

ТЕОРЕТИЧНА ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОФІЗИКА

УДК 621.315.2:004.94

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2020.55.086>**ЕФЕКТИВНІСТЬ ЕКРАНУВАННЯ ПІДЗЕМНОЇ НАДВИСОКОВОЛЬТНОЇ КАБЕЛЬНОЇ ЛІНІЇ ЗА ДОПОМОГОЮ ФЕРОМАГНІТНОГО ЕКРАНА РІЗНОЇ КОНФІГУРАЦІЇ****І.М. Кучерява**

Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна
e-mail: r.irinan@gmail.com

Виконано комп'ютерне моделювання розподілу магнітного поля підземної надвисоковольтної кабельної лінії (330 кВ) з феромагнітним екраном різної форми. Показано, що застосування H-подібного екрана без зазорів дає змогу забезпечити безпечний рівень магнітного поля на поверхні землі над кабелями. Проаналізовано залежність рівня магнітного поля від товщини H-подібного феромагнітного екрана. Бібл. 11, рис. 3.

Ключові слова: підземні кабелі, надвисоковольтна кабельна лінія, феромагнітний екран, безпечний рівень магнітного поля, комп'ютерне моделювання.

Вступ. На сьогодні в усьому світі широко використовуються силові кабелі з поліетиленою ізоляцією на високу і надвисоку напруги [1]. Такі кабелі створюють у навколишньому просторі значне магнітне поле, що потребує засобів захисту з метою зниження рівня поля з урахуванням діючих норм електромагнітної безпеки [2]. Джерелами змінного магнітного поля є струми в металевих елементах кабелів – струми, що наводяться в екранах і протікають у жилах.

Зменшення магнітного поля кабельних ліній високої напруги здійснюється різними способами, у тому числі із застосуванням магнітних, електромагнітних і феромагнітних екранів різних конструкцій [3–5]. Екрани є надійним конструктивним засобом, що дає змогу не тільки послабити магнітне поле, яке створюється силовими кабелями, але й керувати його розподілом у навколишньому середовищі. Керування розподілом магнітного поля навколо кабелів та екранів здійснюється, головним чином, внаслідок їхньої віддаленості один від одного, взаємного розташування, а також форми й розмірів екрана, що використовується.

Ефективність екранування в значній мірі залежить від матеріалів екранів [3, 6]. Це можуть бути електропровідні, магнітні, зокрема, феромагнітні матеріали, що мають різні електрофізичні властивості. Одним із сучасних матеріалів, який застосовується для екранування магнітного поля, є низьковуглецева електросталь Magnetil [7, 8]. Цей матеріал має високу електропровідність ($\sigma = 9,1 \cdot 10^6$ См/м), прийнятні магнітні властивості (магнітну проникність $\mu_r = 3000$) і використовується для виготовлення феромагнітних екранів [8].

Метою даної роботи є дослідження і визначення ефективності екранування підземної надвисоковольтної кабельної лінії (330 кВ) за допомогою феромагнітного екрана, виготовленого з Magnetil'у, який має різну форму і різну товщину.

Ефективність екранування зв'язується з рівнем магнітного поля на поверхні землі безпосередньо над кабельною лінією, а необхідне екранування – з рівнем поля на поверхні землі не більше 0,5 мкТ, що є максимальним значенням безпечного електромагнітного впливу відповідно до санітарних норм [2].

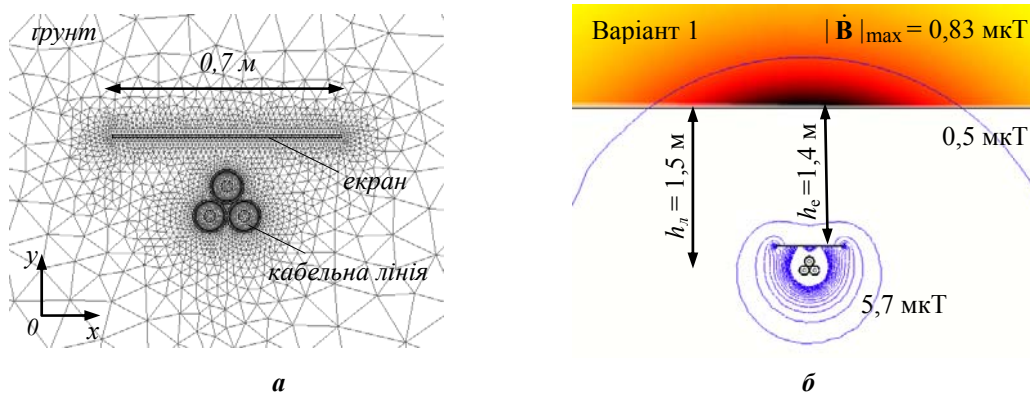


Рис. 1

Дослідження виконується шляхом комп'ютерного моделювання в програмі Comsol [9]. Кабельна лінія, що розглядається, нині діє в Україні, її характеристики представлено в роботі [10].

Математична модель для дослідження. Моделювання магнітного поля проводиться для стаціонарного режиму в двовимірному випадку в декартовій системі координат Oxy (рис. 1 *a*) у припущенні, що кабельна лінія має досить велику довжину і прокладена паралельно поверхні землі.

Польова задача формулюється відносно комплексної величини векторного магнітного потенціалу $\dot{\mathbf{A}} = (0, 0, \dot{A}_z)$ (з єдиною ненульовою складовою $\dot{A}_z(x, y)$) та комплексних величин напруги і струму. Модель ґрунтується на підходах і рівняннях, наведених в роботах [4, 11], і складається з системи інтегро-диференціальних рівнянь загального вигляду:

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

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

У рівняннях (1)–(2): $\omega = 2\pi f$ – 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 (трьох жил, трьох екранів кабелів у кабельній лінії); μ_0 і μ_r – магнітна постійна і відносна магнітна проникність магнітного екрана відповідно ($\mu_r = 1$ для немагнітних елементів); \dot{J}_z – z -складова густини струму.

Рівняння (2) записано на основі закону Кирхгофа 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 кожній жилі кабелю. Вона вважається відомою, рівною струму кабелю в номінальному режимі. Струм \dot{I}_i в металевому екрані кабелю дорівнює нулю. Падіння напруги $\Delta \dot{U}_i$ визначається в провідному середовищі на ділянці одиничної довжини. В області екранів значення $\Delta \dot{U}_i = 0$ (розглядається випадок заземлення екранів з двох кінців). Падіння напруги на жилах – однакові та зміщені за фазою на 120° , їх значення: $\Delta \dot{U}_i = \Delta \dot{U}_{жс} e^{j0}$, $\Delta \dot{U}_i = \Delta \dot{U}_{жс} e^{j2\pi/3}$, $\Delta \dot{U}_i = \Delta \dot{U}_{жс} e^{j4\pi/3}$ відповідно на фазах A, B, C . У наведених виразах $\Delta \dot{U}_{жс}$ задається за умови рівності струмів у жилах номінальному значенню. Розрахунковим шляхом визначено, що в такому випадку розбіжність діючих значень струмів у жилах кабелів становить не більше 5 %.

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

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

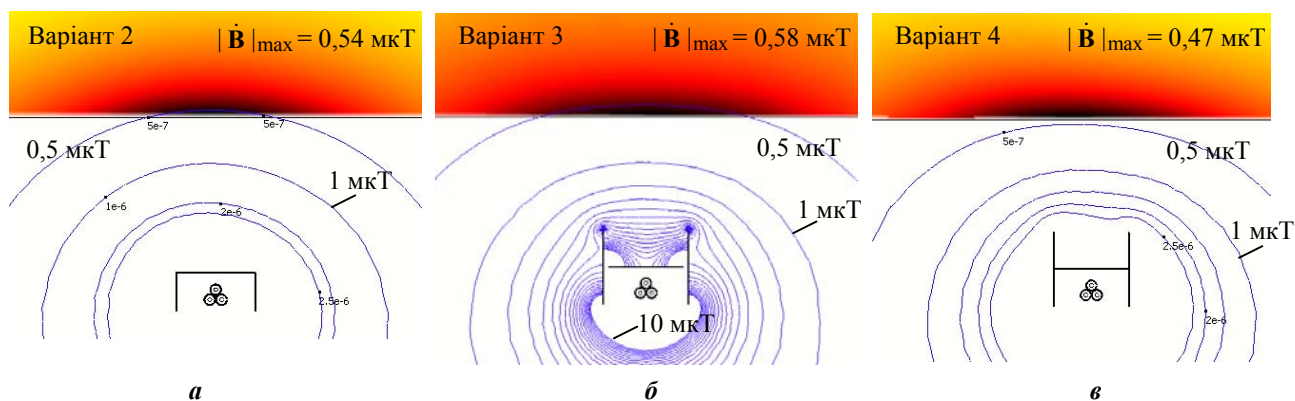


Рис. 2

Результати комп'ютерного моделювання. Математична модель (1)–(3) реалізована в програмі Comsol для кабельної лінії 330 кВ, що складається з кабелів, розташованих трикутником у землі на глибині 1,5 м (рис. 1). Використані в розрахунках характеристики кабелів наведено в статті [9]. Номінальний струм кабельної лінії дорівнює 630 А. Феромагнітний екран (виконаний з матеріалу Magnetil) знаходиться над кабелями в ґрунті на глибині 1,4 м (рис. 1 б).

Фізична модель враховує елементи кожного із трьох кабелів – алюмінієву жилу, мідний екран, поліетиленову ізоляцію і поліетиленову оболонку. У розрахунках задано характеристики ґрунту (електропровідність 10^{-3} См/м), повітря, феромагнітного екрана (товщина в базових розрахунках $\Delta = 8$ мм, надалі $\Delta = \text{var}$). Довжина плоского екрана та елементів Н-подібних екранів – 0,7 м. Довжина горизонтального елемента оберненого U-подібного екрана – 0,7 м, а вертикальних елементів – 0,35 м.

Фрагмент розрахункової області з скінченно-елементною сіткою показано на рис. 1 а. Послідовність фаз кабелів – ABC.

Розглянуто різні форми екрана, починаючи від плоского (рис. 1) до більш складних форм екранів (рис. 2 а–в).

Для випадку плоского екрана розподіл магнітного поля $|\mathbf{B}|$ (у відтинках кольорів та ізолініями) навколо кабельної лінії та екрана представлено на рис. 1 б. Тут відмічена ізолінія, що відповідає безпечному значенню поля 0,5 мкТ, а також максимальне значення $|\mathbf{B}|_{\text{max}} = 0,83$ мкТ вище поверхні землі над кабелями.

На рис. 2 показано розподіл у кольорі магнітної індукції $|\mathbf{B}|$ вище поверхні землі у разі використання різної форми феромагнітного екрана:

- варіант 2 – обернений U-подібний екран (рис. 3 а);
- варіант 3 – Н-подібний екран з проміжками (рис. 3 б);
- варіант 4 – Н-подібний екран без зазорів (рис. 3 в).

На картинах рис. 2 також відмічено ряд контурних ліній, зокрема тих, що відповідають значенням 0,5 та 1 мкТ. Ізолінії свідчать про неоднорідний розподіл поля поблизу екранів, концентрацію поля на кінцях екранів, перевищення безпечного значення на поверхні землі

для екранів варіантів 2 та 3, найкращого екранування в разі використання екрана у варіанті 4. Показано, що Н-подібний екран без проміжків цілком відповідає вимогам електромагнітної безпеки, а інші варіанти вимагають створення зони відчуження, а саме: варіант 1 – зони, що має ширину 4 м; варіант 2 – зони шириною 1,5 м; а варіант 3 – зони шириною приблизно 1,4 м. Зазначимо, що в наведених результатах ширина розглянутих екранів приймалася рівною $\Delta = 8$ мм.

Подальше дослідження проводилось для різної товщини елементів Н-подібного екрана з формою

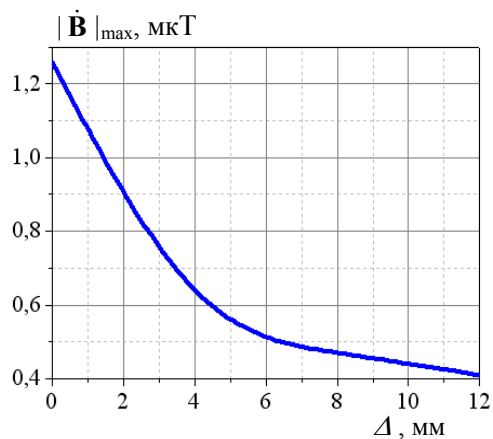


Рис. 3

варіанта 4. Змінення максимального значення магнітної індукції $|\mathbf{B}|_{\max}$ на поверхні землі над кабелями залежно від товщини Δ ферромагнітного екрана у варіанті 4 наведено на рис. 3. Тут нульове значення вздовж горизонтальної осі відповідає випадку кабельної лінії без екранування. Як показано, ферромагнітний екран варіанта 4 з товщиною 12 мм здатен зменшити рівень магнітного поля на поверхні землі більш ніж у 3 рази, а такі екрани з товщиною не менше 6 мм гарантують безпечний рівень магнітного поля на поверхні землі над кабелями.

Висновок. Досліджено особливості розподілу магнітного поля підземної кабельної лінії на напругу 330 кВ у разі використання ферромагнітних екранів різної конфігурації – плоского, оберненого U-подібного, H-подібного екрана з проміжками та без них. Найбільш ефективне екранування з погляду безпечного рівня магнітного поля на поверхні землі забезпечує H-подібний екран без проміжків. Такий тип ферромагнітного екрана, розташованого в ґрунті над кабелями на глибині 1,4 м, з довжиною елементів 0,7 м, товщиною до 12 мм дає змогу зменшити рівень магнітного поля на поверхні землі більш ніж у 3 рази, а товщиною не менше 6 мм не вимагає створення зони відчуження згідно зі стандартами електромагнітної безпеки.

1. Шидловский А.К., Щерба А.А., Золотарев В.М., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Кабели с полимерной изоляцией. К.: Ин-т электродинамики НАН Украины, 2013. 550 с.
2. Правила улаштування електроустановок. Мінпаливенерго України, 2010. 776 с.
3. 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>
4. 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>
5. Доронин М.В., Грешняков Г.В., Коровкин Н.В. Магнитные экраны специальной конструкции. *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета*. 2017. Том 23. № 1. С. 124–133. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.230112>
6. López J.C., and Romero C.R. Influence of different types of magnetic shields on the thermal behavior and ampacity of underground power cables. *IEEE Transactions on Power Delivery*, October 2011. Vol. 26. No. 4. Pp. 2659–2667.
7. https://aktau.arcelormittal.com/news-and-media/news/2013/nov/21112013.aspx?sc_lang=ru-RUwww.rada.com.ua/ (дата звернення: 15.02.2020)
8. 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. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2007.03.137>
9. Comsol multiphysics modeling and simulation software – <http://www.comsol.com/> (дата звернення: 15.02.2020)
10. Лях В.В., Молчанов В.М., Судакова И.В., Павличенко В.П. Кабельная линия напряжением 330 кВ – новый этап развития электрических сетей Украины. *Электрические сети и системы*. 2009. № 3. С. 16–21.
11. Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Многомасштабное моделирование в электротехнике. Киев, Институт электродинамики, 2011. 255 с.

УДК 621.315.2:004.94

ЕФЕКТИВНОСТЬ ЕКРАНИРОВАНИЯ ПОДЗЕМНОЙ СВЕРХВЫСОКОВОЛЬТНОЙ КАБЕЛЬНОЙ ЛИНИИ С ПОМОЩЬЮ ФЕРРОМАГНИТНОГО ЭКРАНА РАЗЛИЧНОЙ КОНФИГУРАЦИИ

И.Н. Кучерявая

Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина

Выполнено компьютерное моделирование распределения магнитного поля подземной сверхвысоковольтной кабельной линии (330 кВ) с ферромагнитным экраном различной формы. Показано, что применение H-подобного экрана без зазоров позволяет обеспечить безопасный уровень магнитного поля на поверхности земли над кабелями. Проанализирована зависимость уровня магнитного поля от толщины H-подобного ферромагнитного экрана. Библ. 11, рис. 3.

Ключевые слова: подземные кабели, сверхвысоковольтная кабельная линия, ферромагнитный экран, безопасный уровень магнитного поля, компьютерное моделирование.

SHIELDING EFFICIENCY FOR UNDERGROUND EXTRA-HIGH VOLTAGE CABLE LINE USING FERROMAGNETIC SHIELD WITH VARIOUS CONFIGURATIONS

I.M. Kucheriava

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine

The computer modeling of the magnetic field distribution for underground extra-high voltage cable line (330 kV) with ferromagnetic shield of various shapes is performed. As shown, the use of H-shaped shield without any gaps gives a possibility to provide the safe level of magnetic field on the ground above the cables. The dependence of magnetic field level on the thickness of H-shaped ferromagnetic shield is analyzed. References 11, figures 3.

Key words: underground cables, extra-high voltage power cable line, ferromagnetic shield, electromagnetic safety, 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.
2. Electric installation code. Minpalivo Ukrainy, 2010. 776 p. (Ukr)
3. 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>
4. 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>
5. Doronin M.V., Greshniakov G.V., Korovkin N.V. Magnetic shields of special design. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo politekhnicheskogo universiteta*. 2017. Vol. 23. No 1. Pp. 124–133. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.230112> (Rus)
6. López J.C., and Romero C.R. Influence of different types of magnetic shields on the thermal behavior and ampacity of underground power cables. *IEEE Transactions on Power Delivery*, October 2011. Vol. 26. No 4. Pp. 2659–2667.
7. https://aktau.arcelormittal.com/news-and-media/news/2013/nov/21112013.aspx?sc_lang=ru-RUwww.rada.com.ua/ (accessed: 15.02.2020)
8. 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. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2007.03.137>
9. Comsol multiphysics modeling and simulation software – <http://www.comsol.com/> (accessed: 15.02.2020)
10. Lyach V.V., Molchanov V.M., Sudakov I.V., Pavlichenko V.P. 330 kV cable line is a new step in development of Ukrainian power networks. *Elektricheskie seti i sistemy*. 2009. No 3. Pp. 16–21.
11. Podoltsev A.D., Kucheriava I.M. Multiscale modeling in electrical engineering. Kyiv: Institute of Electrodynamics, Ukrainian Academy of Sciences, 2011. 255 p. (Rus)

Надійшла 03.03.2020

Received 03.03.2020