процесі розрахунку магнітного поля струми в зовнішньому електропровідному екрані кожного кабелю не враховуються, що відповідає режиму заземлення цих екранів тільки з одного боку або випадку транспонування екранів кабелів, що реалізовано на практиці у досліджуваній лінії.

Електромагнітна задача формулюється у декартовій системі координат у площині xOy (див. вставку вгорі рис. 1, а) відносно комплексного векторного магнітного потенціалу $\dot{A} = (0, 0, \dot{A}_z)$, що має єдину z -складову $\dot{A}_z(x, y)$.

Векторний потенціал \dot{A} визначається з розв'язку наступної системи диференціальних рівнянь [1]: – в області струмопровідних жил кабелів:

$$j\omega\sigma\dot{A} + \nabla \times (\mu_0^{-1} \nabla \times \dot{A}) = \sigma \Delta \dot{U}_i / L, \quad i = 1 \dots 3, \quad (1)$$

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

У даній роботі передбачається, що кабелі прокладено у поліетиленових трубах, матеріал яких має магнітні властивості. Розглядаються два конструктивних варіанта: кожен кабель розташований в окремій трубі і 2) всі три кабелі знаходяться в одній загальній поліетиленовій трубі. В обох випадках труби мають магнітні властивості, які характеризуються ефективною магнітною проникністю μ_{eff} , значення якої може змінюватися у загальному випадку в широкіх межах.

Електромагнітне поле моделюється в усталеному гармонічному режимі для двовимірного випадку – в поперечному перерізі кабельної лінії, що є справедливим для досить протяжної кабельної лінії, прокладеної паралельно поверхні ґрунту, і однакових умов прокладання кабелів по всій трасі.

Джерелами змінного магнітного поля є трифазні струми промислової частоти, що протікають у

– в області ґрунту зі слабо провідними властивостями:

$$j\omega\sigma_g \dot{\mathbf{A}} + \nabla \times (\mu_0^{-1} \nabla \times \dot{\mathbf{A}}) = \sigma_g \Delta \dot{U}_g / L, \quad (3)$$

$$\int_{S_g} \dot{J}_z dS = \int_{S_g} (-j\omega\sigma_g \dot{A}_z + \sigma_g \Delta \dot{U}_g / L) dS = 0; \quad (4)$$

– в області повітря і в поліетиленовій трубі з магнітними властивостями

$$\nabla \times (\mu_0^{-1} \mu_{eff}^{-1} \nabla \times \dot{\mathbf{A}}) = 0, \quad i = 1, 2. \quad (5)$$

Тут ω – кутова частота струму; σ , σ_g – електропровідність матеріалу жили і ґрунту, відповідно; μ_{eff} – ефективне значення відносної магнітної проникності матеріалу труби; \dot{J}_z – густина струму в провідному середовищі; S_i , S_g – поперечний переріз жили i -го кабелю і ґрунту, відповідно; $\Delta \dot{U}_i$ – падіння напруги у провідному середовищі на ділянці довжиною L ; \dot{I}_i – комплексна величина струму в жилі i -ого кабелю (вважається відомою та рівною струму кабелю у номінальному режимі).

Стосовно рівнянь (3), (4), які описують процеси у ґрунті, відзначимо, що струми, наведені в області ґрунту, слабо впливають на магнітне поле, створюване струмами промислової частоти у жилах. Однак їхній вплив є суттєвим на високих частотах, коли досліджуються, наприклад, комутаційні явища та грозові перенапруги. Тому врахування струмів у ґрунті проведено з метою розширення математичної моделі.

Як граничні умови на всіх зовнішніх границях розрахункової області вибирається умова магнітної ізоляції – $\dot{A}_z = 0$. Для чисельного розв'язку системи (1)–(5) використовується метод кінцевих елементів, реалізований у пакеті програм Comsol [12].

Результати комп'ютерного моделювання. Далі наводяться і аналізуються результати моделювання трьох конструктивних варіантів кабельної лінії з магнітними екранами, розташованої в поліетиленових трубах, матеріал яких має додатково магнітні властивості: 1) кожен фазний кабель розташований в окремій трубі; 2) всі три кабелі розташовані в одній загальній трубі; 3) всі три кабелі знаходяться під незамкненим магнітним екраном – напівкруглою трубою.

Розташування кожного кабелю в окремій поліетиленовій трубі (варіант 1). Внутрішній радіус усіх трьох труб вибирається рівним 47 мм, товщина стінки труби – $\Delta = 6$ мм. Розраховується розподіл діючого значення магнітного поля $B = \sqrt{|\dot{B}_x|^2 + |\dot{B}_y|^2} / \sqrt{2}$ на поверхні ґрунту безпосередньо над кабельною лінією при різних значеннях відносної ефективної магнітної проникності матеріалу труб $\mu_{eff} = 1 \div 1000$, при цьому значення $\mu_{eff} = 1$ відповідає полю без магнітного екрана. Результати розрахунків для цього випадку наведено на рис. 1, а, де на вставці показано фрагмент розрахункової області поблизу кабелів з кінцево-елементною сіткою. Наведені на рис. 1, а графіки свідчать, що наявність магнітних властивостей у матеріалі поліетиленових труб призводить до зворотного, з точки зору екранування поля, ефекту – збільшення значення магнітного поля на поверхні землі. Причому, чим сильніше виявляються магнітні властивості, тобто чим більше значення μ_{eff} , тим вище магнітне поле на поверхні землі.

Пояснення цього ефекту полягає у наступному [13].

Припустимо, що відокремлений провідник зі струмом (одна жила кабелю) знаходиться в трубі з магнітними властивостями. Тоді у разі симетричного розташування провідника всередині труби і зміні магнітної проникності труби μ_{eff} магнітне поле $\dot{\mathbf{B}}$ поза об'ємом труби не змінюється. Воно збільшиться лише всередині труби в μ_{eff} раз.

Магнітне поле трифазної кабельної лінії при наявності трьох магнітних труб і при лінійній постановці задачі можна представити як суперпозицію трьох полів, що створюються струмом кожного з трьох кабелів окремо при наявності магнітних елементів – трьох труб (рис. 1, б). У цьому випадку результуюче поле визначається сумою полів, створюваних кожним струмом окремо, тобто $\dot{\mathbf{B}} = \dot{\mathbf{B}}_A + \dot{\mathbf{B}}_B + \dot{\mathbf{B}}_C$. Поле $\dot{\mathbf{B}}_B$ на поверхні ґрунту, як показують чисельні розрахунки, збільшується за рахунок наявності у розрахунковій області магнітних елементів – труб T_A і T_C – приблизно на 5

мкТл (розрахунки проводилися при $\mu_{eff} = 100$). Змінення полів \vec{B}_A і \vec{B}_C , обумовлені наявністю магнітних елементів – труб, відповідно, T_B , T_C і T_A , T_B , відбуваються у меншій мірі і приблизно взаємно компенсуються, оскільки провідники фаз A і C розташовані симетрично щодо центру симетрії. З іншого боку, з рис. 1, а видно, що максимальне поле на поверхні ґрунту при наявності трьох магнітних труб з $\mu_{eff} = 100$ збільшується також на 5 мкТл (з 8 до 13 мкТл).

Наведені комп'ютерні результати показують, що поліетиленові труби, що мають магнітні властивості, не забезпечують зниження магнітного поля на поверхні ґрунту, а навпаки, призводять до його збільшення. Зазначимо, що прояв ефекту збільшення магнітного поля на поверхні землі при прокладанні кабелів у поліетиленових трубах з більш високими магнітними властивостями залежить у загальному випадку від багатьох чинників: розташування кабелів (горизонтально або трикутником), відстані між ними, глибини прокладання в землі, розмірів труб та їхніх магнітних властивостей.

Розташування трьох кабелів в одній загальній трубі з магнітними властивостями (варіант 2). Комп'ютерні розрахунки для цього випадку виконувалися для труби з внутрішнім радіусом $R = 0,3$ м і товщиною стінки $\Delta = 2$ см. Розподіл магнітної індукції $|\vec{B}|$ на поверхні ґрунту при різних магнітних властивостях загальної труби показано на рис. 2. Розрахункові дані свідчать про високу ефективність

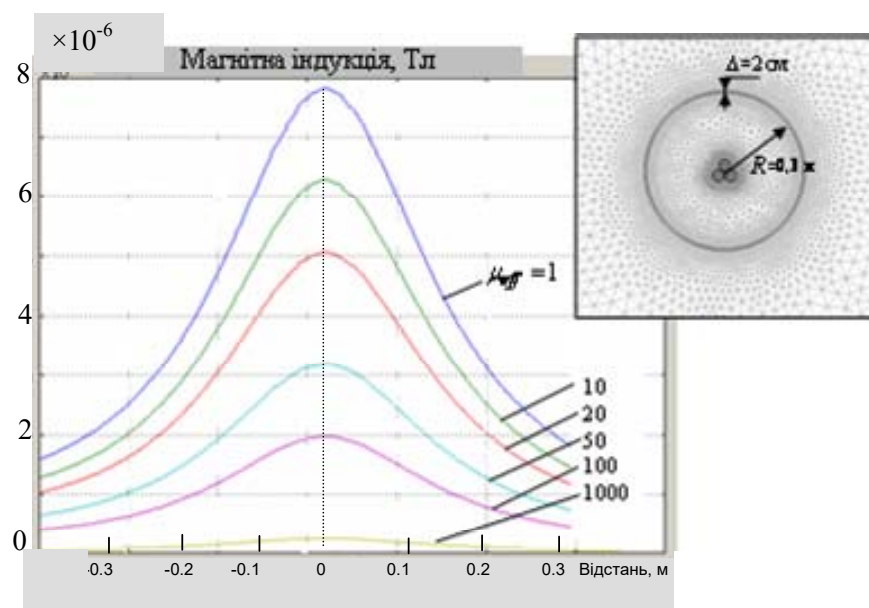


Рис. 2

такого способу магнітного екранування – із зростанням значення μ_{eff} труби магнітне поле на поверхні землі зменшується. При $\mu_{eff} \geq 1000$ поле стає нижче допустимого значення 0,5 мкТл відповідно до встановлених в Україні санітарних норм [5]. При цьому максимальне значення поля на поверхні землі знижується у $7,8/0,2 = 39$ разів.

Вплив радіуса поліетиленової труби на рівень магнітного поля. Комп'ютерні розрахунки магнітного поля $|\vec{B}|$ на поверхні ґрунту проводилися при різних значеннях внутрішнього радіуса поліетиленової труби з магнітною

проникністю $\mu_{eff} = 100$. Товщина стінки труби задавалася рівної $\Delta = 2$ см = const. Результати моделювання на рис. 3 показують, що труба меншого радіуса забезпечує більш ефективне екранування магнітного поля.

На рис. 4 показано розподіл магнітного поля $|\vec{B}|$ на поверхні землі при різній товщині Δ поліетиленової труби з $\mu_{eff} = 100$, в якій розташовані всі три кабелі. Внутрішній радіус труби становить 0,7 м. Видно, що при збільшенні товщини стінки труби від 1 до 6 см рівень поля знижується більш, ніж у 1,7 разів.

Оскільки, згідно з даними рис. 3, зниження магнітного поля кабелів можливо за рахунок зменшення радіуса труби, на рис. 5 показано криві змінення магнітного поля на поверхні ґрунту при радіусі поліетиленової труби 0,15 м і різній товщині її стінки Δ . Комбінування двох способів зниження поля – за рахунок зменшення радіуса труби і збільшення її товщини – дає змогу знизити поле до допустимого згідно з санітарними нормами значення 0,5 мкТл за умови магнітної проникності труби $\mu_{eff} > 100$. Зона відчуження при обраних значеннях $\Delta = 2 \div 6$ см змінюється у межах 1 \div 3,6 м і залежить від товщини стінки труби Δ .

Вплив форми магнітного екрана (варіант 3). Та обставина, чи є магнітний екран замкненим (у напрямку магнітних силових ліній) або розімкненим, у значній мірі визначає його екранувальні влас-

тивості. Це підтверджують розрахункові результати, наведені на рис. 6. Тут порівнюються дві конструкції труби – традиційна труба, що представляє замкнений магнітний екран, і напівкругла труба, що захищає кабелі тільки від верхніх шарів ґрунту, але при цьому дає змогу зменшити об'єм поліетилену. Як видно, використання напівкруглої труби як магнітного екрана ($\mu_{eff} = 100$) у порівнянні з традиційною трубою такого ж радіуса і товщини призводить до збільшення магнітного поля на поверхні землі більше, ніж у 5,5 рази. З іншого боку, наявність напівкруглої труби дозволяє знизити магнітне поле на поверхні ґрунту приблизно у 2 рази у порівнянні з випадком, коли магнітний екран відсутній (рис. 1, а, графік, що відповідає $\mu_{eff} = 1$).

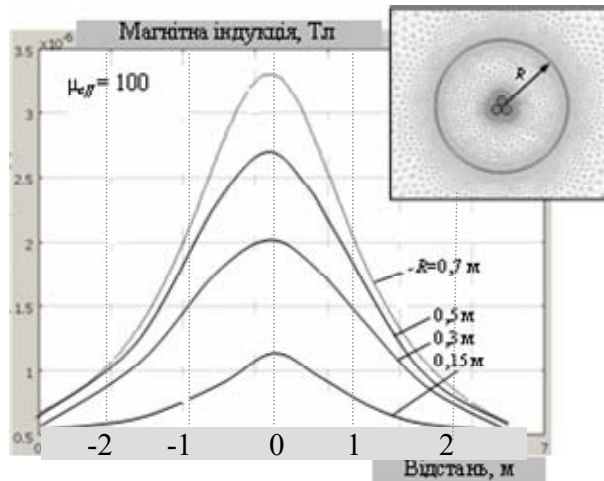


Рис. 3

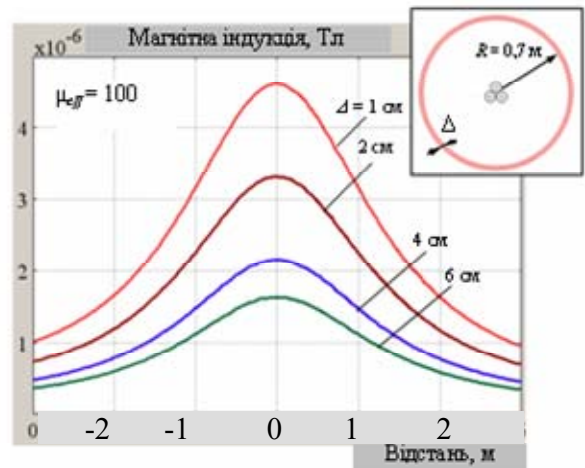


Рис. 4

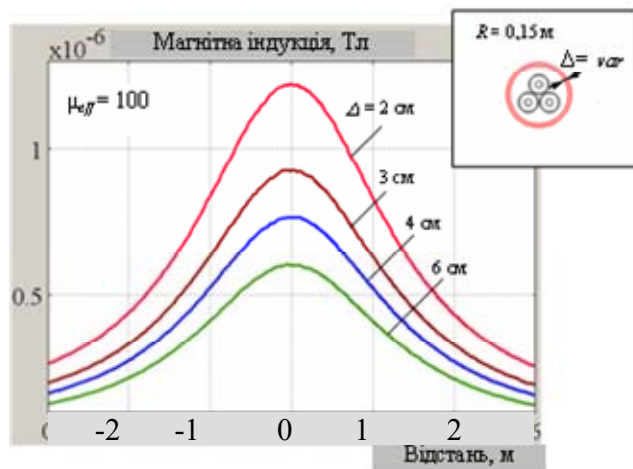


Рис. 5

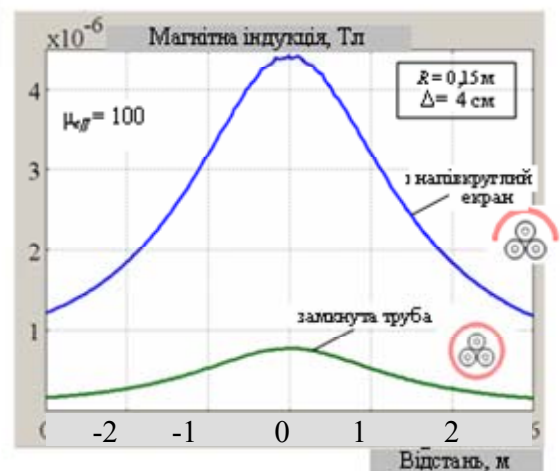


Рис. 6

Висновки. У роботі пропонується для прокладання силових кабелів використовувати поліетиленові труби, що мають магнітні властивості за рахунок додавання в їхній матеріал на етапі виготовлення дрібнодисперсної магнітної компоненти. Такі труби поряд з їхньою основною функцією – захисту кабелів від зовнішніх впливів – можуть виконувати роль магнітних екранів, що зменшують магнітне поле на поверхні землі.

На прикладі підземної одноланцюгової кабельної лінії 330 кВ виконано кількісний аналіз ефективності зниження рівня магнітного поля на поверхні ґрунту за рахунок застосування поліетиленових труб з магнітними властивостями. Досліджено два основних конструктивних варіанта: кожен фазний кабель розташований в окремій поліетиленовій трубі та всі три кабелі знаходяться в одній загальній трубі. Показано, що у першому випадку використання трьох труб як магнітних екранів є неефективним, а у другому випадку однієї загальної труби поле на поверхні ґрунту може бути знижено на порядок. Досліджено вплив значення ефективної магнітної проникності матеріалу труби, а також розмірів труби (радіуса, товщини стінки) і форми (замкненої у перерізі або у вигляді половини труби) на ефективність екранування магнітного поля на поверхні землі.

Роботу виконано за бюджетною темою "Розвинути теорію імпульсних і високочастотних перехідних електромагнітних процесів у енергетичних і технологічних резонансних установках та високовольтних кабельних лініях електропередачі" (Шифр "ЕЛКАБ"), номер 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")" на 2019–2021 рр.

1. Шидловский А.К., Щерба А.А., Золотарев В.М., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Кабели с полимерной изоляцией на сверхвысокие напряжения. К.: І-т електродинаміки НАН України, 2013. 550 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. Полимерная труба как важнейший элемент кабельной системы 6–500 кВ. *Сети России*. 2015. № 6 (33). С. 78–83.
4. Дмитриев М., Овсянникова А. О полиэтиленовых трубах для прокладки кабельных линий. *Сети России*. 2015. № 1 (28). С. 66–69.
5. Правила улаштування електроустановок. Мінпаливенерго України, 2010. 776 с.
6. Щерба А.А., Подольцев А.Д., Кучерявая 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. 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.
8. 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>
9. Farag A.S., Dawoud M.M., Habiballah I.O. Implementation of shielding principles for magnetic field management of power cables. *Electric Power Systems Research*. 1999. 48. Pp. 193–209.
10. Розов В.Ю., Гринченко В.С., Ткаченко А.О. Расчет магнитного поля трехфазных кабельных линий при двустороннем замыкании собственных экранов кабелей, охваченных ферромагнитными сердечниками. *Електротехніка і електромеханіка*. 2017. № 5. С. 44–47. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2017.5.06>
11. Розов В.Ю., Гринченко В.С., Ерисов А.В., Добродеев П.Н. Эффективное контурное экранирование магнитного поля трехфазных кабельных линий при ограниченном тепловом воздействии на силовые кабели. *Електротехніка і електромеханіка*. 2019. № 6. С. 50–54. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2019.6.07>
12. 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.
13. Comsol multiphysics modeling and simulation software. URL: <http://www.comsol.com/>
14. Джексон Дж. Классическая электродинамика. М.: Мир, 1965. 703 с.

УДК 621.315.2 : 004.94

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ, ПРОЛОЖЕННЫХ В ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ ТРУБАХ С МАГНИТНЫМИ СВОЙСТВАМИ

Щерба А.А., чл. корр. НАН України, Подольцев А.Д., докт. техн. наук, Кучерявая И.Н., докт. техн. наук

Институт электродинамики НАН України,

пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина.

E-mail: podol@ied.org.ua

Рассчитано и проанализировано магнитное поле на поверхности земли подземной одноцепной кабельной линии на напряжение 330 кВ в случае, когда кабели линии проложены в полиэтиленовых трубах. В отличие от традиционного случая предполагается, что в полиэтиленовую трубу добавлена магнитная мелкодисперсная фракция, и за счет этого полиэтиленовый материал обладает эффективными магнитными свойствами. Такие трубы могут выполнять функции магнитного экрана, снижающего магнитное поле на поверхности грунта. Исследованы два различных конструктивных варианта: 1) каждый фазный кабель расположен в отдельной трубе с магнитными свойствами и 2) все три кабеля находятся в общей трубе. Показано, что использование трех полиэтиленовых труб в качестве магнитных экранов является неэффективным, а в случае одной общей для всех кабелей трубы поле на поверхности земли может быть снижено на порядок. Исследовано влияние эффективной магнитной проницаемости материала трубы, а также размеров трубы (радиуса, толщины стенки) и формы (замкнутой в сечении или полукруглой трубы) на эффективность экранирования магнитного поля на поверхности грунта. Библиограф. 14, рис. 6.

Ключевые слова: подземная кабельная линия, полиэтиленовая труба, эффективная магнитная проницаемость, магнитный экран, допустимый уровень магнитного поля, компьютерное моделирование.

THE STUDY OF MAGNETIC FIELD OF POWER CABLES IN POLYETHYLENE PIPES WITH MAGNETIC PROPERTIES

Shcherba A.A., Podoltsev O.D., Kucheriava I.M.

Institute of Electrodynamics, National Academy of Sciences of Ukraine

pr. Peremohy, 56, Kyiv-57, 03057, Ukraine,

e-mail: podol@ied.org.ua

In the article, the magnetic field on the ground induced by underground single-circuit 330 kV cable line is computed and analyzed when the power cables are laid in polyethylene pipes. As proposed by contrast to the traditional construction, the fine-dispersed magnetic fraction is added to the polyethylene material of the pipes and, due to this, the polyethylene has effective magnetic properties. Such pipes can serve as a magnetic shield that reduces the magnetic field on the ground. The two different structural variants are studied: 1) when each phase cable is located in separate pipe with magnetic properties and 2) all three cables are in common pipe. As revealed by simulations, the use of three polyethylene pipes as magnetic shields is ineffective, and one common pipe for all three cables can reduce the field on the ground by an order of magnitude. The influence of the effective magnetic permeability of the polyethylene, as well as the pipe dimensions (radius, wall thickness) and shape of the pipe (closed shape in cross section or half pipe) on the shielding efficiency is studied. References 14, figures 6.

Keywords: underground cable line, polyethylene pipe, effective magnetic permeability, magnetic shield, permissible magnetic field level, 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 of National Academy of Sciences of Ukraine. 2013. 550 p. (Rus)
2. Dmitriev M.V. Cable lines laid in polyethylene pipes. Thermal calculation. *Novosti elektrotehniki*. 2013. No. 4 (82). Pp. 11–17. (Rus)
3. Dmitriev M.V. Polymer pipe as a basic element of 6–500 kV cable system. *Seti Rossii*. 2015. No. 6 (33). Pp. 78–83. (Rus)
4. Dmitriev M.V., Ovsianikova A.O. On polyethylene pipes for cable line laying. *Seti Rossii*. 2015. No. 1 (28). Pp. 66–69. (Rus)
5. Electric installation code. Minpalivo Ukrainy, 2010. 776 p. (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. (Rus)
DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.05.003>
7. 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.
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/techned2019.06.013>
9. Farag A.S., Dawoud M.M., Habiballah I.O. Implementation of shielding principles for magnetic field management of power cables. *Electric Power Systems Research*. 1999. 48. Pp. 193–209.
10. Rozov V.Yu., Grinchenko V.S., Tkachenko O.O. Calculation of magnetic field of three-phase cable lines with two-point bonded cable shields covered by ferromagnetic cores. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2017. No 5. Pp. 44–47. (Rus) DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2017.5.06>
11. Rozov V.Yu., 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. (Rus). DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2019.6.07>
12. 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. № 3. Pp. 16–21. (Rus)
13. Comsol multiphysics modeling and simulation software. URL: <http://www.comsol.com/>
14. Jackson J.D. Classical electrodynamics. Moskva: Mir, 1965, 703 p. (Rus)

Надійшла 10.12.2019
Остаточний варіант 29.01.2020