

ЕКРАНУВАННЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ПІДЗЕМНОЇ КАБЕЛЬНОЇ ЛІНІЇ ЗА ДОПОМОГОЮ Н-ПОДІБНОГО ЕКРАНА

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

Розглянуто особливості розподілу магнітного поля, що створюється підземною надвисоковольтною (330 кВ) трифазною кабельною лінією в оточуючому середовищі, зокрема навколо кабелів у траншеї та на поверхні землі у разі використання Н-подібного екрана, виготовленого з різних матеріалів – алюмінію, нетекстурованої та низьковуглецевої сталі. Показано найкращу ефективність екранування у разі застосування екрана з алюмінію, що має найбільшу електропровідність. Задля зниження рівня магнітного поля на поверхні землі до регламентованих безпечних значень пропонується використовувати Н-подібний екран з високопровідних немагнітних матеріалів. Бібл. 14, рис. 7.

Ключові слова: підземна надвисоковольтна кабельна лінія, траншейне прокладання, Н-подібний екран, феромагнітний матеріал, високопровідні матеріали, екологічна безпека, комп'ютерне моделювання.

Вступ. У теперішній час інтенсивно вивчаються та впроваджуються різні способи прокладання силових кабелів високої напруги та екранування їхнього магнітного поля [1–4], у тому числі розробляються нові спеціальні конструкції екранів [2]. Зниження рівня магнітного поля для діючих кабельних ліній забезпечується екранами різної форми та виготовлених з різних матеріалів – високопровідних (мідь, алюміній), магнітних (сталь різної марки), у тому числі феромагнітних матеріалів (низьковуглецева електросталь Magnetil [3, 5], текстурована та нетекстурована сталь [6, 7]). Зазначимо, що феромагнітні матеріали мають не тільки магнітні властивості, а й високу електропровідність.

Особлива увага під час спорудження кабельних ліній приділяється питанням екологічної безпеки, зокрема електромагнітної, пов'язаної з рівнем магнітного поля підземних кабелів на поверхні землі над їхнім розташуванням відповідно до нормативного граничного значення магнітного поля промислової частоти 0,5 мкТ [8]. Це пояснюється, перш за все, негативними наслідками дії магнітного поля на здоров'я людей, що знаходяться у зоні впливу, а також руйнівними ефектами в електричному обладнанні, чутливих електронних пристроях та електротехнічних комунікаціях поблизу кабельних ліній.

У роботі [6] описується діюча високовольтна підземна кабельна лінія в Бельгії довжиною 27 км, яка введена в експлуатацію у 2003 р. Будівництво цієї лінії стало можливим завдяки задоволенню вимог під час проектної розробки щодо зменшення рівня магнітного поля на ділянках, де кабелі проходять на відстані менше 30 м від житлових масивів, шкіл, інших місць концентрації людей [6]. Зокрема проектними рішеннями для лінії були екран Н-подібної форми ([6], рис. 1) та горизонтальне розташування кабелів у траншеї задля більш високої пропускної здатності кабелів. Застосований Н-подібний екран складається з двох вертикальних пластин, що встановлювалися перед засипкою, та горизонтальної плити, яка накладалася поверх кабелів на визначеній глибині під час засипання траншеї ґрунтом (рис. 1).

Поряд з горизонтальним розташуванням кабелів широко використовується трикутнікова конфігурація трифазних кабельних ліній, наприклад, в Італії у трьох сучасних кабельних проектах напругою 132 та 380 кВ з ефективним екрануванням магнітного поля, про що повідомляється у роботі [9].

З огляду на практичну важливість зменшення магнітного поля високовольтних кабельних ліній з сучасною поліетиленовою ізоляцією та у зв'язку з актуальністю попереднього теоретичного обґрунтування найбільш прий-

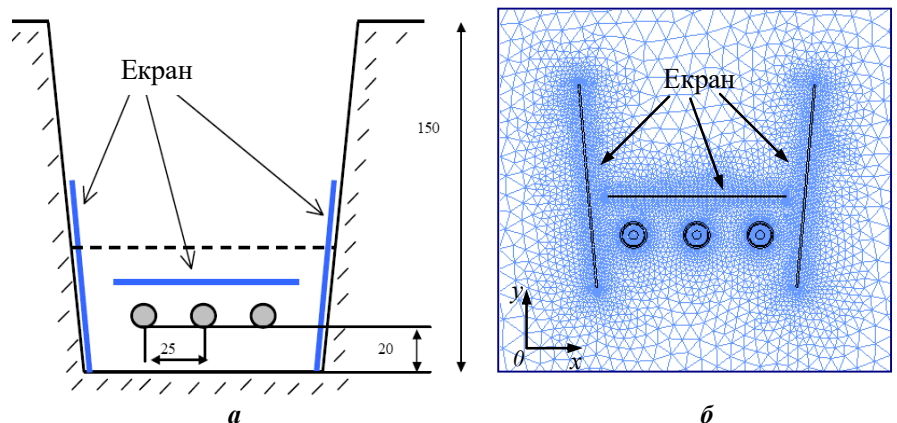


Рис. 1

нятих шляхів досягнення цього, **метою даної роботи** є проведення кількісного аналізу відносно визначення та підвищення ефективності екранування магнітного поля підземної високовольтної (330 кВ) кабельної лінії у разі використання Н-подібного екрана за рахунок змінення вертикального розміру екрана, матеріалу виготовлення, а також різного розташування кабелів у траншеї – в одній площині або трикутником впритул один до одного.

У роботі досліджується саме Н-подібний екран внаслідок того, що він виявився найбільш прийнятним проектним рішенням і на теперішній час застосовується для однієї з сучасних високовольтних кабельних ліній, діючих в Європі [6]. Дослідження проводяться за допомогою комп'ютерного моделювання в програмі Comsol [10] методом скінченних елементів. Трифазна кабельна лінія, що розглядається, складається з однофазних силових кабелів з поліетиленовою ізоляцією, аналогічним надвисоковольтним кабелям, які на теперішній час експлуатуються в Україні [11]. Ефективність екранування визначається за рівнем магнітного поля на поверхні землі безпосередньо над кабельною лінією, а прийнятне екранування – за регламентованим значенням поля.

Всебічне вивчення питань, пов'язаних з екрануванням магнітного поля високовольтних кабельних ліній, поряд з розробленням відповідних програмних методик і підходів до моделювання має актуальність не тільки в науковому плані, але й у практичному контексті, зокрема задля задоволення сучасних вимог електромагнітної екології [12].

Метод дослідження. Задача визначення магнітного поля формулюється для стаціонарного режиму у двовимірному випадку в декартовій системі координат Oxy (рис. 1, б) за умови, що кабельна лінія має досить велику протяжність, прокладена паралельно поверхні землі однаково по всій довжині траси. Задача розв'язується відносно комплексного векторного магнітного потенціалу, що має єдину ненульову z -складову $\dot{\mathbf{A}} = (0, 0, \dot{A}_z)$, та комплексних величин напруги і струму. Модель базується на підходах і рівняннях, наведених у [13], і складається з системи інтегро-диференціальних рівнянь загального вигляду

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

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

де $\omega = 2\pi f$ – кутова частота струму ($f = 50$ Гц); j – уявна одиниця; індекс i відноситься до i -го провідного середовища у розрахунковій області; σ_i – електропровідність i -го середовища (трьох жил, трьох екранів кабелів у кабельній лінії); μ_0 і μ_r – постійна і відносна магнітна проникність магнітного екрана, відповідно; $\mu_r = 1$ для немагнітних елементів; для екранів з феромагнітних матеріалів використовується нелінійна залежність $\mu_r = \mu_r(B)$, (B – магнітна індукція); \dot{J}_z – z -складова густини струму.

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 кожній жилі кабелю. Струми в жилах кабелів зміщені за фазою на 120° та однакові за амплітудою, що дорівнює струму в номінальному режимі. Струм \dot{I}_i в металевому екрані кабелю дорівнює нулю. Падіння напруги $\Delta \dot{U}_i$ визначається у провідному середовищі на ділянці одиничної довжини. В області екранів задається значення $\Delta \dot{U}_i = 0$. Падіння напруги на жилах однакові та зміщені за фазою, їхні значення: $\Delta \dot{U}_i = \Delta \dot{U}_{жe} e^{j\theta}$, $\Delta \dot{U}_i = \Delta \dot{U}_{жe} e^{j2\pi/3}$, $\Delta \dot{U}_i = \Delta \dot{U}_{жe} e^{j4\pi/3}$ – відповідно у фазах A, B, C . У наведених виразах $\Delta \dot{U}_{жe}$ задається за умови рівності струмів у жилах номінальному значенню. Загалом, математична модель аналогічна моделі, описаній у роботах [3, 4].

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

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

Результати комп'ютерного моделювання. Характеристики досліджуваної кабельної лінії та екрана наведено у статтях [6, 11] і показано на рис. 1, а. Згідно з [7] електропровідність магнітних матеріалів екрана становить: низьковуглецевої сталі – 6,5 МСм/м, нетекстурованої сталі – 2,3 МСм/м. Електропровідність алюмінію – 38 МСм/м.

Фізична модель враховує такі елементи кожного з трьох кабелів – алюмінієву жилу, мідний екран, поліетиленову ізоляцію та поліетиленову оболонку. У програмі задаються характеристики ґрунту (електропровідність 10^{-3} См/м), повітря, а також Н-подібного екрана: його товщина – 8 мм; довжина горизонтального елемента – 0,7 м; довжина двох вертикальних елементів – 0,8 м; нахил вертикальних елементів – 5^0 ; проміжок між вертикальними елементами та горизонтальною плитою на її рівні – ~ 1 см. Як зазначено у [6], на практиці залишається навіть більший проміжок (до декількох сантиметрів) між горизонтальним та вертикальними елементами Н-подібного екрана задля полегшення виявлення на практиці пошкоджень оболонки кабелів та їхнього ремонту.

Фрагмент розрахункової області поблизу траншеї зі скінченно-елементною сіткою показано на рис. 1, б. Послідовність фаз кабелів – АВС (зліва направо). У розрахунках номінальний струм кабельної лінії – 630 А [11].

На першому етапі досліджено вплив нелінійності магнітної проникності феромагнітних матеріалів екрана $\mu_r = \mu_r(B)$ на рівень магнітного поля, що розраховується. На рис. 2 показано залежності відносної магнітної проникності низьковуглецевої сталі (крива 1) та нетекстурованої сталі (крива 2) від магнітної індукції [7]. Як видно, магнітна проникність нетекстурованої сталі вище і змінюється у більш високому ступені, ніж аналогічна залежність для низьковуглецевої сталі, що має впливати на рівень магнітного поля.

Рис. 3 показує змінення магнітної індукції вздовж поверхні землі над кабелями горизонтального прокладання з Н-подібним екраном, виготовленим з нетекстурованої сталі, за магнітної проникності екрана: 1 – $\mu_r = \mu_{r\max} = 6300$; 2 – $\mu_r = \mu_{r\text{ср}} = 3700$; 3 – $\mu_r = \mu_r(B)$ згідно з рис. 2 (крива 2). Вибрано: $\mu_{r\max}$ – максимальне значення магнітної проникності матеріалу; $\mu_{r\text{ср}}$ – середнє значення μ_r матеріалу. Показано, що неврахування нелінійності магнітних властивостей матеріалу призводить до збільшення максимального значення поля майже у 1,2 рази. Тому в подальших розрахунках використовуються залежності $\mu_r = \mu_r(B)$ (рис. 2).

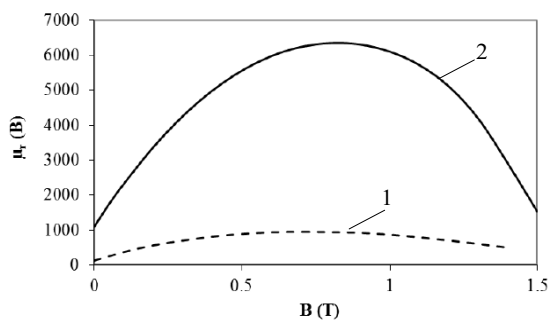


Рис. 2

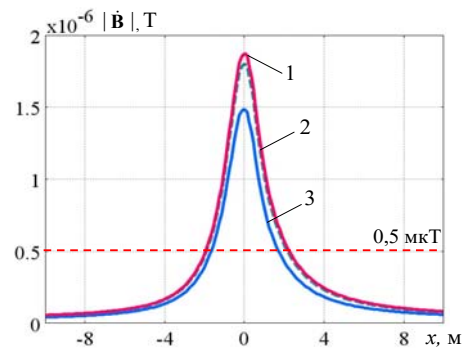


Рис. 3

Рис. 4 ілюструє змінення магнітної індукції вздовж поверхні землі над кабелями горизонтального прокладання з Н-подібним екраном, виготовленим з різних матеріалів: нетекстурованої сталі (крива 1); низьковуглецевої сталі (крива 2); алюмінію (крива 3). Штрих-пунктирною лінією відмічено рівень гранично припустимого поля 0,5 мкТ. Як видно, безпечний рівень магнітного поля реалізується у разі використання алюмінієвого екрана (крива 3). Особливістю цього матеріалу у порівнянні з розглянутими феромагнітними є його висока електропровідність. Отримані розрахункові дані узгоджуються за порядком величини магнітної індукції з результатами, наведеними у роботах [4, 14]. До того ж коефіцієнт екранування (як відношення максимальної індукції магнітного поля на поверхні землі над кабелями з екраном до аналогічного значення поля у відсутності екрана) для сталевих екранів у досліджуваному випадку дорівнює $k \approx 2,3$. Такий коефіцієнт більше, ніж для плоского екрана з феромагнітного матеріалу – електросталі Магнетіл (Magnetil), у разі якого $k \approx 1,7$ згідно з даними [3].

Відносно залежностей на рис. 4 слід відзначити два відомі механізми зменшення магнітного поля, описані, наприклад, у [14]. Для екранів з матеріалів, що мають високу електропровідність, – це "eddy current cancellation" (скорочення вихрових струмів). У такому випадку струми, що наводяться у провіднику, створюють магнітне поле, яке частково зменшує магнітне поле джерела. Для матеріалів з високою магнітною проникністю діє механізм "flux shunting" (шунтування потоку), коли магнітний потік від джерела направляється в магнітний матеріал з області екранування. Відіграє свою роль і ін-

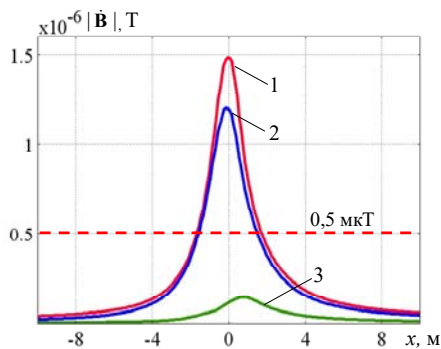


Рис. 4

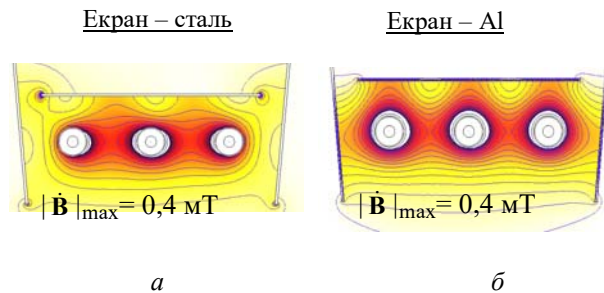


Рис. 5.

ший аспект – магнітні екрани забезпечують найбільше зменшення магнітного поля поблизу джерела, а високопровідні матеріали – на досить значній відстані від джерела поля.

На рис. 5 показано розподіл магнітного поля в траншеї поблизу кабелів у разі виконання екрана з нетекстурованої або низьковуглецевої сталі (рис. 5, а) та алюмінієвого екрана (рис. 5, б) за однаковим максимальним значенням поля у цій області $|\dot{B}|_{\max} = 0,4$ мТ. Такі картини характеризують, перш за все, роль в екрануванні поля горизонтальної пластини Н-подібного екрана. Крім того, дані рис. 5 відображають особливості зменшення магнітного поля екранами з різних матеріалів. У випадку сталевих екранів (рис. 5, а) лінії поля відклоняються від нього, збільшуючи поле на деякій відстані від екрана, а алюмінієвий екран змінює конфігурацію поля, послаблюючи його у своїй безпосередній близькості (рис. 5, б).

Далі досліджуються шляхи зменшення магнітного поля у разі використання екрана з нетекстурованої сталі, що є найменш прийнятним, але широко застосованим матеріалом (наприклад, [7]) для екранування (рис. 4, крива 1). Додаткові розрахунки з різними розмірами вертикальних пластин екрана показали, що змінюючи довжину вертикальними елементами, їхнє більше чи менше заглиблення у ґрунт не є ефективним і не надає можливості досягти безпечних значень поля на поверхні землі над кабелями.

Для конфігурації Н-подібного екрана без проміжків між вертикальними пластинами і горизонтальною плитою розглядаються два варіанти: горизонтальне розміщення кабелів та кабелі у вигляді трикутника. Залежності на рис. 6 ілюструють змінення магнітної індукції вздовж поверхні землі над кабелями горизонтального прокладання з екраном без проміжків, виготовленим з нетекстурованої сталі, у разі горизонтального положення кабелів (крива 1) та розташування трикутником (крива 2). Видно, що більш прийнятним є трикутне розміщення кабелів, що підтверджується картиними на рис. 7, але й воно повністю не забезпечує припустимі значення магнітного поля за діючими нормами (рис. 6). Зона відчуження над кабелями згідно з нормами електромагнітної безпеки [9] має бути до 4 м.

На рис. 7 показано розподіл магнітного поля навколо кабелів у разі виконання екрана з нетекстурованої сталі за горизонтального розташування кабелів (рис. 7, а) та їхнього розміщення трикутником (рис. 7, б). Для трикутничкової конфігурації характерним є більш сконцентрований навколо кабелів розподіл магнітного поля з дещо більшим максимальним значенням, а для розташування кабелів в одній площині маємо більш рівномірний розподіл поля в траншеї під горизонтальною плитою.

Висновки. З метою кількісного дослідження шляхів зниження рівня магнітного поля надвисоковольтної підземної кабельної лінії в оточуючому середовищі виконано комп'ютерне моделювання за умови використання Н-подібного екрана з різними розмірами нахилених вертикальних елементів та виконаного з різних матеріалів, що застосовуються на практиці, – високопровідного немагніт-

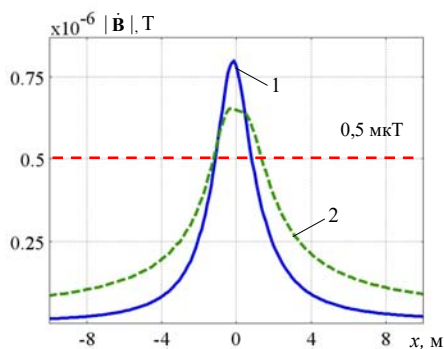


Рис. 6.

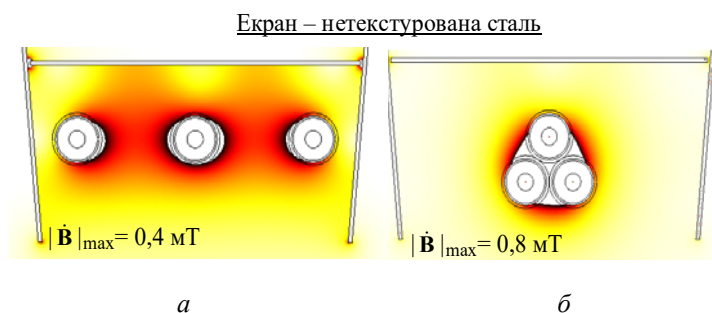


Рис. 7.

ного (алюміній) та ферромагнітних матеріалів (нетекстурованої та низьковуглецевої сталі), а також за різним розташуванням кабелів у траншеї – в одній площині та трикутником впритул один до одного. Показано, що ефективність екранування за допомогою Н-подібного екрана залежить від матеріалу екрана та розміщення силових кабелів у кабельній лінії. Обґрунтовано необхідність урахування в розрахунках нелінійності магнітної проникності магнітних екранів з метою уникнення завищених значень магнітного поля. Виявлено найбільшу ефективність екранування магнітного поля у разі застосування екрана з алюмінію, що має найбільшу з розглянутих матеріалів електропровідність. Н-подібний екран саме з цього немагнітного матеріалу забезпечує безпечний рівень магнітного поля на поверхні землі над кабелями навіть у разі проміжків між вертикальними пластинами та горизонтальною плитою екрана.

Незважаючи на високу вартість алюмінію у порівнянні з більшістю ферромагнітних матеріалів [7], для підземних кабельних ліній екран з цього матеріалу має ще одну важливу з практичної точки зору перевагу – більшу корозійну стійкість.

Роботу виконано за держбюджетною темою "Розвинути теорію імпульсних і високочастотних перехідних електромагнітних процесів у енергетичних і технологічних резонансних установках та високовольтних кабельних лініях електропередачі" (Шифр "ЕЛКАБ"), КПКВК 6541230.

1. Electrical power cable engineering. Third Edition, ed. by W.A. Thue. CRC Press, 2011. 460 p.
2. Доронин М.В., Грешняков Г.В., Коровкин Н.В. Магнитные экраны специальной конструкции. *Научно-техн. ведомости Санкт-Петербургского гос. политехн. ун-та*. 2017. Т. 23. № 1. С. 124–133. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.230112>
3. Кучерявая И.Н. 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>
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. 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>
6. Gille A., Beghin V., Geerts G., Hoeffelman J., Liémans D., Van Gucht K. Double 150 kV link, 32 km long, in Belgium: design and construction. *Cigre Session*. 2004. Paper B1-305. 8 p.
7. Del-Pino-Lopez J.C., Cruz-Romero P., Serrano-Iribarnegaray L. Impact of electromagnetic losses in closed two-component magnetic shields on the ampacity of underground power cables. *Progress in Electromagnetics Research*. 2013. Vol. 135. Pp. 601–625. DOI: <https://doi.org/10.2528/PIER12112303>
8. Правила улаштування електроустановок. Київ: Мінпаливенерго України, 2010. 776 с.
9. Conti R., Donazzi F., Maioli P., Rendina R., Sena E.A. Some Italian experiences in the utilization of HV underground cable systems to solve local problems due to magnetic field and other environmental issues. *Cigre Session*. 2006. Paper C4-303.
10. Comsol multiphysics modeling and simulation software. URL: <http://www.comsol.com/> (дата звернення: 25.03.2020).
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. Bravo-Rodriguez J.C., Del-Pino-Lopez J.C., Cruz-Romero P. A survey on optimization techniques applied to magnetic field mitigation in power systems: review. *Energies*. 2019. No. 12. 1332. 20 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/en12071332>
13. Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Мультифизическое моделирование в электротехнике. К.: Ін-т електродинаміки НАН України, 2015. 305 с.
14. Del-Pino-Lopez J.C., Cruz-Romero P., Dular P. Parametric analysis of magnetic field mitigation shielding for underground power cables. *The Renewable Energy & Power Quality Journal (RE&PQJ)*. March 2007. Vol. 1. No 5. Pp. 519–526. DOI: <https://doi.org/10.24084/repqi05.326>

ЭКРАНИРОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПОДЗЕМНОЙ КАБЕЛЬНОЙ ЛИНИИ С ПОМОЩЬЮ Н-ОБРАЗНОГО ЭКРАНА

И.Н. Кучерявая, докт. техн. наук

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

e-mail: rB.iran@gmail.com

Рассмотрены особенности распределения магнитного поля, создаваемого подземной сверхвысоковольтной (330 кВ) трехфазной кабельной линией в окружающей среде, в частности, вокруг кабелей в траншее и на поверхности земли в случае применения Н-образного экрана, изготовленного из различных материалов – алюминия, нетекстурированной и низкоуглеродистой стали. Показана наилучшая эффективность экранирования при использовании алюминиевого экрана, который имеет наибольшую электропроводность. Для снижения уровня магнитного поля на поверхности земли вплоть до регламентированных безопасных значений предлагается применять Н-образный экран из высокопроводящих немагнитных материалов. Библ. 14, рис. 7.

Ключевые слова: подземная сверхвысоковольтная кабельная линия, траншейная прокладка, Н-образный экран, ферромагнитный экран, высокопроводящие материалы, экологическая безопасность, компьютерное моделирование.

MAGNETIC FIELD SHIELDING OF UNDERGROUND POWER CABLE LINE BY H-SHAPED SHIELD

I.M. Kucheriava

Institute of Electrodynamics of National Academy of Sciences of Ukraine

pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine, e-mail: rB.iran@gmail.com

In the article the magnetic field distributions, generated by underground extra-high voltage (330 kV) three-phase power cable line in the environment, in particular near the cables in the trench and on the ground, are analyzed for using of H-shaped shield made of different materials including aluminum, low carbon steel and non-oriented grain steel. As shown, the best shielding effectiveness is realized by aluminium shield. The H-shaped shield made of high-conducting non-magnetic materials is proposed to use in order to mitigate the magnetic field level on the ground down to regulated nonhazardous values. References 14, figures 7.

Key words: underground extra-high voltage power cable line, trench cable laying, H-shaped shield, ferromagnetic shield, high-conducting materials, ecological safety, computer modeling.

1. Electrical power cable engineering. Third Edition, ed. by W.A. Thue. CRC Press, 2011. 460 p.
2. 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)
3. 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/techmed2019.06.013>
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/techmed2019.05.003>
5. 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>
6. Gille A., Beghin V., Geerts G., Hoeffelman J., Liémans D., Van Gucht K. Double 150 kV link, 32 km long, in Belgium: design and construction. *Cigre Session*. 2004. Paper B1-305. 8 p.
7. Del Pino J.C., Cruz-Romero P., Serrano-Iribarnegaray L. Impact of electromagnetic losses in closed two-component magnetic shields on the ampacity of underground power cables. *Progress in Electromagnetics Research*. 2013. Vol. 135. Pp. 601–625. DOI: <https://doi.org/10.2528/PIER12112303>
8. Electric installation code. Kyiv: Minpalivo Ukrainy, 2010. 776 p. (Ukr)
9. Conti R., Donazzi F., Maioli P., Rendina R., Sena E.A. Some Italian experiences in the utilization of HV underground cable systems to solve local problems due to magnetic field and other environmental issues. *Cigre Session*. 2006. Paper C4-303.
10. Comsol multiphysics modeling and simulation software. URL: <http://www.comsol.com/> (accessed at 25.03.2020)
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. Bravo-Rodriguez J.C., Del-Pino-Lopez J.C., Cruz-Romero P. A survey on optimization techniques applied to magnetic field mitigation in power systems: review. *Energies*. 2019. No 12. 1332. 20 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/en12071332>
13. Podoltsev A.D., Kucheriava I.M. Multiphysics modeling in electrical engineering. Kyiv: Institute of Electrodynamics, Ukrainian Academy of Sciences, 2015. 305 p. (Rus)
14. Del-Pino-Lopez J.C., Cruz-Romero P., Dular P. Parametric analysis of magnetic field mitigation shielding for underground power cables. *The Renewable Energy & Power Quality Journal (RE&PQJ)*. March 2007. Vol. 1. No 5. Pp. 519–526. DOI: <https://doi.org/10.24084/repqj05.326>

Надійшла 29.04.2020

Остаточний варіант 23.06.2020