

ТРИВИМІРНА МОДЕЛЬ РОЗРАХУНКУ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ПІДЗЕМНОЇ КАБЕЛЬНОЇ ЛІНІЇ

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

Представлено модель для розрахунку та аналізу тривимірного магнітного поля підземних кабельних ліній з магнітними екранами скінченної довжини, що використовуються для зниження рівня поля на поверхні землі. Екраном може бути, наприклад, об'єм ґрунту, як композиційне середовище з магнітними властивостями, розташоване навколо кабельної лінії. Виконано тестування математичної моделі шляхом порівняння даних комп'ютерних розрахунків з результатами, отриманими за допомогою аналітичного виразу. Наведено чисельні результати, що свідчать про зниження магнітного поля на поверхні землі над кабельною лінією майже в 4 рази при магнітній проникності екрана у вигляді засипного ґрунту $\mu_r \geq 100$. Бібл. 8, рис. 2.

Ключові слова: підземна кабельна лінія, магнітний екран, засипний ґрунт, композиційне середовище, магнітне поле, тривимірне комп'ютерне моделювання.

Вступ. Силові кабелі на високу та надвисоку напруги являють собою значні джерела магнітного поля і здебільшого у безпосередній близькості від свого розташування призводять до перевищення норм електромагнітної впливу [1]. Забезпечення надійної і безпечної роботи кабельних ліній актуально в зв'язку з підтвердженими випадками дії магнітного поля на людей та інші біологічні об'єкти [2].

Для дотримання умов безпеки та захисту населення від впливу магнітного поля електроустановок розроблено стандарти щодо припустимого рівня створюваного ними поля. В Україні гранично-допустимий рівень магнітного поля промислової частоти становить 0,5 мкТ [3].

Зниження рівня магнітного поля кабельних ліній може досягатися різними способами [4], у тому числі за рахунок взаємного розташування кабелів у лінії, вибору послідовності фаз кабелів, застосування магнітних і немагнітних екранів. За необхідності екранування кабельних ліній може здійснюватися на певних ділянках їх прокладання, де кабелі мають перетинання або знаходяться близько до комунікацій, енергетично важливих об'єктів або густонаселених районів.

Для визначення шляхів досягнення припустимого рівня магнітного поля кабельних ліній широко використовується комп'ютерне моделювання [1, 4, 5].

Метою роботи є створення математичних основ та розрахункової комп'ютерної моделі для аналізу тривимірного магнітного поля підземної кабельної лінії з магнітним екраном обмеженої довжини, що виготовлений з композиційного матеріалу з магнітними властивостями і являє собою ґрунт навколо або поблизу кабельної лінії.

Новизна роботи та розробленої моделі обумовлена насамперед обмеженістю довжини магнітного екрана кабельної лінії, а також нетрадиційністю екрана – навколишнього ґрунту як композиційного матеріалу, що може мати різні магнітні властивості.

Математична модель для розрахунку магнітного поля. Розробка моделі здійснена за умови, що розглядається підземна трифазна кабельна лінія, прокладена паралельно поверхні землі. Лінія складається з трьох однофазних кабелів, розташованих трикутником. У жилах кабелів протікає трифазна система струмів, рівномірно розподілених у поперечному перерізі.

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

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

де μ_0 – магнітна постійна; μ_r – відносна магнітна проникність відповідного середовища; $\mathbf{H}_{ext}(x, y, t)$ – напруженість магнітного поля, що створюється нескінченно довгою кабельною лінією за відсутності магнітних екранів. Поле \mathbf{H}_{ext} має лише дві складові (лінія нескінченна вздовж координати z) і визначається згідно з [6] за допомогою наступних виразів:

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

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

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

Зазначимо, що для запису рівняння (1) використовувалось представлення в усій розрахунковій області напруженості магнітного поля як суми потенційної та вихрової складових: $\mathbf{H} = -\nabla V_m + \mathbf{H}_{ext}$, де потенційна складова, що характеризується скалярним магнітним потенціалом V_m і створювана магнітними зарядами в магнітному екрані, визначена в усій розрахунковій області, що є однозв'язною. Як сказано вище, вихрова складова \mathbf{H}_{ext} – це поле струмів у кабелях без магнітного екрана.

Для задачі (1) з урахуванням виразів (2), (3) на всіх зовнішніх границях розрахункової області передбачається виконання умови магнітної ізоляції:

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{B} = 0, \quad (4)$$

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 розрахункової області задається $\mu_r = 1$).

Особливості реалізації математичної моделі. Польова задача (1)–(4) розв'язувалась чисельним методом скінченних елементів у програмі Comsol [7].

Комп'ютерні розрахунки за описаною моделлю виконувалися для моменту часу $t = 0$. Розрахунковим шляхом було встановлено, що розподіл поля в безпосередній близькості від провідників залежить від часу. Проте, оскільки досліджується лише поле вдалині від провідників (а саме на поверхні ґрунту), значення поля практично не залежить від вибору розрахункового моменту часу t .

Можливий також альтернативний варіант розрахунку поля для комплексних значень магнітного потенціалу \dot{V}_m і представлення виразів (2), (3) комплексними величинами. Однак це ускладнює розрахунки, особливо з дрібною тривимірною елементною сіткою в області магнітного екрана.

Тестування програми. Для перевірки правильності комп'ютерної моделі була обрана тонка сферична оболонка з магнітного матеріалу, що має відносну магнітну проникність $\mu_r = const$ і знаходиться в зовнішньому однорідному магнітному полі B_0 . У такому випадку магнітне поле у внутрішній області оболонки B_S є однорідним і визначається за виразом [8]:

$$B_S = \frac{9\mu_r}{(2\mu_r + 1)(\mu_r + 2) - 2(\mu_r - 1)^2 a^3 / b^3} B_0, \quad (5)$$

де a і b – радіуси внутрішньої і зовнішньої сфери оболонки відповідно.

Для обраних значень $\mu_r = 100$, $a = 4$ см, $b = 5$ см у центрі оболонки відношення B_S / B_0 дорівнювало 0,0848 за розрахунком у програмі Comsol та 0,086 – за виразом (5). Така збіжність результатів підтверджує достовірність розробленої моделі.

Результати комп'ютерного моделювання. Виконувався розрахунок магнітного поля трифазної кабельної лінії напругою 330 кВ, прокладеної в ґрунті на глибині 1,5 м паралельно поверхні землі (рис. 1).

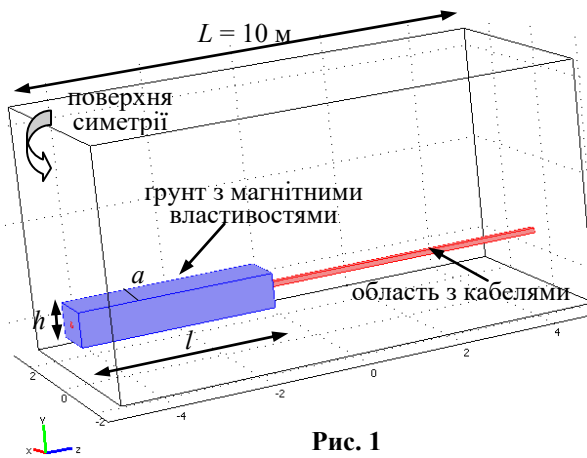


Рис. 1

$\mu_r = 1 - 1000$. Результати моделювання наведено на рис. 2 за умови напівдовжини засипного ґрунту з магнітними властивостями $l = 2$ м, шириною $a = 1$ м, висотою $h = 0,7$ м. Лінія на графіку, що позначена написом $\mu_r = 1$, відповідає власному магнітному полю кабельної лінії без будь-яких засобів екранування.

Дані рис. 2 свідчать, що ефективність застосування екрана у вигляді засипного ґрунту дорівнює приблизно 4 і слабо зростає зі збільшенням значення $\mu_r > 100$. Довжина крайової зони, де магнітне поле збільшується від мінімального до максимального значення, складає приблизно 2 м ($-2 < z < 0$).

Закінчення. У роботі розроблено комп'ютерну модель для визначення та аналізу магнітного поля підземних кабельних ліній з екранами, що являють собою композитне магнітне середовище (ґрунт) обмеженої довжини навколо кабелів. Достовірність моделі підтверджується шляхом порівняння її результатів з даними аналітичних розрахунків.

Чисельна модель реалізована методом скінченних елементів для активної зони кабельної лінії надвисокої напруги 330 кВ із засипним ґрунтом, що має різні магнітні властивості. Показана можливість зниження майже в 4 рази рівня магнітного поля на поверхні землі над кабелями, якщо значення магнітної проникності засипного ґрунту складає не менше 100.

Розроблені комп'ютерні засоби можуть бути застосовані для дослідження магнітного поля підземних кабельних ліній з екранами обмежених розмірів.

Робота фінансувалась частково за держбюджетною темою "Розвинути теорію імпульсних і височастотних 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. Дубицкий С.Д., Грешняков Г.В., Коровкин Н.В. Управление магнитным полем подземной кабельной линии электропередач. *Научно-технические ведомости СПбПУ.* (Естественные и инженерные науки). 2017. Т.23. № 3. С. 88–100.

Фізична модель лінії характеризується симетрією відносно вертикальної поверхні (рис. 1), що дає змогу проводити розрахунок поля лише в половині області, коли напівдовжина екрана – ґрунту з магнітними властивостями – становить l . З урахуванням симетрії ґрунт, що виконує функцію екрана і знаходиться навколо кабельної лінії на обмеженій ділянці, має довжину $2l$ (рис. 1). ґрунт – це композиційне магнітне середовище з магнітною проникністю $\mu_r = var$.

Розраховується магнітне поле кабельної лінії безпосередньо на поверхні землі над кабельною лінією з засипним ґрунтом, що має

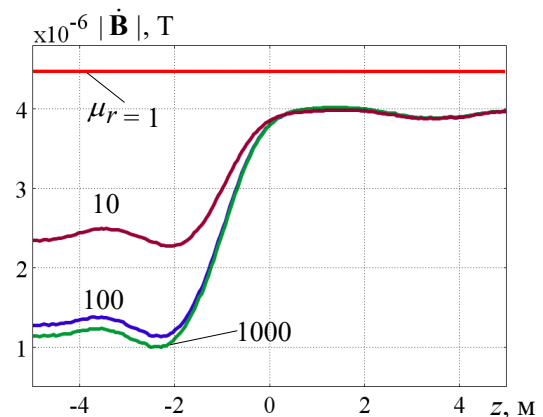


Рис. 2

2. Салтыков В.М. Проблемы электромагнитной безопасности по магнитным полям промышленной частоты от токов кабелей с изоляцией СПЭ. Сайт: RusCable.Ru. 13.02.2018. URL: https://www.ruscable.ru/article/Problemy_elektromagnitnoj_bezopasnosti_SPE/
3. Правила улаштування електроустановок. Мінпаливенерго України, 2010. 776 с.
4. 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>
5. Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Мультифизическое моделирование в электротехнике. К.: Ин-т электродинамики НАН Украины, 2015. 305 с.
6. 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.
7. Comsol multiphysics modeling and simulation software . URL: <http://www.comsol.com/> (дата звернення: 22.06.2020)
8. Джексон Дж. Классическая электродинамика. М.: Мир, 1965. 702 с.

УДК 621.315.2:004.94

ТРЕХМЕРНАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТА МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПОДЗЕМНОЙ КАБЕЛЬНОЙ ЛИНИИ

А.Д. Подольцев, докт. техн. наук, И.Н. Кучерявая, докт. техн. наук

Институт электродинамики НАН Украины,

пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина, e-mail: podol@ied.org.ua

Представлена модель для расчета и анализа трехмерного магнитного поля подземных кабельных линий с магнитными экранами определенной длины, используемыми для снижения уровня поля на поверхности земли. В качестве экрана может быть, например, объем грунта как композиционная среда, обладающая магнитными свойствами и расположенная вокруг кабельной линии. Выполнено тестирование математической модели путем сравнения данных компьютерных расчетов с результатами, полученными с помощью аналитического выражения. Приведены численные результаты, свидетельствующие о снижении магнитного поля на поверхности земли над кабельной линией почти в 4 раза при магнитной проницаемости экрана в виде засыпного грунта $\mu_r \geq 100$. Библ. 8, рис. 2.

Ключевые слова: подземная кабельная линия, магнитный экран, засыпной грунт, композиционная среда, магнитное поле, трехмерное компьютерное моделирование.

THREE-DIMENSIONAL MODEL FOR COMPUTATION OF MAGNETIC FIELD OF UNDERGROUND CABLE LINE

O.D. Podoltsev, I.M. Kucheriava

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,

pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine, e-mail: podol@ied.org.ua

The developed computational model is intended to determine and analyze the three-dimensional magnetic field of underground cable lines with the magnetic shields of a limited length used to reduce the field on the ground. For example, the part of soil which is magnetic composite medium around the cable line can be considered as the magnetic shield. The mathematical model was tested by comparison of computational results with the data obtained by analytical expression. The numerical results show that the magnetic field on the ground over the cable line is reduced almost 4 times when the magnetic permeability of the shield as magnetic composite filling soil is $\mu_r \geq 100$. References 8, figures 2.

Keywords: underground cable line, magnetic shield, filling soil, magnetic composite material, magnetic field, three-dimensional computer modeling.

1. Dubitskii S.D., Greshniakov G.V., Korovkin N.V. Control of magnetic field of underground cable line. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbPU*. (Natural and engineering science). 2017. Vol. 23. No. 3. Pp. 88–100. (Rus)
2. Saltikov V.M. Problems of electromagnetic safety regarding industrial frequency magnetic fields from currents of XLPE insulated cables. Site: RusCable.Ru 13.02.2018. URL: https://www.ruscable.ru/article/Problemy_elektromagnitnoj_bezopasnosti_SPE/ (Rus)
3. Electric installation code. Minpalivo Ukrainy, 2010. 776 p. (Ukr)
4. 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>
5. Podoltsev O.D., Kucheriava I.M. Multiphysics modeling in electrical engineering. Kyiv: Institute of Electrodynamics, Ukrainian Academy of Sciences, 2015. 305 p. (Rus)
6. 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)
7. Comsol multiphysics modeling and simulation software. URL: <http://www.comsol.com/> (accessed: 22.06.2020)
8. Jackson J.D. Classical electrodynamics. John Wiley & Sons. 1962. 702 p.

Надійшла: 25.06.2020

Received: 25.06.2020