

ПОТЕНЦІЙНІ ЗАСОБИ ЕКРАНУВАННЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ПІДЗЕМНИХ СИЛОВИХ КАБЕЛІВ У ПОЛІЕТИЛЕНОВИХ ТРУБАХ З КОМПОЗИЦІЙНОГО МАГНІТНОГО МАТЕРІАЛУ

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

За допомогою комп'ютерного моделювання досліджено магнітне поле підземних кабельних ліній середньої та високої напруги, прокладених у композиційних поліетиленових трубах, що мають магнітні властивості, з використанням спеціального насипного/засипного ґрунту різних розмірів (об'єму). Труби та додатковий ґрунт навколо і поблизу кабелів виготовляються з композиційного матеріалу з ефективними магнітними властивостями і можуть виконувати функцію магнітного екрана, зменшуючи рівень поля кабелів. Вивчено ефективність екранування поля кабельних ліній в трубах залежно від висоти і ширини композиційного насипного/засипного ґрунту. Виявлено існування оптимальної висоти насипки, необхідної для найбільшого зменшення магнітного поля кабелів на поверхні землі безпосередньо над ними, та вплив ширини насипного та засипного ґрунту на ефективність екранування. Проаналізовано характерні особливості розподілу та змінення рівня магнітного поля залежно від наявності чи відсутності композиційного магнітного ґрунту. Показано перспективність розміщення високовольтних кабелів (трикутником) в одній загальній трубі з додатковим композиційним магнітним насипним і засипним ґрунтом. Бібл. 30, рис. 5.

Ключові слова: підземна трифазна кабельна лінія, кабелі в трубах, насипний/засипний ґрунт, композиційний магнітний матеріал, екранування магнітного поля, комп'ютерне моделювання.

Стан і обґрунтування актуальності проблеми. Сучасні кабельні лінії (КЛ) з однофазними кабелями з ізоляцією зі зшитого поліетилену (ЗПЕ) широко використовуються в мережах усіх класів напруги – від 6 до 500 кВ [1, 2]. Такі кабелі на середню напругу (6–35 кВ) виготовляються на українських кабельних заводах "Південкабель" (м. Харків) та "Одескабель" (м. Одеса) [3, 4], а високовольтні та надвисоковольтні кабелі 220, 330 кВ – на заводі "Південкабель" [1].

Прокладання КЛ в районах міської забудови здійснюється, як правило, в ґрунті, в спеціальних кабельних спорудах (тунелях, каналах), у поліетиленових трубах, тобто за умови забезпечення додаткового захисту від ушкоджень [2, 5–9]. Для захисту силових кабелів від механічних пошкоджень на ділянках перетину з автодорогами і залізницями, інженерними спорудами і природними завадами, в умовах особливої обмеженості по трасі зазвичай використовуються труби і спеціальне приладдя з різних термопластикових матеріалів – поліетилену, поліпропілену, полівінілхлориду [2, 10, 11]. Для прокладання силових кабелів 6–500 кВ підходять труби з полімерних композицій високої густини та високої термостійкості [8, 10], зокрема для однофазних кабелів на кабельному ринку пропонуються композиційні поліетиленові труби ProTectorFlex, труби зі спеціальних пластикових матеріалів китайської фірми Power Cable Protection Pipe та американської компанії Eagle (останні під назвою electrical conduit) [5, 10].

В Україні діючими Правилами улаштування електроустановок [12, с. 246, 268] визначено, що за наявності на трасі КЛ ґрунтів, які містять речовини, руйнівні діючі на оболонку кабелів, необхідно здійснювати їхнє прокладання із засипанням нейтральним ґрунтом або прокладати в неметалевих трубах, а за перетину вулиць і майданів із удосконаленими покриттями та інтенсивним рухом транспорту КЛ треба прокладати в кабельних блоках або трубопроводах. Крім того, пунктом 2.3.128 цих Правил обумовлено: "У разі прокладання КЛ у кабельних трубопроводах (каналах блока) кабелі напругою до 35 кВ можна розміщувати по одному фазному кабелю в трубі (каналі), або по три кабелі, з'єднані за схемою "у трикутник", в одній трубі. Кабелі напругою від 110 кВ до 330 кВ треба розмі-

щувати по одному кабелю в трубі незалежно від схеми прокладання ("у площині" чи "у трикутник")." До прикладу, в роботі [6] повідомляється про першу українську надвисоковольтну (330 кВ) КЛ, яка в теперішній час діє для потреб металургійного заводу "Дніпросталь". Фази кабелів цієї лінії прокладені "трикутником", що забезпечує мінімальні розміри траншеї, знижує обсяг земляних робіт, а також дає змогу підтримувати магнітне поле кабелів на меншому рівні в порівнянні з розташуванням кабелів в одній площині [7]. Відповідно до даних [6], у разі перетинання інженерних та транспортних комунікацій КЛ 330 кВ прокладена в трубах: кожна окрема фаза – в трубі з поліетилену. Задля забезпечення допустимих температурних режимів передбачено велике заглиблення кабелів (до 10 м) у ґрунт (зокрема під колією Придніпровської залізниці).

Проте світова практика прокладання силових кабелів у трубах більш широка. Так, у роботі [7] повідомляється про високовольтну підземну КЛ (132 кВ) довжиною приблизно 2 км в межах італійського міста Генуя. Лінія містить три однофазні кабелі, розміщені трикутником в одній сталевій трубі, та за нормативними умовами (так званіми "quality objective" – ціль якості) щодо створюваного кабелями магнітного поля на відповідальних ділянках задовольняє рівню не вище 0,2 мкТ. Питання зниження рівня поля (його екранування) було визнано в [7] першорядним.

Дослідження статті [13] стосуються ефективності екранування магнітного поля підземних 150 кВ кабелів, прокладених трикутником та в одній площині всередині замкненого (closed-shield) феромагнітного екрана, що можна вважати аналогом розміщення кабелів у трубі. Авторами [13] проводиться порівняння магнітного поля КЛ з різним розташуванням кабелів, за різної товщини екранів замкненої та відкритої (open-shield) конфігурації, обґрунтовується більш висока ефективність саме замкнених екранів.

У роботі [14] описано італійську 380 кВ кабельну лінію, що складається з однофазних кабелів із ЗПЕ ізоляцією, прокладених на відповідальних ділянках траси трикутником у замкненому каналі (подібному до труби). Кабельний канал спеціально спроектовано фірмою Prysmian, виготовлено з матеріалу, що має високу магнітну проникність, і призначено для екранування магнітного поля надвисоковольтних кабелів (не перевищення рівня 3 мкТл).

Відносно пропускної здатності за струмом відмітимо, що в нормативному документі [15, табл. 8.30] показано зменшення допустимого струму в кабелях трубного прокладання до 5% в залежності від перерізу їхньої жили. У відповідності до цього, висновками статті [10] визначено, що до зниження пропускної здатності КЛ з однофазними 6–500 кВ кабелями призводить не тільки прокладання кабелів у поліетиленових трубах, але й паразитні струми, втрати потужності в екранах, при цьому розміщення кабелів у трубах не є основною причиною зниження пропускної здатності кабелів [10].

Інститут пластикових труб (Plastics Pipe Institute) у своєму виданні 2021 р. подає детальну інформацію щодо створення, фізичних характеристик, монтажу та експлуатації сучасних труб з поліетилену високої густини для силових кабелів напругою вище 35 кВ та посилається на досвід прокладання в пластикових і сталевих трубах силових кабелів із ЗПЕ ізоляцією на високу напругу – до 138 кВ [8, 16]. Як зазначається в [8], використання поліетиленових труб для підземних силових кабелів має значні переваги перед кабелями, безпосередньо заглибленими в ґрунт, завдяки покращеному механічному захисту, тривалій безперебійній роботі, швидкому ремонту. Крім того сучасні варіанти труб з поліетилену високої густини передбачають розміщення волоконно-оптичних кабелів і пристроїв поруч із силовими кабелями для з'єднання з датчиками контролю навантаження, розташованими по всій мережі і відомими як системи наглядового контролю та збору даних SCADA. Прокладання кабелів з волоконно-оптичними модулями в трубах необхідне для реалізації сучасних технологій моніторингу технічного стану КЛ [17].

За даними [8] поліетиленові труби, зокрема з поліетилену високої густини, є надійним, стійким та економічним рішенням, одним з найбільш прийнятних для підземних КЛ. Такі труби мають невелику вагу, рівну поверхню, необхідну гнучкість, легко та швидко зварюються одна з одною для формування протяжних однорідних ділянок, крім того, поліетиленові труби характеризуються високою міцністю, ізоляційними властивостями, стійкістю до корозійних впливів, окислення і вологи, мають довгий строк експлуатації, можуть вміщувати більше, ніж три кабелі [8].

На теперішній час багато кабельних систем, прокладених безпосередньо в землі і розрахованих на 30–40 річний термін експлуатації, особливо силових кабелів на напругу до 35 кВ, вимагають частого ремонту внаслідок довготривалої роботи, зовнішніх впливів (ґрунтової корозії, наявності забруднюючих речовин, у тому числі води), руху ґрунту, застарілої інфраструктури, і потребують мо-

дернізації для забезпечення надійності та стійкості мережі. Саме прокладання кабелів у трубах з додатковими засобами екранування магнітного поля є ефективним рішенням у разі близькості кабелів до населених пунктів, місць концентрації людей, а також за наявності поблизу або на перетині траси чутливого електричного обладнання, електронних пристроїв, електротехнічних комунікацій, які можуть зазнавати руйнівних впливів від дії магнітного поля. Складності із заміною та ремонтом кабелів у трубах не виникають – стандартами і правилами прокладання передбачаються відповідні засоби доступу до КЛ [12, с. 199].

У сучасних умовах актуальним питанням є задоволення високих нормативних вимог до техніко-екологічної (електромагнітної) безпеки широко використовуваних КЛ на середню та високу напругу – мається на увазі необхідність забезпечення регламентованого рівня магнітного поля кабелів в оточуючому середовищі за рахунок вдосконалення шляхів спорудження КЛ, а також використання допоміжних засобів та новітніх технологічних рішень для зменшення магнітного поля, що створюється кабелями. У цьому напрямку в роботах [18, 19] запропоновано використання поліетиленових труб, у матеріал яких на етапі виготовлення введено дрібнодисперсні магнітні частки, або на поверхню яких тонким шаром нанесено полімерну плівку з магнітними властивостями – за рахунок цього забезпечуються ефективні магнітні властивості труб. Такі труби можуть виконувати роль магнітних екранів, до того ж саме поліетиленові труби є економічно ефективним рішенням для кабельних ліній [8], особливо у порівнянні зі сталевими трубами [7]. У [18] показано, що використання трьох окремих труб як магнітних екранів для трьох однофазних кабелів є неефективним, а у випадку загальної труби для такої КЛ поле на поверхні ґрунту може бути знижено на порядок.

Синтез матеріалів з діелектричною і магнітною проникністю стосовно до техніки сильних електричних та магнітних полів експериментально підтверджено сучасними технологіями, представленими в монографії [20]. До того ж, можливість використання для екранування магнітного поля композиційних поліетиленових труб з магнітними властивостями перевіряється за відомою формулою Ліхтенеккера [21]

$$\bar{\mu} = \mu_a^{V_a} \mu_b^{(1-V_a)},$$

де $\bar{\mu}$ – середня магнітна проникність матеріалу у вигляді суміші (конгломерату); μ_a – проникність часток, що знаходяться без контакту між собою у середовищі з проникністю μ_b ; V_a – коефіцієнт заповнення (концентрація часток в об'ємі матеріалу). Наприклад, за $\mu_a=1000$, $\mu_b=1$ (поліетилен), $V_a=0,7$ ефективна магнітна проникність сумішного матеріалу складає $\bar{\mu} = 125$.

Навколишні ґрунти з магнітними властивостями, завдяки додаванню в їхній склад магнітної фракції (мікро- або нанорозмірних магнітних часток), теж здатні екранувати магнітне поле, що створюється кабелями [19, 22, 23]. У роботі [22] досліджено магнітне поле підземних кабелів із засипним ґрунтом (ґрунтом безпосередньо навколо кабелів) та насипним ґрунтом (зверху кабелів) з ефективними магнітними властивостями – магнітною проникністю до 100.

Значимо, що магнітні частки, отримані, наприклад, з відходів металургійного виробництва або процесів металообробки, можуть додаватися у насипний/засипний ґрунт як безпосередньо перед монтажем лінії, так і задалегідь. Їхня об'ємна концентрація визначається умовою досягнення необхідного ефективного значення магнітної проникності матеріалу труби. Переваги досліджених у даній роботі засобів екранування магнітного поля силових кабелів, а саме композиційних поліетиленових труб та насипного/засипного ґрунту, що мають магнітні властивості, складаються з простого монтажу та спрощення технічного обслуговування кабельної лінії, відсутності додаткових елементів конструкції для зниження рівня магнітного поля [19].

Насипні та засипні ґрунти можуть поєднувати роль магнітних екранів і середовища з поліпшеними тепловими властивостями (виконувати роль коректуючих ґрунтів – спеціально підібраних ґрунтів із заданою теплопровідністю) задля одночасного зменшення магнітного поля кабелів і забезпечення їхнього допустимого температурного режиму. Саме дотримання припустимого рівня нагріву кабелів важливо для довготривалої надійної роботи кабелів з визначеною пропускну здатністю [6, 24].

Загальна характеристика роботи. Постановка проблеми складається з отримання нових знань відносно оригінальних засобів екранування магнітного поля підземних кабельних ліній – поліетиленової труби з магнітними властивостями, насипного/засипного композиційного магнітного ґрунту. Актуальність обраної теми дослідження базується на її зв'язку з важливими науково-

практичними задачами, що полягають, з одного боку, в розвитку нових засобів і матеріалів для ефективного захисту КЛ від зовнішніх впливів і екранування магнітного поля кабелів, а, з іншого боку, в необхідності проведення всебічного пошукового дослідження задля подальшого використання його результатів у напрямку визначення шляхів практичного впровадження нових екрануючих засобів.

Робота спрямована на попереднє вивчення ефективності запропонованих у більш ранніх статтях [18, 22] та захищених в патенті [19] засобів екранування магнітного поля силових кабелів, присвячена створенню підґрунтя для можливої у подальшому розробки та практичної реалізації відповідних технічних рішень і засобів екранування магнітного поля кабелів, разом з тим, не передбачає визначення техніко-економічних характеристик розглянутих засобів та їхнє порівняння з вже існуючими засобами.

У зв'язку з вище обґрунтованими доцільністю використання поліетиленових труб для прокладання силових кабелів на окремих ділянках протяжних КЛ та актуальністю теми *метою роботи* є кількісне дослідження ефективності зниження магнітного поля підземних трифазних кабельних ліній на поверхні ґрунту, які прокладені в поліетиленових трубах з магнітними властивостями та в навколишньому і близько розташованому ґрунті, що також мають магнітні властивості та різні геометричні параметри. Задля досягнення мети передбачається вивчення особливостей розподілу магнітного поля кабелів в оточуючому середовищі.

Навколишнім ґрунтом вважається засипний магнітний ґрунт (ЗМГ), а близько розташованим – насипний композиційний ґрунт (НМГ), що насипається зверху труби з кабелями (рис. 1, в, з).

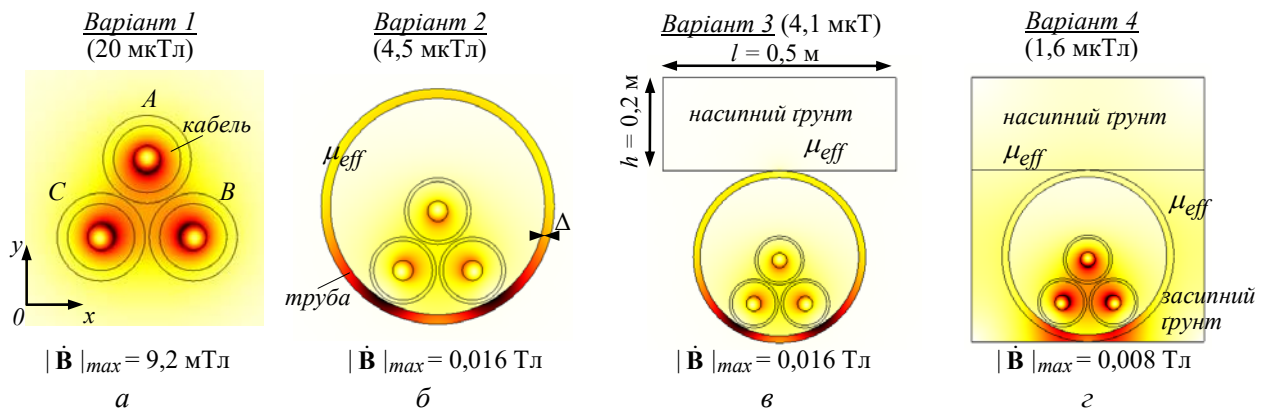


Рис. 1

На етапі накопичення фактичного матеріалу в рамках попередніх досліджень, під час вивчення комплексних процесів та у разі, коли побудова розширеної фізичної (експериментальної) моделі і проведення натурних експериментів є ускладненими та дорого коштують, математичне моделювання та обчислювальні експерименти набувають особливого значення. Саме математичне та комп'ютерне моделювання як таке, що надає можливості дослідити найбільш широкий діапазон змінення об'єкту, є методом дослідження в роботі.

Дослідження виконується за допомогою двовимірного чисельного моделювання методом скінченних елементів у програмі Comsol [25] для КЛ середньої (35 кВ) та високої (110 кВ) напруги. Підземні кабелі, що розглядаються, прокладені в трубі безтраншейно паралельно поверхні землі, мають додатково насипний/засипний композиційний ґрунт з геометричними параметрами – l , h і магнітною проникністю $\mu_{eff} = 100$ (рис. 1). Кабелі в лінії розташовані трикутником. Послідовність фаз кабелів – *СAB*. У жилах кабелів протікає трифазна система струмів, рівномірно розподілених у перетині жил. Комп'ютерне моделювання проводиться за умови, що електропровідність композиційного ґрунту не враховується (задається рівною нулю).

Достовірність результатів роботи полягає в тому, що її загальні положення і висновки ґрунтуються на численних комп'ютерних розрахунках для конкретних кабельних ліній, підтверджуються верифікацією застосованої чисельної моделі шляхом отримання таких результатів попередніх робіт для кабелів різних класів напруги, які аналогічні даним і висновкам відомих досліджень, в тому числі отриманим на основі інших моделей [7, 13, 14, 26].

Дана робота представляє доповнення і розвинення результатів статті [27] з урахуванням розміщення в трубах кабелів різної напруги – трьох кабелів середньої напруги (35 кВ) в одній загальній трубі та кожного з кабелів трифазної КЛ високої напруги (110 кВ) в окремій трубі.

Модель для дослідження. Задача формулюється для усталеного режиму в декартовій системі координат Oxy (рис. 1) у припущенні, що умови прокладання КЛ однакові за всією довжиною, а кабелі і екрануючі елементи (труба, НМГ/ЗМГ) достатньо довгі і незмінні вздовж протяжної ділянки кабельної траси. Невідомою електромагнітної задачі є комплексна величина векторного магнітного потенціалу з ненульовою z -складовою $\dot{\mathbf{A}} = (0, 0, \dot{A}_z)$.

Математична модель базується на підходах і рівняннях, наведених у [28]. Основою моделі є система 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 в розрахунковій області; σ_i – електропровідність i -го середовища (в загальному випадку жил, екранів кабелів); μ_0 і $\mu_r = \mu_{eff}$ – магнітна постійна і відносна магнітна проникність магнітного екрана у вигляді НМГ/ЗМГ та труби з композиційного матеріалу, відповідно; $\mu_r = 1$ для немагнітних елементів розрахункової області, зокрема компонентів кабелів, природного ґрунту, повітряного середовища всередині труби; \dot{J}_z – z -складова густини струму в провідниках.

У рівняння моделі входять комплексні напруга і струм, зокрема рівняння (2) записано для ділянки кола зі струмом \dot{I}_i , падінням напруги $\Delta \dot{U}_i$, площею поперечного перерізу S_i .

Більш детально модель описана у роботах [18, 22].

Наведені рівняння доповнюються умовою магнітної ізоляції на всіх зовнішніх границях розрахункової області

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

Вектор магнітної індукції дорівнює $\dot{\mathbf{B}} = \text{rot} \dot{\mathbf{A}}$. Складові вектора поля визначаються як $\dot{B}_x = \partial \dot{A}_z / \partial y$; $\dot{B}_y = -\partial \dot{A}_z / \partial x$. Досліджується розподіл діючого значення магнітного поля $|\dot{\mathbf{B}}| = \sqrt{|\dot{B}_x|^2 + |\dot{B}_y|^2} / \sqrt{2}$ у розрахунковій області та на поверхні землі безпосередньо над КЛ.

Моделювання магнітного поля КЛ середньої напруги. Досліджується магнітне поле КЛ 35 кВ, прокладеної в ґрунті на глибині 0,8 м. Алюмінієві жили кабелів мають поперечний перетин 800 мм², струм у номінальному режимі $I_{ном} = 637$ А [3]. Труба виконана з композиційного матеріалу з $\mu_{eff} = 100$. Таку ж магнітну проникність мають композиційні НМГ і ЗМГ.

На рис. 1 (у відтинках кольорів) показано розподіл магнітного поля $|\dot{\mathbf{B}}|$ навколо підземної кабельної лінії для різних варіантів: кабелі знаходяться безпосередньо в ґрунті (рис. 1, а); в трубі з магнітними властивостями (рис. 1, б); додатково з насипним композиційним ґрунтом (рис. 1, в); з НМГ та ЗМГ, що мають магнітні властивості (рис. 1, г). Наведено максимальні значення магнітної індукції $|\dot{\mathbf{B}}|_{max}$ (унизу) поблизу кабелів та максимальне поле на поверхні землі над кабелями (вгорі в дужках). Як видно, за наявності магнітного матеріалу труби розподіл магнітного поля кабелів змінюється, особливо це виявляється у випадку НМГ і ЗМГ. У разі використання композиційного ґрунту магнітне поле концентрується в області жил кабелів і під ними в нижній частині матеріалу труби. За рахунок перерозподілу поля, за однакової висоти НМГ ($h = 0,2$ м) для варіанта 2 в трубі реалізується значення до $|\dot{\mathbf{B}}|_{max} = 16,2$ мТл, а для варіанта 4 – $|\dot{\mathbf{B}}|_{max} = 8,0$ мТл.

Дані рис. 2 ілюструють змінення максимального значення магнітної індукції на поверхні землі залежно від ширини l і висоти h композиційного ґрунту навколо труби з кабельною лінією для розглянутих варіантів 2–4. На рис. 2, б для варіанта 4 наведено залежності максимальних значень поля від висоти НМГ за різної ширини насипного та засипного ґрунту: $l = 0,4; 0,5; 0,7$ м.

Наведені на рис. 2 комп'ютерні результати показують наступне:

– ефективність екранування за наявності одного НМГ (варіант 3) проявляється лише за певної висоти h – не більше $\sim 0,25$ м; у разі $h > 0,25$ м магнітне поле в оточуючому середовищі і на поверхні землі посилюється (рис. 2, а);

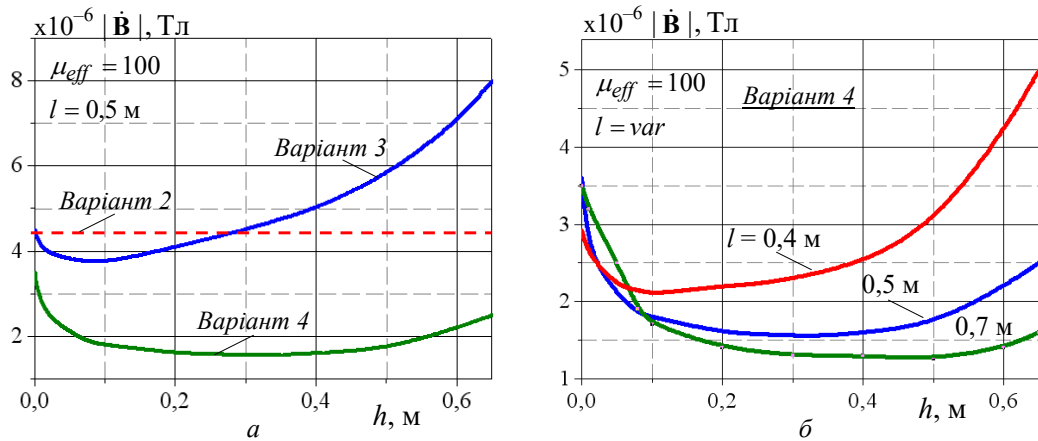


Рис. 2

- для варіанта 3 існує оптимальне значення висоти НМГ $h^* \approx 0,05 \dots 0,1$ м (для варіанта 4 – $h^* \approx 0,25 \dots 0,35$ м), у разі якого реалізується найбільше зниження магнітного поля на поверхні землі;
- найкращим для екранування магнітного поля кабелів є варіант 4 з одночасним використанням НМГ і ЗМГ; під більшою ефективністю екранування мається на увазі можливість отримання менших значень магнітного поля на поверхні землі у порівнянні з випадком відсутності додаткового магнітного ґрунту – значень нижче лінії, що відповідає варіанту 2 на рис. 2, а;
- у разі збільшення ширини l додаткових НМГ і ЗМГ зростає ефективність екранування магнітного поля і збільшується діапазон змінення висоти НМГ, можливий для найкращого зниження поля (крива, що відповідає $l = 0,7$ м на рис. 2, б).

Відносно залежностей на рис. 2, а, на рис. 3, а наведено змінення магнітної індукції $|\dot{\mathbf{B}}|$ вздовж центральної вертикалі кабельної лінії (прямої LM на рис. 3, в), тобто за глибиною ґрунту – від труби до поверхні землі за різної висоти h НМГ. Зазначимо, що оскільки магнітне поле має найбільші значення поблизу КЛ, на рис. 3, а діапазон змінення магнітної індукції має порядок 10^{-3} Тл (при цьому на рис. 2 показано змінення максимального значення магнітної індукції порядку 10^{-6} Тл саме на поверхні землі на значному віддаленні від КЛ).

Додатково розподіл магнітного поля в об'ємі НМГ висотою $h = 0,1$ м відображено на рис. 3, б. Картину магнітного поля для цього випадку в схематичному вигляді лініями потоку рівномірної густини навколо кабельної лінії в один з моментів часу синусоїдального струму показано на рис. 3 в. Розрахункові дані свідчать, що за більш низької насипці в ній генеруються більш високі значення $|\dot{\mathbf{B}}|$ (рис. 3, а), максимум яких знаходиться ближче до кабельної лінії (рис. 3, б), за межами НМГ поле різко спадає. Для більшої висоти h вищі значення поля все ближче просуваються до поверхні землі (рис. 3, а, в). До того ж, у разі $h = 0,1$ м, коли реалізується максимум магнітної індукції, на рис. 3, а, у безпосередній близькості до поверхні землі поле зменшується до менших значень у порівнянні з магнітним полем, що реалізується за висоти НМГ $h = 0,6$ м.

Детальне пояснення високої ефективності екранування магнітного поля трифазної КЛ шляхом

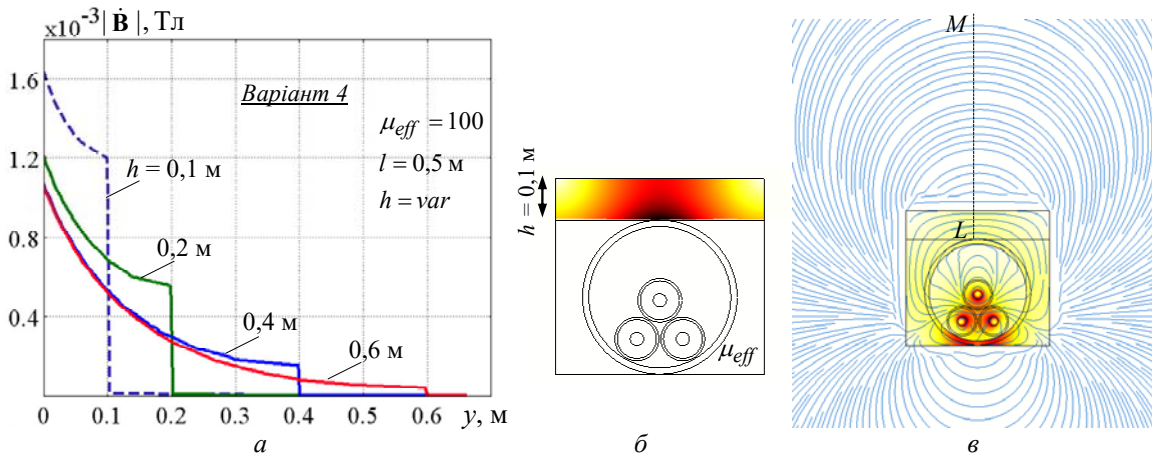


Рис. 3

використання оптимальної (незначної) висоти НМГ представлено у роботах [23 с. 20, рис. 7] та [26 с. 22, пояснення до рис. 8], в яких залежності, аналогічні на рис. 2, а і далі на рис. 5, виявлено за реалізації різних математичних моделей – двовимірної моделі для векторного магнітного потенціалу [23] та тривимірної моделі відносно скалярного магнітного потенціалу [26].

Магнітне поле високовольтної КЛ. Досліджується трифазна кабельна лінія 110 кВ з кабелями, прокладеними трикутником у ґрунті на глибині 1,5 м [29]. Алюмінієві жили кабелів мають поперечний переріз 500 мм^2 , $I_{ном} = 570 \text{ А}$ [30]. Три труби, в яких розміщуються кабелі, виготовлено з композиційного магнітного матеріалу з $\mu_{eff} = var$. Магнітна проникність НМГ і ЗМГ $\mu_{eff} = 100$.

На рис. 4 показано розподіл магнітного поля $|\dot{\mathbf{B}}|$ навколо підземної кабельної лінії для різних варіантів: кабелі знаходяться в трубах з $\mu_{eff} = 100$ – картини поля в активній зоні та розподілу магнітної індукції безпосередньо в трубах (рис. 4, а); кабелі в трубах без магнітних властивостей – $\mu_{eff} = 1$ (рис. 4, б); додатково з насипним композиційним магнітним ґрунтом – для цього випадку показано розподіл поля в НМГ та всередині труб навколо кабелів (рис. 4, в); кабелі в засипному ґрунті з $\mu_{eff} = 100$ (рис. 4, г). Наведено максимальні значення магнітної індукції $|\dot{\mathbf{B}}|_{max}$ поблизу кабелів (унизу картин поля) та максимальне значення поля на поверхні землі над кабелями (угорі в дужках). Відображено взаємний вплив полів кабелів, а у разі труб з магнітного композиційного матеріалу – зосередження магнітного поля в їхньому об'ємі (рис. 4, а, г).

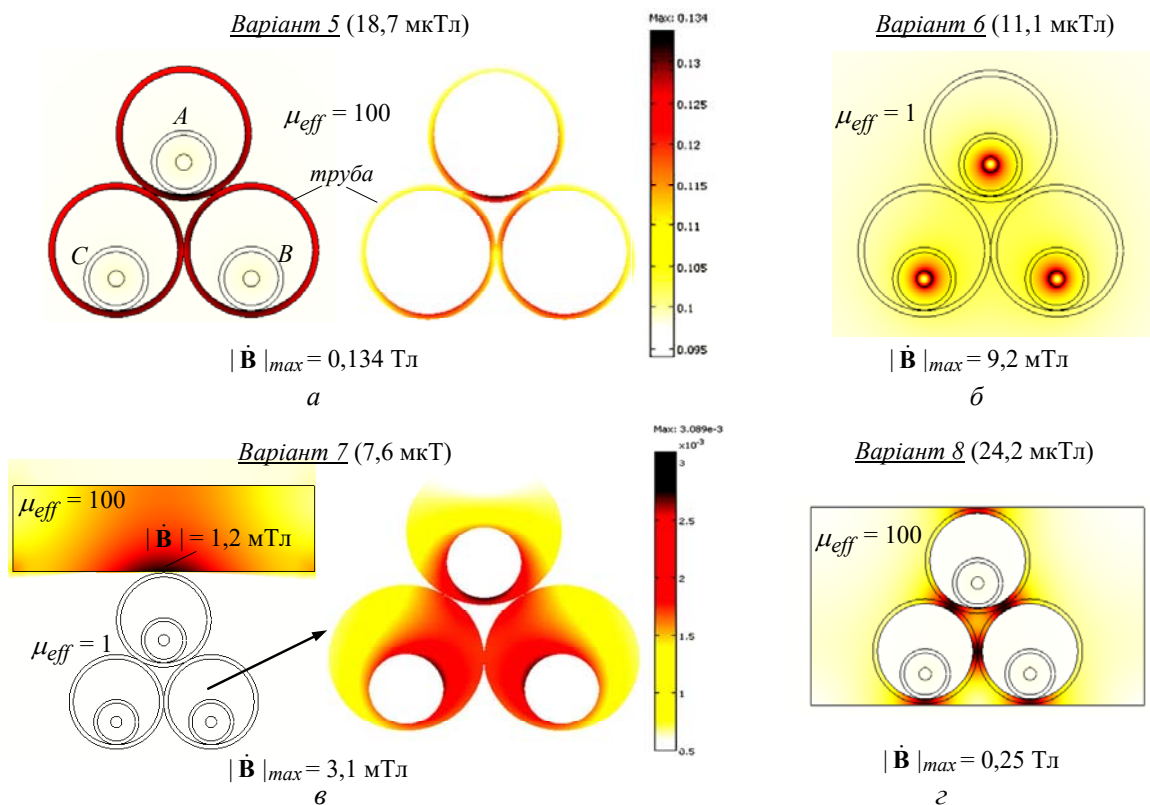


Рис. 4

Як видно з рис. 4, варіанти 5, 8 характеризуються найбільшими значеннями $|\dot{\mathbf{B}}|$ на поверхні землі та навколо кабелів. Ефект збільшення магнітного поля у разі наявності магнітних властивостей труб виявлено та пояснено у роботі [18]. У дослідженому випадку з більш сильними магнітними властивостями труб теж реалізуються більші значення магнітного поля на поверхні землі, а за розташування кабелів додатково у магнітному середовищі – ЗМГ (варіант 8) означений ефект ще більш посилюється. Тому використання труб з магнітними властивостями та ЗМГ у разі розташування кожного кабелю в окремій трубі не є доцільним, і далі для такого розміщення розглядаються звичайні поліетиленові труби без магнітних властивостей ($\mu_{eff} = 1$) і без ЗМГ. Рис. 4, б та в показують, що наявність насипного композиційного ґрунту сприяє зменшенню магнітного поля навколо кабелів (з 9,2 до

3,1 мТл) та на поверхні землі (зниження поля з 11,1 до 7,6 мкТл) за ширини НМГ $l = 0,7$ м та висоті $h = 0,2$ м.

Залежності магнітної індукції на поверхні землі для варіанта 7 (кабелі в немагнітних трубах з НМГ) від висоти НМГ h за різної його ширини l показано на рис. 5. Дані свідчать про наступне.

Найбільша ефективність екранування проявляється за певної висоти НМГ h – в діапазоні 0,05...0,15 м. Використання великого об'єму насипки не є доцільним. Пояснення цьому аналогічне до поданого вище та представленого даними рис. 3, а–в.

Збільшення ширини НМГ l сприяє значно ефективнішому екрануванню магнітного поля.

За рахунок використання НМГ для розглянутих варіантів не вдається зменшити рівень магнітного поля на поверхні землі нижче 6 мкТл.

У загальному випадку значення магнітної індукції на поверхні землі над кабелями залежать від багатьох чинників: розташування кабелів і, відповідно, труб (в одній площині чи трикутником), геометрії прокладання – заглиблення кабелів у ґрунт, відстані між ними, розмірів труб. При цьому, як показали результати моделювання, розташування кабелів в окремих трубах з додатковими засобами екранування менш ефективно у порівнянні з використанням однієї труби для трьох кабелів.

З урахуванням виявлених особливостей та закордонної практики прокладання високовольтних кабелів у трубах проведено дослідження умов, подібних до варіантів 3 та 4 (рис. 1), для кабелів на напругу 110 кВ [30], що знаходяться в загальній трубі з магнітними властивостями ($\mu_{eff} = 100$), мають радіус 25 см та товщину 2 см. Розрахунковим шляхом визначено, що розподіли магнітного поля та основні залежності є аналогічними до представлених на рис. 2, 3, а найбільш ефективні екрануючі можливості реалізуються за наявності разом НМГ і ЗМГ (шириною $l = 0,7$ м; $\mu_{eff} = 100$) певного обсягу – з висотою насипки в межах $h = 0,3...0,5$ м за максимальних значень магнітної індукції на поверхні землі над кабелями $\sim 0,52$ мкТл.

Висновки. 1. Проведено огляд сучасного стану в області прокладання силових кабелів різних класів напруги в трубах та подібних до них замкнених кабельних каналах. Стосовно цього подано інформацію у таких основних напрямках: 1) удосконалення матеріалів для кабельних труб; 2) пошук нових засобів екранування та спеціальних форм кабельних каналів – екранів закритої конфігурації з матеріалів, що мають високу магнітну проникність; 3) дослідження розподілу магнітного поля кабельних ліній з урахуванням екранів; 4) прокладання силових кабелів у поліетиленових трубах разом з волоконно-оптичними модулями для моніторингу технічного стану кабельних систем.

2. Досліджено магнітне поле підземних трифазних кабельних ліній на напругу 35 та 110 кВ, кабелі яких прокладені трикутником, відповідно, в загальній поліетиленовій трубі та в трьох трубах, виготовлених з композиційного магнітного матеріалу, і в спеціальному насипному/засипному ґрунті, який має магнітні властивості. За результатами комп'ютерного моделювання очікується, що використання додаткових магнітних ґрунтів надасть змогу для кабелів в одній трубі досягти в розглянутому випадку зменшення поля на поверхні ґрунту більше, ніж у 2,5 рази (рис. 2), а за наявності насипного ґрунту – єдиного екрануючого засобу – для кабелів у трьох окремих трубах знизити рівень поля до 1,5...1,8 разів (рис. 5).

3. Проаналізовано особливості розподілу і кількісного змінення магнітного поля кабельної лінії в оточуючому середовищі та в трубах залежно від висоти і ширини композиційного насипного/засипного ґрунту. Виявлено та пояснено, що занадто великі обсяги композиційного засипного, а особливо насипного ґрунту, не зможуть забезпечити найбільшої ефективності екранування магнітного поля силових кабелів (рис. 2, 3, 5). Існують оптимальні значення висоти таких ґрунтів задля найбільшого зменшення магнітного поля кабелів на поверхні землі – у разі розглянутих варіантів висотою в середньому 0,1...0,3 м (рис. 2).

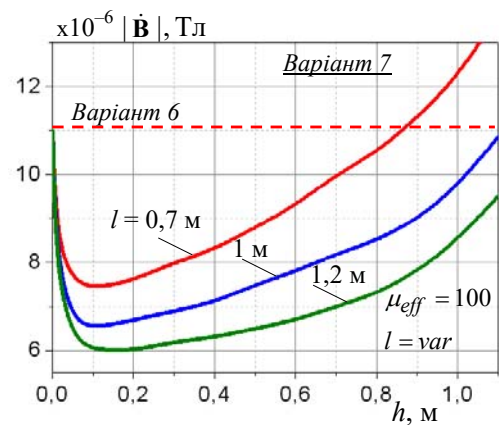


Рис. 5

4. Для випадку прокладання кожного з трьох кабелів трифазних кабельних ліній в окремій трубі визначено неефективність застосування саме магнітних труб, а лише одного насипного ґрунту з магнітними властивостями певної висоти і подовженої ширини (рис. 5).

5. Показано перспективність розміщення високовольтних кабелів в одній загальній трубі з магнітними властивостями з одночасним використанням насипного та засипного композиційних ґрунтів для ефективного екранування магнітного поля кабельних ліній.

Роботу виконано за темою «Розробка основ теорії і методів дослідження впливу несинусоїдних напруг і струмів та виникаючих електротермодинамічних процесів на надійність і ресурс сучасних кабельних ліній електропередачі та на енергоефективність електротехнічних установок резонансного типу» (Шифр "Елрес", Державний реєстраційний номер: 0123U100693), КПКВК 6541030.

POTENTIAL MEANS FOR MITIGATION OF MAGNETIC FIELD GENERATED BY UNDERGROUND POWER CABLES IN POLYETHYLENE PIPES MADE OF COMPOSITE MAGNETIC MATERIAL

I.M. Kucheriava

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

E-mail: rB.irinan@gmail.com

The magnetic field of the medium- and high-voltage underground power cable line, laid in composite polyethylene pipes having magnetic properties, with the use of special loose-fill/fill-up soil of different dimensions (bulk) is studied by computer modeling. The pipes and additional soils around and near the cables are made of a composite material with effective magnetic properties and can act as a magnetic shield that reduces the level of the field on the ground. The efficiency of field shielding depending on the height and width of the composite loose-fill/fill-up soil is analyzed. The existence of the optimal not large (in height) fill-up soil for the best mitigation of the magnetic field on the ground directly above the cables and the influence of the width of the loose-fill/fill-up soils on the shielding efficiency are revealed. The characteristic features of the magnetic field distribution and the field level depending on the availability or non-availability of composite loose-fill soil are presented. The advantages of (trefoil) cable arrangement in one pipe with additional composite loose-fill and fill-up soil are shown. References 30, figures 5.

Key words: underground three-phase cable line, cables laid in pipes, loose-fill/fill-up soil, composite magnetic material, magnetic field shielding, computer modeling.

1. Shidlovskii A.K., Shcherba A.A., Zolotaryov V.M., Podoltsev A.D., Kucheriava I.M. Extra-high voltage cables with polymer insulation. Kyiv: Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2013. 550 p. (Rus)
2. Makarov E.F. Handbook on 0,4–35 kV and 110–1150 kV power networks. Ed. by I.T. Goryunov, A.A. Lyubimov. Vol. 3. Moskva: Papirus-Pro, 2004. 688 p. (Rus)
3. XLPE-insulated power cables for voltage from 6 to 35 kV. Catalogue of Yuzhcable works PJSC. 132 p. URL: www.yuzhcable.com.ua (Rus) (accessed at 23.12.2022).
4. 6–35 kV power cables with XLPE insulation. Odesa: Odessa cable plant Odeskabel. URL: <https://odeskabel.com/ua/products/kabeli-silovye/kabeli-silovye-s-xlpe-izolyatsiej-6-35-kv.html> (Rus) (accessed at 23.12.2022).
5. Dmitriev M.V. Requirements to pipes for laying of power cable lines. *Kabel-news*. 2014. No 6. Pp. 22–26. (Rus)
6. 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)
7. Conti R., Giorgi A., Rendina R., Sartore L., Sena E.A. Technical solutions to reduce 50 Hz magnetic fields from power lines. *IEEE Bologna PowerTech Conference Proceedings*. Bologna, Italy, June 23–26, 2003. 6 p. DOI: <https://doi.org/10.1109/ptc.2003.1304685>
8. PPI (Plastics Pipe Institute) Handbook of PE (polyethylene) Pipe. 2021 The Plastics Pipe Institute, Inc. Chapter 14: Duct and Conduit, 70 p.
9. Boukrouche F., Moreau C., Pelle J., Beaubert F., Harmand S., Moreau O. Mock-up study of the effect of wall distance on the thermal rating of power cables in ventilated tunnels. *IEEE Trans. on Power Delivery*. 2017. Vol. 32. No 6. Pp. 2453–2461. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2016.2629285>
10. Dmitriev M.V. Cable lines laid in polyethylene pipes. Thermal calculation. *Novosti elektrotehniki*. 2013. No 4 (82). Pp. 11–17. (Rus)

11. Pipes for underground cable protection. Catalogue. 24 p. URL: www.evopipes.com (accessed at 23.12.2022).
12. Electric installation code. Kyiv: Minenergovugillya Ukrainy, 2017. 617 p. (Ukr)
13. 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>
14. Rendina R., Posati A., Rebolini M., Bruno G., Bocchi F., Marelli M., Orini A. The new Turbigio-Rho 380 kV transmission line: an example of the use of underground XLPE cables in a meshed transmission grid. CIGRE 2006. Paper B1-302. 12 p.
15. Design of power cable lines for voltage up to 330 kV. Standard SOU-N MEV 40.1-37471933-49:2011 Instruction. No 82. 2017.
16. Guide for installation of extruded dielectric insulated power cable systems rated 69 kV through 138 kV (Second edition). Association of Edison Illuminating Companies, January, 1997.
17. Kyrylenko O.V., Shcherba A.A., Kucheriava I.M. Intellectual technologies for monitoring of technical state of up-to-date high-voltage cable power lines. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2021. No 6. Pp. 29–40. DOI: <https://doi.org/10.15407/technd2021.06.029> (Ukr)
18. Shcherba A.A., Podoltsev O.D., Kucheriava I.M. The study of magnetic field of power cables in polyethylene pipes with magnetic properties. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2020. No 3. Pp. 15–21. DOI: <https://doi.org/10.15407/technd2020.03.015> (Ukr)
19. Kyrylenko O.V., Shcherba A.A., Zolotaryov V.M., Podoltsev O.D., Kucheriava I.M. Underground power cable line. Patent of Ukraine No. 137593. 2019. URL: <https://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=262681&chapter=biblio> (accessed at 23.12.2022).
20. Shcherba A.A., Rezinkin O.L., Rezinkina M.M. Electrophysical processes in dielectric and magnetic media. Kyiv: Naukova Dumka, 2016. 192 p.
21. Polivanov K.M. Ferromagnetic materials. Moskva-Leningrad: Gosudarstvennoe energeticheskoe izdatel'stvo (State energy publishing house), 1957. 256 p.
22. 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/technd2019.05.003> (Rus)
23. Kucheriava I.M. Particularities of magnetic field shielding for underground cable line by composite fill-up soil with magnetic properties. *Pratsi Institutu Elektrodynamiki NAN Ukrainy*. 2021. Is. 58. Pp. 14–22. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2021.58.014> (Ukr)
24. Leon F., Anders G.J. Effects of backfilling on cable ampacity analyzed with the finite element method. *IEEE Trans. on Power Deliver.* 2008. Vol. 23. No 2. Pp. 537–543. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2008.917648>
25. Comsol multiphysics modeling and simulation software. URL: <http://www.comsol.com/> (accessed at 23.12.2022).
26. Shcherba A.A., Podoltsev O.D., Kucheriava I.M. The reduction of magnetic field of underground cable line in essential areas by means of finite-length composite magnetic shields. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2021. No 1. Pp. 17–24. DOI: <https://doi.org/10.15407/technd2022.01.017> (Ukr)
27. Kucheriava I.M. Methods for mitigation of magnetic field generated by underground power cables in polyethylene pipes made of composite magnetic material. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2022. No 3. Pp. 22–28. <https://doi.org/10.15407/technd2022.03.022> (Ukr) (accessed at 23.12.2022).
28. Podoltsev A.D., Kucheriava I.M. Multiphysics modeling in electrical engineering. Kyiv: Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2015. 305 p. (Rus)
29. Guiding technical material on the construction, testing and operation of power cable lines using XLPE insulated cables for a voltage of 64/110 kV: scientific-and-methodical edition. Kharkiv: Maidan, 2007. 62 p. (Rus)
30. Medium- and high-voltage power cables with XLPE insulation. Information bulletin, Joint-Stock Company Yuzhicable works. Kharkov, Ukraine. No 5. 44 p. (Rus)

Надійшла 05.01.2023
Остаточний варіант 13.03.2023