

УДК 621.315.2:004.94

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2021.60.012>

РОЗПОДІЛ МАГНІТНОГО І ТЕПЛОВОГО ПОЛІВ ТА ВТРАТИ ПОТУЖНОСТІ В ЕЛЕКТРОМАГНІТНОМУ ЕКРАНІ ПІДЗЕМНОЇ ДВОКОЛОВОЇ КАБЕЛЬНОЇ ЛІНІЇ

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

У роботі виявлено особливості розподілу магнітного поля та температури в елементах підземної двоковолової надвисоковольтної кабельної лінії та навколо неї за наявності горизонтально розташованого алюмінієвого екрана, що знаходиться на різній відстані від кабелів і має різну товщину. Досліджено закономірності розподілу магнітного поля та температури в екрані. Для розглянутих випадків джоулеві втрати в зовнішньому екрані складають не більше 3 % від втрат у кабелях. Проведено порівняння основних електромагнітних характеристик для алюмінієвого екрана (коефіцієнт екранування до 1,94) та екрана, що має меншу електропровідність (коефіцієнт екранування до 1,2). За допомогою чисельних результатів показано, що екран більшої товщини сприяє можливості збільшення пропускної спроможності кабельної лінії за рахунок меншого нагріву, а струмове навантаження кабельної лінії залежить від відстані екрана до кабелів внаслідок зміння їхньої максимальної температури від цієї відстані. Бібл. 15, рис. 7, таблиця.

Ключові слова: підземна двоколова кабельна лінія, електромагнітний екран, ефективність екранування, магнітне поле, температурне поле, джоулеві втрати, комп'ютерне моделювання.

Вступ. Високовольтні кабельні лінії є джерелами небезпечного магнітного поля, що здатні впливати на здоров'я людей, роботу електричного обладнання, чутливих електронних пристроїв та електротехнічних комунікацій, які знаходяться поблизу силових кабелів. Останнім часом особливу увагу дослідники приділяють високовольтним підземним кабельним лініям. Саме такі лінії мають широке застосування в густонаселених районах міст, на важливих промислових та енергетичних об'єктах [1].

Для зменшення рівня магнітного поля високовольтних кабелів передбачаються різні конструктивні засоби та спеціальні методи, в тому числі здійснюється екранування поля за допомогою електромагнітних і магнітних екранів різної конфігурації [2–5]. Сучасні одно- та двоковолі кабельні лінії досліджуються і проектуються з елементами екранування магнітного поля при розташуванні кабелів як в одній площині, так і трикутником (рис. 1 а) [4–6].

У статті [7] виявлено ефективну дію плоских екранів у вигляді листів з провідних матеріалів, що розміщуються над підземними кабелями, особливо у разі мінімальної відстані від них. У роботах [8, 9] досліджено та визначено більшу ефективність екранування при використанні екрана з високопровідних матеріалів (міді або алюмінію) порівняно з феромагнітними екранами.

В усіх країнах світу екранування магнітного поля та зменшення його до нормативних значень є необхідною вимогою експлуатації кабельних ліній. В Україні допустимий рівень поля промислової частоти складає 0,5 мкТл усередині житлових приміщень та 10 мкТл на території зони житлової забудови [10, п. 2.3.51, табл. 2.3.2, с. 249]. Забезпечення санітарних норм є особливо важливим у випадку сумісного прокладання декількох високовольтних кабельних ліній або в складі блочного кабельного спорудження.

На етапі передпроектного дослідження та проектування кабельних ліній заходи щодо зменшення рівня зовнішнього магнітного поля зазвичай здійснюються за умови попереднього аналізу температурного стану кабелів шляхом мультифізичного моделювання електромагнітного та температурного полів [11]. Це пояснюється тим, що струм навантаження кабельних ліній визначається за допустимою температурою кабелів. Згідно зі стандартом [12] для кабелів з поліетиленовою ізоляцією робоча температура не повинна перевищувати 90⁰С.

Нарівні з ефективністю екранування і температурою кабелів враховуються втрати потужності в екрані. Як правило, найбільш придатним визнається той екран, що має не тільки

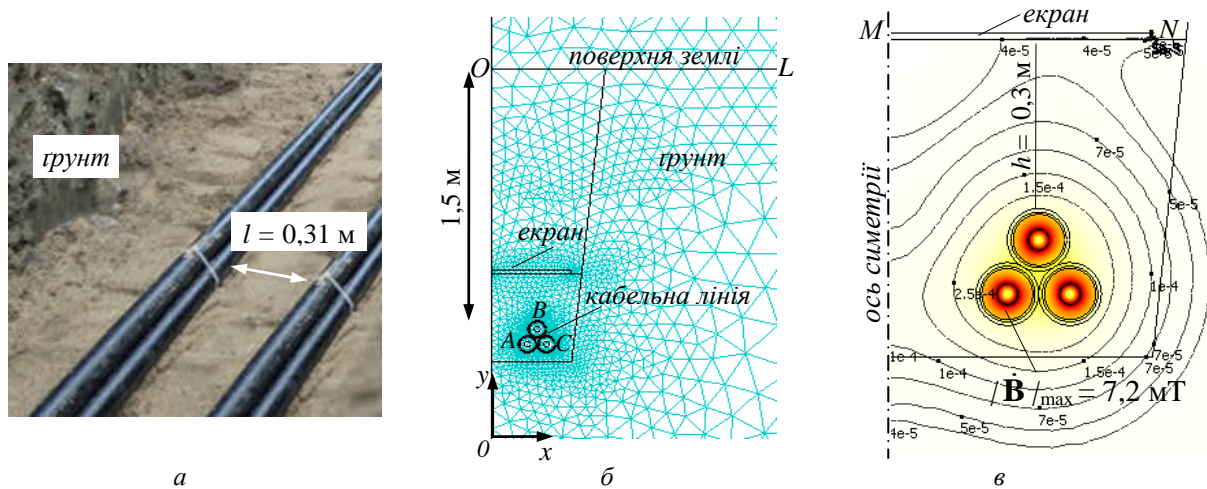


Рис. 1

високу ефективність екранування, а й низькі втрати. Тому ці питання вивчаються комплексно [9, 13]. У випадку магнітних екранів досліджуються загальні втрати, що складаються з втрат на гістерезис, втрат на вихрові струми та додаткових втрат [9, 13].

Важливість визначення температури кабелів та мінімізації втрат пов'язана з двома суттєвими аспектами, які необхідно досліджувати разом і враховувати при проектуванні. Втрати можуть призводити до підвищення температури провідників і, як наслідок, до зменшення струму кабелів, а також до збільшення витрат у перебігу експлуатації кабельних ліній.

У роботі [9] на основі сумісного розв'язання електромагнітної та теплової задач проаналізовано вплив втрат у замкнених магнітних екранах на пропускну спроможність підземної кабельної лінії з різною конфігурацією кабелів (трикутником та в одній площині). Показано зв'язок між електрофізичними/геометричними характеристиками екранів та рівнем зменшення магнітного поля і навантаженням за струмом при врахуванні загальної вартості екрана (вартості матеріалу разом з витратами за час роботи кабельних ліній).

Авторами статті [13] досліджено ефективність та електромагнітні втрати в магнітних замкнених екранах (з різних матеріалів), що оточують трифазну високовольтну кабельну лінію, залежно від розміру екранів і амплітуди струму кабелів. Показано, що трикутнікова конфігурація кабелів у лінії порівняно з їхнім розташуванням в одній площині є більш оптимальною внаслідок менших втрат і можливості забезпечення більшої ефективності екранів.

Усе відмічене зумовлює актуальність одержання нових знань та проведення поглиблених досліджень відносно електромагнітних і теплових процесів у сучасних високовольтних та надвисоковольтних кабельних лініях, а також шляхів підвищення їхньої пропускну спроможності з урахуванням геометричних характеристик і розміщення зовнішнього екрана відносно кабелів, втрат в екрані і, як наслідок, рівня його нагріву. Саме на цьому зосереджується ця стаття.

Метою роботи є кількісне дослідження особливостей розподілу магнітного та температурного полів двофазної надвисоковольтної (330 кВ) кабельної лінії траншейного прокладання з плоским електромагнітним екраном, а також визначення залежності пропускну спроможності лінії від товщини і положення екрана відносно кабелів з урахуванням при цьому їхньої температури та втрат в екрані.

У роботі як електромагнітні екрани розглядаються провідні екрани з немагнітних матеріалів (до прикладу, феромагнітні екрани мають теж провідні властивості).

Кабельна лінія, що досліджується, має два кола, кожен з яких складається з однофазних кабелів з ізоляцією зі зшитого поліетилену, розташованих трикутником у землі на глибині 1,5 м (рис. 1 а, б). На теперішній час аналогічна кабельна лінія експлуатується в Україні [14].

Якісний та кількісний аналіз магнітного поля та характерних особливостей його розподілу поблизу кабелів та всередині екрана є одним з важливих елементів поглибленого вивчення сучасних високовольтних кабельних ліній із засобами екранування і передбачається першою частиною мети роботи. Дослідження у цьому напрямку проводяться в статті методом комп'ютерного моделювання за допомогою програмного забезпечення Comsol [15].

Метод та модель для дослідження. Електромагнітна та теплова задачі формуються для усталеного режиму в двовимірному випадку в декартовій системі координат Oxy (рис. 1 б, в) у припущенні, що умови прокладання кабельної лінії однакові по всій довжині траси, а всі матеріали у фізичній моделі мають сталі електричні властивості (відповідно до довідникових даних за температури 20°C), як наприклад, у [13].

Електромагнітна задача розв'язується відносно невідомого комплексного векторного магнітного потенціалу з єдиною ненульовою z -складовою $\dot{\mathbf{A}} = (0, 0, \dot{A}_z)$.

Математична модель базується на підходах і рівняннях, наведених у [11], і складається з системи інтегро-диференціальних рівнянь загального вигляду:

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

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

де $\omega = 2\pi f$ – кутова частота струму ($f = 50$ Гц); \dot{J} – уявна одиниця; індекс i відповідає i -му провідному середовищу в розрахунковій області; σ_i – електропровідність i -го середовища (жил, екранів кабелів у кабельних лініях); μ_0 і μ_r – магнітна постійна і відносна магнітна проникність магнітного екрана (у разі його наявності) відповідно; $\mu_r = 1$ для немагнітних екранів; \dot{J}_z – z -складова густини струму.

Рівняння (1)–(2) містять комплексні величини напруги і струму, зокрема, 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 відповідного кабелю. Падіння напруги на жилах розраховуються за виразами: $\Delta\dot{U}_i = \Delta\dot{U}_{\text{жс}}e^{j0}$, $\Delta\dot{U}_i = \Delta\dot{U}_{\text{жс}}e^{j2\pi/3}$, $\Delta\dot{U}_i = \Delta\dot{U}_{\text{жс}}e^{j4\pi/3}$ – відповідно у фазах A, B, C .

Детальна інформація відносно складових і особливостей моделі представлена в роботах [2, 3].

Математична модель (1)–(2) розроблена для загального випадку провідних середовищ, якими є жили, екрани кабелів і земля, а також для різних режимів – симетричної системи струмів (тоді $\Delta\dot{U}_i = 0$ в ґрунті) або несиметричного режиму (наприклад, одне навантаження відключено).

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

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

Вектор магнітної індукції $\dot{\mathbf{B}} = \text{rot}\dot{\mathbf{A}}$. Його складові визначаються як $\dot{B}_x = \partial\dot{A}_z/\partial y$; $\dot{B}_y = -\partial\dot{A}_z/\partial x$. У роботі досліджується розподіл діючого значення магнітного поля $|\dot{\mathbf{B}}| = \sqrt{|\dot{B}_x|^2 + |\dot{B}_y|^2} / \sqrt{2}$.

Стационарне поле температури T описується диференціальним рівнянням:

$$-\nabla \cdot (\lambda \nabla T) = Q, \quad (4)$$

де λ – теплопровідність відповідного матеріалу (середовища); $Q(x, y)$ – потужність теплових джерел, до яких відноситься Джоулево тепло, що виділяється в провідниках кабелів і визначається за загальною формулою:

$$Q = \dot{J} \cdot \dot{J}^* / \sigma,$$

де $\dot{J} = -j\omega\sigma\dot{A}_z$ – діюче значення густини струму; \dot{J}^* – комплексно-сполучена величина густини струму \dot{J} .

Зв'язок двох задач різної фізичної природи реалізується через величину Q , яка знаходиться шляхом розв'язання електромагнітної задачі і використовується в тепловій задачі. Внаслідок прийнятої сталої електропровідності матеріалів у рівняннях (1), (2) описані задачі є слабо зв'язаними за класифікацією мультифізичних задач [11]. У загальному випадку електропровідність разом з теплофізичними властивостями матеріалів, зокрема, теплопровідністю, а для нестационарних теплових задач з густиною і теплоємністю можуть розглядатися як функції температури, при цьому сумісно (а не послідовно) розв'язуються сильно зв'язані мультифізичні задачі [11] з урахуванням взаємного впливу магнітного і теплового полів [9].

Граничні умови теплової задачі (4) задаються наступним чином. На осі симетрії області: $\mathbf{n} \cdot (\lambda \nabla T) = 0$; на поверхні землі умова теплообміну: $-\mathbf{n} \cdot (\lambda \nabla T) = k(T - T_n)$ (k – коефіцієнт тепловіддачі в повітря; T_n – температура повітря; \mathbf{n} – вектор зовнішньої нормалі до границі). З урахуванням значних розмірів розрахункової області та віддаленості активних елементів від інших (неназваних тут) зовнішніх границь, такі границі вважаються ізотермічними – для них задається умова: $T = T_0$, де T_0 – температура навколишнього середовища (грунту).

Результати чисельного моделювання. Технічні характеристики двоколової кабельної лінії та вихідні дані для розрахунків наведено в [14]. Розташування та розміри кабелів представлено на рис. 1.

У комп'ютерній програмі, розробленій на основі моделі (1)–(4), задаються такі дані: кабелі прокладені трикутником в ґрунті на глибині 1,5 м (рис. 1 б), відстань між крайніми кабелями двох окремих ліній 0,31 м; послідовність фаз кабелів показано на рис. 1 б; номінальний струм $I_{ном} = 630$ А; загальна ширина зовнішнього екрана 0,88 м, його товщина для базових варіантів розрахунку $\Delta = 10$ мм (окремо досліджено вплив товщини екрана на рівень магнітного поля); електропровідність ґрунту навколо траншеї 10^{-3} См/м; його теплопровідність $\lambda = 0,3$ Вт/(м·°С), температура ґрунту на глибині розташування кабелів $T_0 = 15^\circ\text{C}$; температура над поверхнею землі $T_n = 20^\circ\text{C}$.

Враховуються такі конструктивні елементи кабелів – алюмінієва жила, поліетиленова ізоляція, мідний екран, зовнішня поліетиленова оболонка. Розмір розрахункової області – 7×14 м відповідно по осях x, y .

Загальний вигляд досліджуваної двоколової кабельної лінії з розташуванням кабелів трикутником представлено на рис. 1 а. Невеликий фрагмент розрахункової області з активними елементами відображено на рис. 1 б разом зі скінченно-елементною сіткою.

На рис. 1 в показано (кольором та ізолініями) розподіл магнітного поля поблизу кабельної лінії і зовнішнього екрана. Наявність екрана впливає на конфігурацію магнітного поля. До того ж виявляється вплив другої, симетрично розташованої кабельної лінії. Максимальне значення магнітної індукції в зоні кабелів у розглянутому випадку дорівнює $|\mathbf{B}|_{\max} = 7,2$ мТл, а найбільше значення поля безпосередньо на поверхні землі над ними – 0,72 мкТл, тобто алюмінієвий екран добре знижує магнітне поле на значній відстані (~1,5 м) від джерел поля, але найменші гранично допустимі значення 0,5 мкТл згідно з нормативами [10, п. 2.3.51] не витримуються. Питання зв'язку максимального значення магнітної індукції в межах досліджуваної кабельної лінії з рівнем поля на поверхні землі над нею вирішується, перш за все, залежно від заглиблення кабелів у ґрунт і в даній роботі не розглядається.

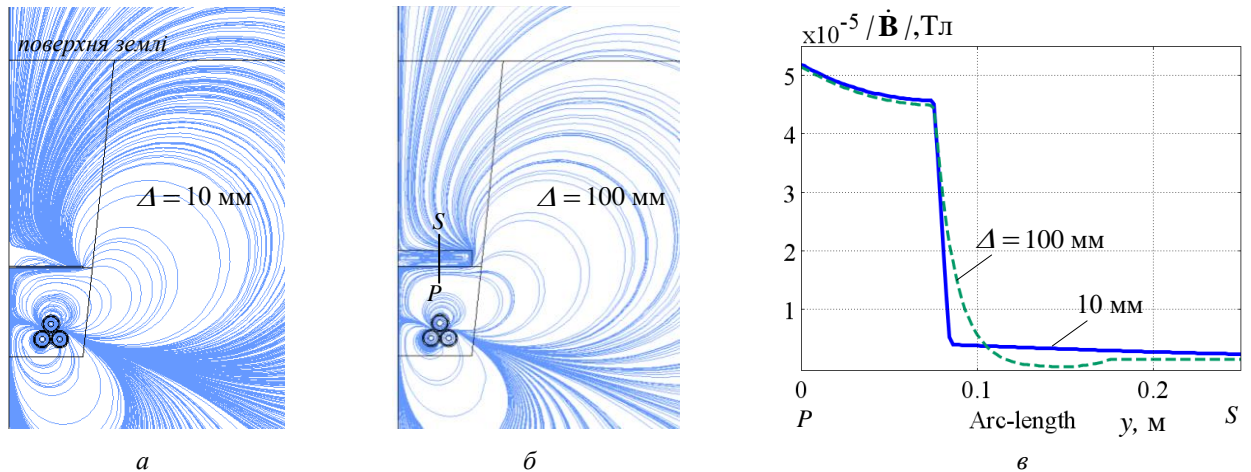


Рис. 2

У разі, коли екран відсутній ($\Delta = 0$), $|\dot{\mathbf{B}}|_{\max} = 1,24$ мкТл на поверхні землі. Коефіцієнт екранування як відношення максимальної індукції магнітного поля на поверхні землі над кабелями без засобів екранування до аналогічного значення поля з екраном при $\Delta = 10$ мм і $h = 0,3$ м дорівнює $SE = 1,72$. Зазначимо, що для алюмінієвого екрана (з матеріалу, що має лінійні властивості) ефективність екранування не залежить від струмового навантаження кабельних ліній і дорівнює 1,72 за будь-яких значень $I_{\text{ном}}$.

Як показали розрахунки, товщина достатньо віддаленого від кабелів екрана в діапазоні $\Delta = 1 \dots 10$ мм не має великого впливу на ефективність екранування. Це пояснюється віддаленістю екрана від кабельної лінії та його довжиною. За додатковими дослідженнями виявлено, що більш суттєвий вплив на значення коефіцієнта SE мають близьке розташування екрана до кабелів і особливо збільшення його за шириною. Необхідно також підкреслити, що наведені в роботі чисельні результати стосуються вибраних даних і не узагальнюються.

Залежність ефективності екранування від товщини алюмінієвого екрана пояснюється даними рис. 2. На рис. 2 а та б показано розподіл магнітного поля $\dot{\mathbf{B}}$ у вигляді ліній потоку навколо кабельної лінії в однаковий момент часу за різної товщини екрана $\Delta = 10$ та 100 мм (велика товщина вибрана для наочності результатів). Розподіли магнітного поля за допомогою ліній потоку дозволяють представити тільки якісно конфігурацію поля і лише в певний момент часу синусоїдально змінюваного струму без відображення числових значень поля. Графіки на рис. 2 в показують для обраних значень Δ змінення магнітного поля вздовж лінії PS , що перетинає екран і розташована над центром кабелів. З рис. 2 видно, що поле концентрується безпосередньо над екраном більшої товщини, тоді як для тоншого екрана лінії потоку (і більші значення поля) зміщуються ближче до поверхні землі. До того ж, зосередження (густина) показаних ліній поля на поверхні землі більша для тоншого екрана. Таким чином, екран з $\Delta = 100$ мм забезпечує менші значення поля над кабелями на поверхні землі порівняно з екраном товщиною $\Delta = 10$ мм, а отже, і більш високу ефективність екранування.

На картинах рис. 3 зверху відображено розподіл поля в перерізі алюмінієвого екрана для двох варіантів: екран знаходиться безпосередньо над кабельними лініями, тобто за $h = 0$ (рис. 3 а) і на відстані $h = 0,3$ м від неї (рис. 3 б) за $\Delta = 10$ мм. Графіки внизу показують змінення магнітної індукції вздовж нижньої границі екрана – на відріжку MN .

Стосовно даних рис. 3 а слід відмітити, що за $h = 0$ максимальне значення результуючого поля в екрані становить $|\dot{\mathbf{B}}_e|_{\max} = 1,33$ мТл (під результуючим полем мається на увазі поле від усіх джерел – усіх струмів кабельної системи). Поле концентрується прямо над кабелями. Максимальна густина наведеного струму дорівнює $|\mathbf{j}_e|_{\max} = 1,26 \cdot 10^5$ А/м², джоулеві втрати не перевищують 443 Вт/м³ (максимальне значення реалізується безпосередньо над кабельною лінією, рис. 3 а). Поле на поверхні землі дорівнює $|\dot{\mathbf{B}}|_{\max} = 0,64$ мкТл, що в 1,13 раза менше, ніж за $h = 0,3$ м. Питомі втрати в перерізі екрана $Q_e = 28,37$ Вт/м, а в кабельній

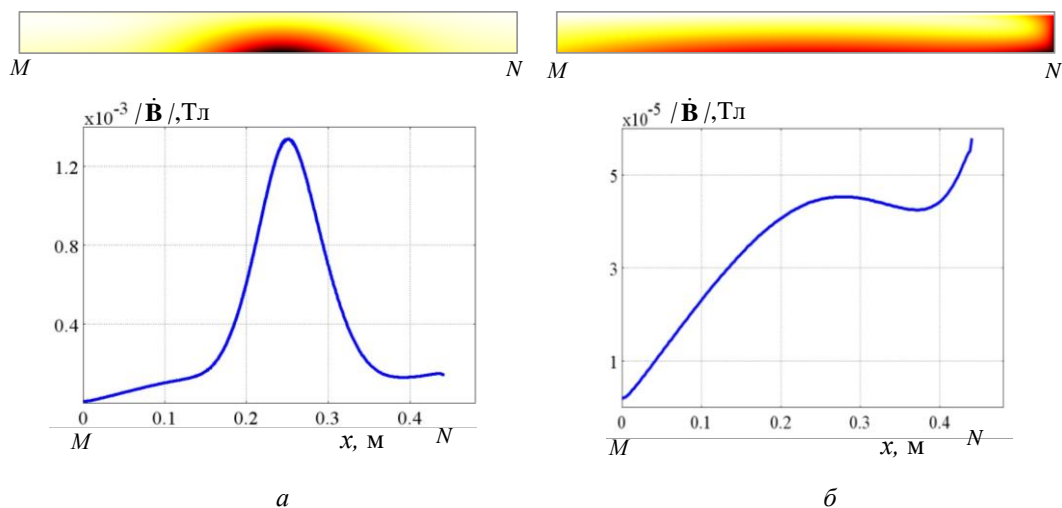


Рис. 3

лінії – $Q_l = 921,47$ Вт/м. Відношення $Q_e / Q_l = 0,031$, тобто втрати в екрані складають приблизно 3 % від втрат в кабелях, а $SE = 1,94$.

У разі, коли екран знаходиться на відстані від кабелів $h = 0,3$ м (рис. 3, б), максимальне поле вздовж нижньої границі екрана (відмітка MN) $/\dot{\mathbf{B}}_e /_{\max} = 57$ мкТл (далі за межами відмітка MN вже на невеликій відстані від екрана проявляється основна тенденція до зменшення поля). Поле і його найбільші значення концентруються в кутовій зовнішній зоні екрана. Максимальна густина наведеного струму дорівнює $|\dot{\mathbf{J}}_e /_{\max} = 9,8$ кА/м², максимальне значення джоулевих втрат в екрані становить $2,7$ Вт/м³, а питомі втрати в поперечному перерізі екрана складають $Q_e = 0,18$ Вт/м. Отже, розрахунковими даними підтверджено, що втрати в екрані значною мірою змінюються залежно від відстані його до кабелів. При $h = 0,3$ м відношення $Q_e / Q_l = 1,9 \cdot 10^{-4}$ або втрати у віддаленому від кабелів екрані не більше 0,2 % від втрат у кабельній лінії.

У таблиці представлено основні характеристики для двох випадків: використання алюмінієвого екрана та екрана з меншою електропровідністю. Екрани знаходяться на різній відстані h від кабелів і мають однакову товщину $\Delta = 10$ мм. Видно, що найбільш ефективне екранування забезпечує алюмінієвий екран ($SE = 1,94$) з найменшою відстанню до кабельної лінії ($h = 0$). Для нього втрати Q_e більші порівняно з іншим розглянутим екраном. Оскільки втрати в екрані є суттєвим показником і на практиці доцільно одночасне досягнення високої ефективності екранування і невеликих втрат в екрані, відстань h може бути підібрана так, щоб оптимально зменшити втрати і зберегти коефіцієнт екранування на досить високому рівні.

Відстань, h , м	Алюмінієвий екран – $\sigma_e = 38 \cdot 10^6$ См/м					Екран з електропровідністю $\sigma_e = 10^6$ См/м				
	$/\dot{\mathbf{B}} /_{\max}$, мкТл	SE	$/\dot{\mathbf{B}}_e /_{\max}$, Тл	$ \dot{\mathbf{J}}_e /_{\max}$, А/м ²	Q_e , Вт/м	$/\dot{\mathbf{B}} /_{\max}$, мкТл	SE	$/\dot{\mathbf{B}}_e /_{\max}$, Тл	$ \dot{\mathbf{J}}_e /_{\max}$, А/м ²	Q_e , Вт/м
0	0,64	1,94	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^5$	20,6	1,05	1,2	$3,1 \cdot 10^{-4}$	$8,34 \cdot 10^3$	10,6
0,3	0,72	1,72	$6,1 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^4$	0,18	1,07	1,16	$2,6 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^3$	0,71

Дані комп'ютерних розрахунків, наведені в таблиці, підтверджують відому залежність ефективності екранування від електропровідності екрана σ_e та від відстані його h до кабелів, а також характеризують у числових значеннях основних величин випадок двоколової кабельної лінії, що розглядається.

На доповнення даних таблиці, рис. 4 представляє змінення магнітної індукції на поверхні землі (вздовж лінії OL , рис. 1 б) для досліджуваної кабельної лінії за товщини екрана

$\Delta = 10$ мм, відстані $h = 0$ та для різної електропровідності матеріалу екрана σ_e . Досить висока електропровідність σ_e вибрана для більшої показовості результатів і відображення можливості наближення до найменших гранично допустимих значень магнітного поля на поверхні землі над кабелями [10]. Графічні дані свідчать, що ефективність екранування поля кабельних ліній у значній мірі залежить від електропровідності екрана, що узгоджується з даними статті [3] і пояснюється картинами магнітного поля, представленого лініями потоку на рис. 5. Розподіли поля на рис. 5 відповідають однаковим даним (крім σ_e), аналогічним до рис. 4. На рис. 5 показано характер змінення картин поля залежно від електро-

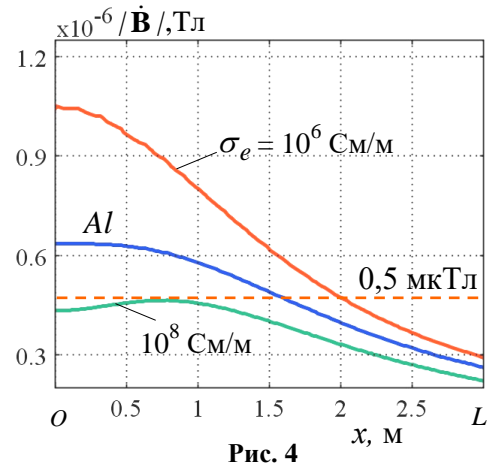


Рис. 4

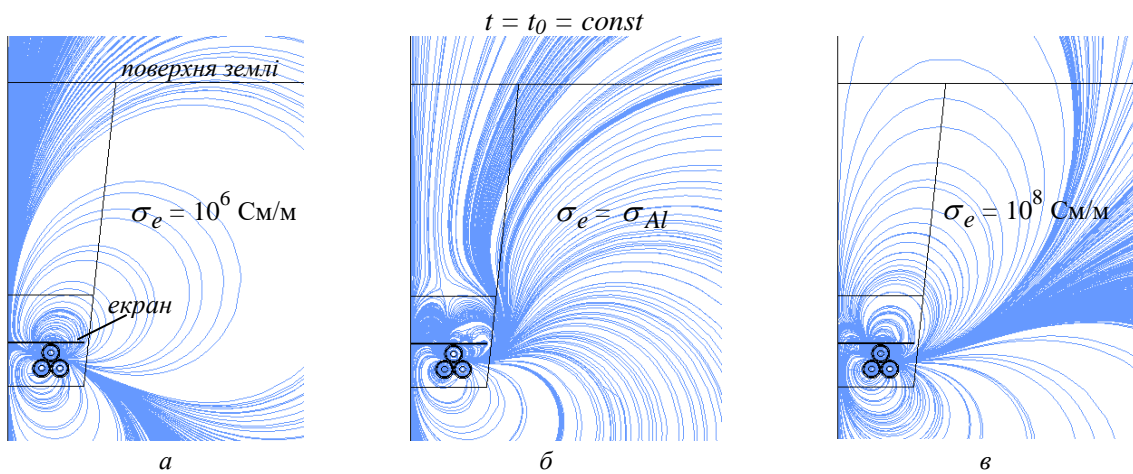


Рис. 5

провідності екрана σ_e . Лінії поля переважно концентруються безпосередньо над кабелями у разі меншого значення σ_e , усе більше відхиляючись від осі симетрії при його зростанні.

Відносно картин магнітного поля на рис. 2, а, б та рис. 5 відмітимо, що вони відповідають одному моменту часу синусоїдального струму $t = t_0 = const$, а конфігурація поля кабельної лінії змінюється залежно від t . Як показано розрахунковим шляхом, зі зміненням часу t картини магнітного поля змінюються обертально в площині поперечного перетину кабелів. Це ілюструється на рис. 6, де представлено лінії потоку рівномірної густини для вектора

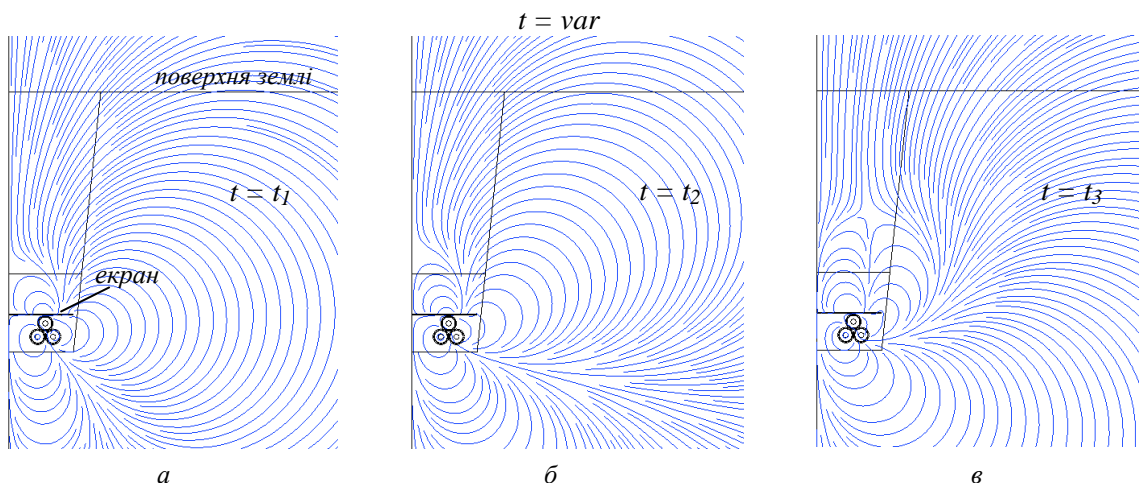


Рис. 6

магнітної індукції в три різні моменти часу. Для ряду моментів часу, зокрема для $t = t_1, t_2, t_3$, суттєві особливості в розподілі магнітного поля у разі змінення електропровідності і товщини екрана аналогічні до відмічених вище при $t = t_0$ та показаних на рис. 2 а, б та 5. Таким чином, у роботі здійснюється спроба пояснити залежності ефективності екранування магнітного поля кабелів від характеристик екрана. Для повного пояснення необхідні розширені дослідження стосовно усереднених за часом значень магнітної індукції.

У разі найбільш ефективного екранування, показаного в таблиці ($SE=1,94$), розподіл температури поблизу кабелів та алюмінієвого екрана, що має товщину $\Delta = 10$ мм і знаходиться безпосередньо над кабельними лініями ($h = 0$), представлено на рис. 7 а. Для цього ж випадку змінення температури вздовж нижньої границі екрана (лінії MN) показано на рис. 7 б. Максимальна температура нагріву кабелів $\sim 87^\circ\text{C}$ не перевищує допустиму температуру 90°C [12]. Екран нагрівається в середньому до $78,2^\circ\text{C}$, перепад температури за його довжиною – не більше $0,45^\circ\text{C}$ (рис. 7 б). У такому випадку за максимальною температурою заданий струм 630 А може вважатися тривало припустимим навантаженням кабелів. Для ана-

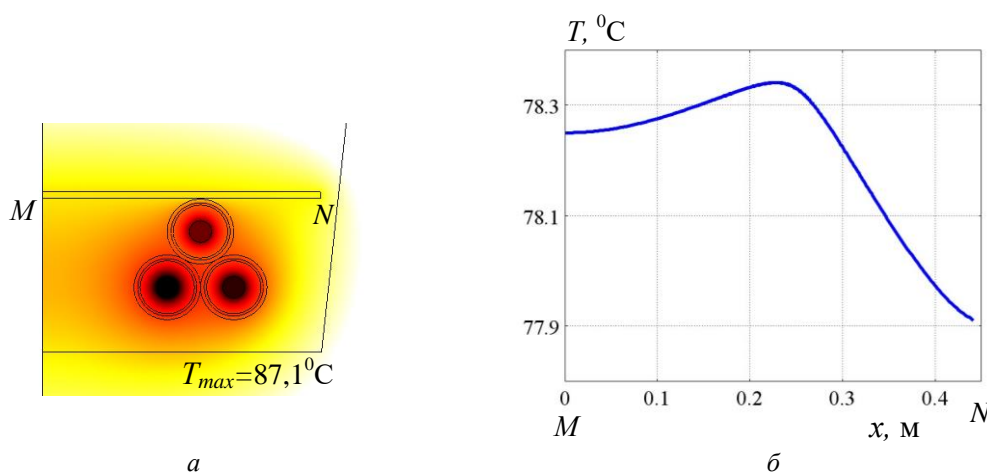


Рис. 7

логічної кабельної лінії без екрана максимальна температура кабелів складає $91,2^\circ\text{C}$, що на $\sim 4^\circ\text{C}$ вище, ніж за наявності екрана.

При вибраних даних і зміненні товщини екрана від 1 до 15 мм максимальна температура кабелів зменшується незначно – від 89 до $86,3^\circ\text{C}$ і не відбивається на пропускній спроможності кабельної лінії, проте для найбільш тонкого екрана (1 мм) хоча і не перевищує допустиму температуру, близька до неї. Як показали розрахунки, з точки зору можливості підвищення струмового навантаження кабельної лінії екран з більшою товщиною краще.

Алюмінієвий екран з $\Delta = 10$ мм на відстані $h = 0,3$ м від кабелів нагрівається до $62,3^\circ\text{C}$, при цьому їхня максимальна температура складає $90,7^\circ\text{C}$, тобто чисельними даними підтверджено, що при визначенні пропускної спроможності кабельної лінії через можливе підвищення температури кабелів необхідно враховувати їхню відстань до екрана.

Висновки. Розв'язано електромагнітну і теплову задачі для двоколової 330 кВ кабельної лінії з ізоляцією зі зшитого поліетилену з горизонтальним екраном з провідного і немагнітного матеріалу, що знаходиться на різній відстані від кабелів.

Представлено пояснення залежності ефективності екранування магнітного поля кабелів від товщини екрана та його електропровідності за допомогою відображення розподілу магнітного поля лініями потоку в певний момент часу синусоїдального струму. Виявлено, що в різні моменти часу зміни струму картини магнітного поля змінюються обертально в площині поперечного перетину кабелів, зберігаючи при цьому основні тенденції для різних значень електропровідності та товщини екрана.

Показано, що екрани добре знижують магнітне поле на значній відстані від джерел поля. Коефіцієнт екранування для алюмінієвого екрана дорівнює 1,72 при відстані між кабелями і екраном 0,3 м та досягає значення 1,94, коли екран знаходиться безпосередньо над ка-

белями. Для цих випадків втрати в зовнішньому екрані складають відповідно не більше 0,2 % і 3 % від втрат у кабельній лінії.

Досліджено закономірності змінення рівня магнітного поля, густини струму та втрат в об'ємі екрана залежно від його відстані до кабелів. Виявлено, що за наявності екрана температура нагріву кабелів у кабельних лініях знижується – несуттєво (у розглянутому випадку для екрана більш наближеного до кабелів – на $\sim 4^{\circ}\text{C}$).

Для алюмінієвого екрана, що знаходиться на найменшій відстані до кабелів і має товщину 1 мм, ефективність екранування дорівнює 1,8, а при товщині 10 мм – 1,94, тобто на практиці з міркувань економії матеріалу і коштів при заданих умовах і початкових даних можливо використання більш тонкого екрана. Разом з тим, необхідно враховувати, що у разі тоншого екрана температура кабелів в лінії дещо збільшується (для вибраних даних майже на 3°C при зменшенні товщини екрана від 15 до 1 мм), що в загальному випадку може впливати на пропускну спроможність кабельної лінії.

На основі комп'ютерних розрахунків і чисельних даних підтверджено, що для кожного окремого варіанта кабельної лінії та її екрана з метою суворого дотримання визначеного струмового навантаження необхідно враховувати товщину та відстань екрана до кабелів внаслідок залежності від цих параметрів максимальної температури кабелів у лінії.

Робота фінансувалася частково за держбюджетною темою "Розвинути теорію імпульсних і високочастотних 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. Electrical power cable engineering. Third edition, ed. by W.A. Thue, CRC Press, 2011, 460 p.
2. Кучерявая И.Н. Экранирование подземной кабельной линии сверхвысокого напряжения с помощью плоского ферромагнитного экрана. *Техн. электродинамика*. 2019. № 6. С. 13–17. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.06.013>
3. Щерба А.А., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Магнитное поле подземной кабельной линии 330 кВ и способы его уменьшения. *Техн. электродинамика*. 2019. № 5. С. 3–9. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.05.003>
4. 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>
5. 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.
6. 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.
7. Sergeant P., Dupre L., Melkebeek J. Magnetic shielding of buried high voltage cables by conductive metal plates. *COMPEL*. 2008, Vol. 27. No. 1. Pp. 170–180. DOI: <https://doi.org/10.1108/03321640810836735>
8. Кучерява І.М. Екранування магнітного поля підземної кабельної лінії за допомогою Н-подібного екрана. *Техн. электродинамика*. 2020. № 6. С. 15–20. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.06.015>
9. 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>
10. Правила улаштування електроустановок. Міненерговугілля України, Київ, 2017, 617 с.
11. Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Мультифизическое моделирование в электротехнике. К.: Ин-т электродинамики НАН Украины, 2015, 305 с.
12. IEC 60287 International Standard. Electric cables – Calculation of the current rating. First edition 1995.
13. Sergeant P., Koroglu S. Electromagnetic losses in magnetic shields for buried high voltage cables. *Progress In Electromagnetics Research*. 2011. Vol. 115. Pp. 441–460. DOI: <https://doi.org/10.1108/03321640810836735>
14. 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.
15. Comsol multiphysics modeling and simulation software. – <http://www.comsol.com/>

THE DISTRIBUTION OF MAGNETIC AND THERMAL FIELDS, POWER LOSSES IN ELECTROMAGNETIC SHIELD OF UNDERGROUND TWO-CIRCUIT CABLE LINE

I.M. Kucheriava

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine

pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine

e-mail: rB.irinan@gmail.com

In the article, the magnetic and thermal field distributions generated by underground two-circuit extra-high voltage power cable line in the environment, particularly near the cables and flat aluminum shield, which is located at a different distance from the cables and has different thicknesses, are analyzed. The unique features of the magnetic field and temperature distributions inside the shield are computed and studied. For the cases under consideration, the Joule losses in the external shield do not exceed 3% of the losses in the cables. The primary electromagnetic characteristics are compared for the aluminum shield (shielding efficiency is 1,94) and the shield with lower conductivity (shielding efficiency is equal to 1,2). As shown, the thicker shield helps to increase the ampacity of the cable line owing to lower heating. The actual operating current of the cable line under consideration depends on the distance of the shield from the cables owing to the relation between their maximum temperature and this distance. Ref. 15, fig. 7, table.

Keywords: underground two-circuit power cable line, conducting shield, shielding efficiency, magnetic field, thermal field, Joule losses, computer modeling.

1. Electrical power cable engineering. Third edition, ed. by W.A. Thue, CRC Press, 2011, 460 p.
2. Kucheriava I.M. Shielding of underground extra-high voltage cable line by plane ferromagnetic shield. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2019. No 6. Pp. 13–17. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.06.013> (Rus)
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. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.05.003> (Rus)
4. 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>
5. 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.
6. 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.
7. Sergeant P., Dupre L., Melkebeek J. Magnetic shielding of buried high voltage cables by conductive metal plates. *COMPEL*. 2008. Vol. 27. No 1. Pp. 170–180. DOI: <https://doi.org/10.1108/03321640810836735>
8. Kucheriava I.M. Magnetic field shielding of underground power cable line by h-shaped shield. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2020. No 6. Pp. 15–20. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.06.015> (Rus)
9. 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>
10. Electric installation code. Minenergovugillia Ukrainy, Kyiv, 2017, 617 p. (Ukr)
11. Podoltsev A.D., Kucheriava I.M. Multiphysics modeling in electrical engineering. Kyiv: Institute of Electrodynamics, Ukrainian Academy of Sciences, 2015, 305 p. (Rus)
12. IEC 60287 International Standard. Electric cables – Calculation of the current rating. First edition 1995.
13. Sergeant P., Koroglu S. Electromagnetic losses in magnetic shields for buried high voltage cables. *Progress In Electromagnetics Research*, 2011. Vol. 115. Pp. 441–460. DOI: <https://doi.org/10.1108/03321640810836735>
14. 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)
15. Comsol multiphysics modeling and simulation software. – <http://www.comsol.com/>

Надійшла: 31.05.2021

Received: 31.05.2021