

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»**

**ТКАЧЕНКО ОЛЕКСАНДР ОЛЕГОВИЧ**



УДК 621.3.013.24

**МАГНІТНЕ ПОЛЕ ВИСОКОВОЛЬТНИХ КАБЕЛЬНИХ ЛІНІЙ  
ПРИ ДВОСТОРОННЬОМУ ЗАЗЕМЛЕННІ ЕКРАНІВ КАБЕЛІВ**

Спеціальність 05.09.05 – теоретична електротехніка

**Автореферат**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків – 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у відділі фізики і техніки магнітних явищ Державної установи «Інститут технічних проблем магнетизму Національної академії наук України», м. Харків.

**Науковий керівник** доктор технічних наук, старший науковий співробітник, член-кореспондент НАН України  
**Розов Володимир Юрійович**,  
Державна установа «Інститут технічних проблем магнетизму НАН України», м. Харків,  
директор, завідувач відділу фізики і техніки магнітних явищ.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Васецький Юрій Макарович**,  
Інститут електродинаміки НАН України, м. Київ,  
провідний науковий співробітник відділу  
теоретичної електротехніки;

доктор технічних наук, професор  
**Болюх Володимир Федорович**,  
Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»,  
професор кафедри загальної електротехніки.

Захист відбудеться «30» травня 2019 р. о 14<sup>30</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.17 Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2.

Автореферат розіслано «17» квітня 2019 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



В.В. Куліченко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Сучасна тенденція розвитку міських електромереж передбачає широке застосування трифазних високовольтних кабельних ліній (КЛ) електропередачі, що виконуються одножильними кабелями з ізоляцією зі зшитого поліетилену. Проте разом з високими експлуатаційними характеристиками такі КЛ створюють істотне магнітне поле (МП), індукція якого може в 5-10 разів перевищувати діючі екологічні норми. Тому при проектуванні трас КЛ обов'язковим є ретельний розрахунок їх МП, який виконується відповідно до діючих нормативних документів за допомогою аналітичних розв'язків на основі відомих методів моделювання. Водночас при двосторонньому заземленні екранів кабелів КЛ, яке використовується відповідно до нормативних документів для обмеження наведеного на екранах електричного потенціалу, утворюються замкнені контури, в яких індуються повздовжні струми. Ці струми створюють додаткове МП, яке істотно змінює первинне МП КЛ, що необхідно враховувати при моделюванні та розрахунку результуючого МП КЛ.

Задачі моделювання та розрахунку МП при двосторонньому заземленні екранів кабелів КЛ можуть бути вирішені чисельними методами. Однак при проектуванні КЛ переваги мають аналітичні методи, які відрізняються більш доступною для проєктантів КЛ методикою розрахунку та прозорою фізичною інтерпретацією результату. Проте методи рішення вказаних задач за допомогою аналітичних розв'язків на сьогодні досліджені недостатньо, що пов'язано з відсутністю теоретично обґрунтованих методів визначення комплексних амплітуд струмів в екранах трифазних КЛ та методів моделювання індукції їх МП при будь-яких схемах прокладання фазних кабелів КЛ («у площині», «у трикутник» тощо).

Розвиток методів фізико-математичного моделювання та розрахунку магнітного поля кабельних ліній при двосторонньому заземленні екранів кабелів є актуальною темою, якій присвячено дану дисертаційну роботу.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційну роботу виконано у відділі фізики і техніки магнітних явищ Державної установи «Інститут технічних проблем магнетизму НАН України» (ДУ «ІТПМ НАН України», м. Харків). Основні результати теоретичних та експериментальних досліджень кандидатської дисертації використано у ДУ «ІТПМ НАН України» при виконанні науково-дослідних робіт «Розвиток методів моделювання та нормалізації зовнішнього магнітного поля ліній електропередачі» (ДР № 0111U010332, 2016 р.) в рамках цільової програми наукових досліджень ВФТПЕ НАН України «Наукові основи ефективного перетворення енергії» та «Розроблення основних положень нормативного документу з проектування кабельних ліній напругою до 330 кВ зі зменшеним магнітним полем» (ДР № 0116U002817, 2016 – 2018 рр.) в рамках Цільової комплексної програми наукових досліджень НАН України «Науково-технічні основи енергетичного співробітництва між Україною та Європейським Союзом («Об'єднання-3»), в яких здобувач приймав участь та був виконавцем окремих розділів.

**Мета і задачі дослідження.** Метою роботи є розвиток методів вирішення задач моделювання та розрахунку МП високовольтних трифазних КЛ при двосторонньому заземленні їх екранів за допомогою аналітичних розв'язків.

Для досягнення зазначеної мети необхідно вирішити наступні задачі:

- розробити узагальнену фізико-математичну модель МП трифазних КЛ при двосторонньому заземленні власних екранів кабелів на основі аналітичних розв'язків, та оцінити її похибку, обумовлену нерівномірністю розподілу густини струму в екранах кабелів;

- отримати співвідношення для інженерного розрахунку коефіцієнта екранування МП КЛ при двосторонньому заземленні екранів КЛ в залежності від параметрів кабелів для типових схем їх прокладання («у трикутник», «у площині»);

- отримати співвідношення для інженерного розрахунку коефіцієнта екранування МП КЛ при двосторонньому заземленні екранів КЛ, охоплених феромагнітними осердями, в залежності від параметрів осердь та параметрів кабелів для типових схем їх прокладання – «у трикутник» та «у площині»;

- верифікувати отримані розрахункові співвідношення шляхом натурного експерименту та чисельного розрахунку;

- розробити методику розрахунку магнітного поля трифазних кабельних ліній при двосторонньому заземленні їх екранів та струмів в екранах.

*Об'єкт дослідження* – магнітне поле високовольтних трифазних кабельних ліній при двосторонньому заземленні екранів кабелів.

*Предмет дослідження* – методи фізико-математичного моделювання та розрахунку магнітного поля високовольтних трифазних кабельних ліній при двосторонньому заземленні екранів кабелів.

**Методи дослідження.** Рішення поставлених задач ґрунтується на фундаментальних положеннях теорії електромагнітного поля та теоретичної електротехніки, перетворенні Кларк, методі комплексних амплітуд та методі скінченних елементів.

#### **Наукова новизна одержаних результатів.**

1. Вперше, на основі використання аналітичних розв'язків, розроблено узагальнену фізико-математичну модель магнітного поля трифазних кабельних ліній при двосторонньому заземленні власних екранів кабелів, що дозволяє здійснювати моделювання при будь-яких схемах прокладання кабелів.

2. Вперше, за допомогою розробленої фізико-математичної моделі, отримані співвідношення, які дозволяють визначати магнітне поле та струми в екранах кабелів при їх двосторонньому заземленні у разі прокладання кабелів «у площині».

3. Запропоновано нове наближене компактне співвідношення для інженерного розрахунку коефіцієнта екранування магнітного поля реальних кабельних ліній при двосторонньому заземленні екранів у разі прокладання кабелів «у площині», яке отримано на основі розробленої фізико-математичної моделі та застосування перетворення Кларк і дозволяє виконувати розрахунок з методичною похибкою в межах 5%.

4. Розвинено фізико-математичну модель магнітного поля трифазних кабельних ліній при двосторонньому заземленні власних екранів кабелів для випадку охоплення

кабелів феромагнітними осердями (ФО) та вперше, на основі використання аналітичних розв'язків, отримано співвідношення, що дозволяють виконувати інженерний розрахунок коефіцієнтів екранування магнітного поля кабельних ліній з ФО.

**Практичне значення отриманих результатів.** Розроблено і експериментально верифіковано методику розрахунку магнітного поля трифазних кабельних ліній при двосторонньому заземленні екранів кабелів, яка дозволяє на етапі проектування КЛ здійснювати розрахунок МП для будь-якої схеми прокладання кабелів КЛ і забезпечує перевірку відповідності рівня МП екологічним нормам.

Основні результати виконаних в дисертації досліджень і практичних розробок використано:

- в ДУ «ІТПМ НАН України» при виконанні фундаментальних і прикладних досліджень в рамках тематичного плану, про що складено відповідний акт;

- в НЕК «Укренерго» при розробці нових нормативних документів з проектування КЛ і розрахунку їх МП, про що складено відповідний акт;

- у введених в дію нормативних документах Міненерговугілля: «СОУ-Н ЕЕ 20.179:2008. Розрахунок електричного і магнітного полів ліній електропередавання. Методика (зі змінами). – Київ: Міненерговугілля України, 2016. – 37 с» та «СОУ-Н-МЕВ40.1-37471933-49:2011.2. Проектування кабельних ліній напругою до 330 кВ: Настанова (зі змінами). – Київ: Міненерговугілля України, 2017. – 139 с», в розділах присвячених проектуванню та розрахунку МП КЛ при двосторонньому заземленні екранів кабелів;

- в новій методиці розрахунку діючих значень струмів в екранах кабелів при їх прокладанні «у площині», що передана для впровадження в НЕК «Укренерго» і дозволяє зменшити похибку розрахунку до 5%, яка наразі перевищує 30%.

**Особистий внесок здобувача.** Усі положення і результати, що виносяться на захист дисертаційної роботи, отримано здобувачем самостійно. Автором розроблено і експериментально перевірено узагальнену фізико-математичну модель МП трифазних КЛ при двосторонньому замиканні власних екранів кабелів, що може застосовуватись за будь-якої схеми прокладання кабелів; отримано розрахункові співвідношення для МП КЛ при різних схемах прокладання кабелів та наближене компактне співвідношення для прокладання кабелів «у площині»; розроблено і експериментально перевірено фізико-математичну модель МП трифазних КЛ, кабелі яких охоплені ФО, та отримано співвідношення для інженерного розрахунку коефіцієнта екранування МП. У роботах, опублікованих у співавторстві, здобувачеві належить: [1, 10] – розробка двовимірної моделі КЛ для розрахунку МП, розрахунок коефіцієнтів  $m$  ослаблення первинного МП КЛ і їх експериментальна перевірка; [2] – проведення експериментальних досліджень МП КЛ при охопленні кабелів ФО та аналіз їх результатів; [3, 9, 12] – розробка узагальненої фізико-математичної моделі МП КЛ при двосторонньому замиканні екранів, отримання розрахункових співвідношень і їх експериментальна перевірка; [4, 7, 8] – отримання аналітичних виразів для розрахунку діючих значень струмів в екранах кабелів при двосторонньому заземленні кабельної лінії для прокладання кабелів «у площині» та «у трикутник»; [6, 11] – розробка фізико-математичної моделі МП КЛ, кабелі якої охоплені ФО. Стаття [5] опублікована здобувачем без співавторів.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення і наукові результати досліджень за темою дисертації доповідались і обговорювались на Міжнародних наукових конференціях, симпозиумах: «Проблеми сучасної електротехніки» (Київ, 2016 р.), «2017 IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering» (Львів 2017 р.), «IEEE 17th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory» (Київ, 2018 р.), «Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика» (Харків, 2015 – 2018 рр.), «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (Харків, 2016 р., 2017 р.), «Удосконалення енергоустановок методами математичного і фізичного моделювання» (Харків 2017 р.), «Актуальні проблеми автоматизації та приладобудування» (Харків 2017 р.), а також на семінарах ДУ «Інститут технічних проблем магнетизму НАН України» (Харків, 2016 – 2018 рр.).

**Публікації.** Основний зміст дисертації відображено у 12 наукових працях, з них 6 статей у наукових фахових виданнях України (2 статті включено до наукометричної бази Scopus і 4 статті – до наукометричної бази Web of Science) та 6 тез доповідей на міжнародних конференціях (2 тези включено до наукометричної бази Scopus).

**Структура та обсяг дисертаційної роботи.** Дисертація складається з анотації двома мовами, змісту, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Загальний обсяг дисертації становить 144 сторінки; з них 57 рисунків по тексту; 14 таблиць по тексту; список зі 106 найменувань використаних джерел на 12 сторінках; 4 додатки на 15 сторінках.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

**У вступі** обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано мету і задачі наукового дослідження, наведено дані про зв'язок роботи з науковими програмами та темами, викладено наукову новизну, практичне значення, наведено відомості про апробацію, публікації та впровадження.

**У першому розділі** проаналізовано відомі методи моделювання та розрахунку зовнішнього магнітного поля технічних об'єктів в цілому та ліній електропередачі (ЛЕП) зокрема. Розглянуто особливості КЛ як джерел МП при двосторонньому заземленні власних екранів кабелів та проведено аналіз можливості використання відомих методів і методик для моделювання та розрахунку їх МП. Виконано постановку задач досліджень.

Дослідженню МП різноманітних технічних об'єктів (ТО) присвячені праці таких відомих вчених як І.Є. Тамм, О.В. Тозоні, Д. Стреттон, К. Шимоні, С.М. Апполонський, В.М. Боєв, Ю.М. Васецький, В.М. Михайлов, А.Д. Нестеренко, А.Д. Подольцев, М.М. Резинкіна, В.Ю. Розов, А.А. Щерба та інших.

При розгляді МП промислової частоти, що створюється ТО, приймаються наступні припущення: ТО знаходяться в просторі вільному від джерел і вихорів МП, містять виключно струмопровідні конструктивні елементи, не мають феромагнітних мас та функціонують в сталих режимах. Це дозволяє розглядати змінне МП ТО в квазістаціонарному наближенні. Таке МП має скалярний магнітний потенціал, що

визначається рівнянням Лапласа, а напруженість МП в довільній точці  $P$  зовнішнього простору може бути визначена через густину струму  $\vec{\delta}$  струмопровідних елементів ТО

$$\vec{H}(P, t) = \text{rot} \frac{1}{4\pi} \int_V \frac{\vec{\delta}(\vec{r}, t)}{|\vec{r}_0 - \vec{r}|} dV, \quad (1)$$

де  $\vec{r}_0$  та  $\vec{r}$  – відстань від центру ТО до точки спостереження  $P$  та елементу струму  $\vec{\delta}(\vec{r}, t)dV$ , відповідно.

Магнітне поле таких ТО як повітряні та кабельні ЛЕП, що створюється їх фазними струмами, досліджено в роботах Ф. Моро, Р. Тиррі, В.Ю. Коровкіна, А.Д. Подольцева, В.Ю. Розова, А.Ю. Токарського та ін. Зокрема, за результатами робіт В.Ю. Розова, що впроваджені в діючих нормативних документах Міненергослужби України, показано, що найбільші значення магнітної індукції реальних високовольтних КЛ, що складаються з одножильних кабелів, можуть перевищувати нормативний рівень 0,5 мкТл для житлових приміщень в 10 разів при наближенні до житла менш ніж на 2 м та в 4,5 рази перевищувати нормативний рівень 10 мкТл для населеної місцевості в зонах муфтових з'єднань. Це потребує прийняття спеціальних заходів з нормалізації магнітного поля при проектуванні КЛ. Але у вказаних роботах магнітне поле трифазних КЛ при двосторонньому заземленні їх екранів досліджено недостатньо.

Так, особливістю високовольтних КЛ з ізоляцією зі зшитого поліетилену (рис. 1) є наявність мідних циліндричних екранів, в яких можуть протікати повздовжні струми при їх заземленні. Заземлення екранів здійснюється відповідно до нормативних документів та необхідне для обмеження до безпечного рівня наведеного на екранах електричного потенціалу, а також відводу в землю ємнісних струмів і струмів короткого замикання. Найбільш поширеним є двостороннє заземлення екранів трифазних КЛ (рис. 2, а), при реалізації якого утворюються додаткові контури для протікання струмів в екранах  $\dot{I}_{ek}$  (рис. 2, б), що індукуються струмами жил  $\dot{I}_{jk}$  КЛ. Струми в контурі заземлення КЛ у стаціонарному режимі роботи є незначними, що обґрунтовано у відомих дослідженнях та прийнято в діючих нормативних документах. Тому при подальшому аналізі ними можна знехтувати і перейти від схеми заземлення екранів (рис. 2, а) до

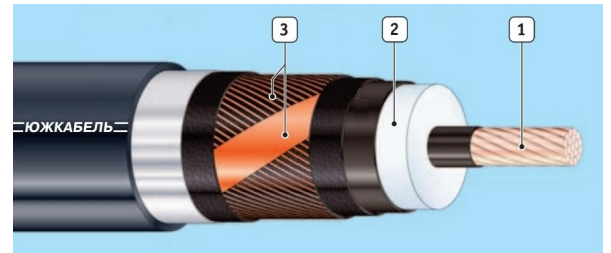


Рисунок 1 – Основні конструктивні елементи високовольтного кабелю:

- 1 – алюмінієва або мідна жила,
- 2 – ізоляція зі зшитого поліетилену,
- 3 – мідний екран

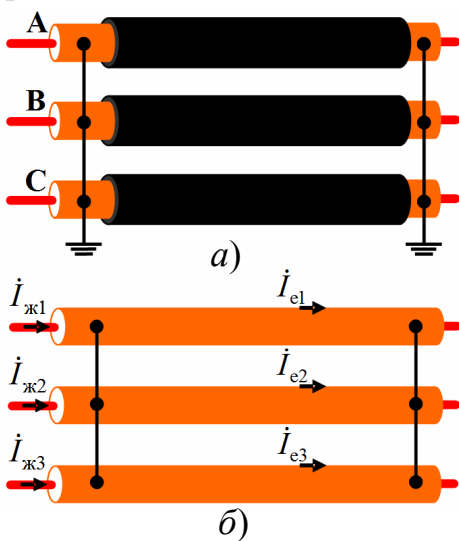


Рисунок 2 – Трифазна КЛ з двостороннім заземленням екранів (а), та двостороннім замиканням екранів (б)

схеми їх замикання (рис. 2, б). Тоді індукція  $\dot{B}_{\text{кл}}$  МП КЛ є суперпозицією індукцій МП, що створюються струмами жил та струмами екранів кабелів, відповідно

$$\dot{B}_{\text{кл}} = \sum_{k=1}^3 (\dot{B}_{\text{ж}k} + \dot{B}_{\text{е}k}). \quad (2)$$

Методи моделювання та розрахунку  $\dot{B}_{\text{ж}k}$  відомі. Якщо КЛ протяжна, то МП кожного з кабелів є плоскопаралельним та може бути визначено відповідно до (1) на основі методу комплексних амплітуд. Тоді враховуючи, що  $\dot{H}_{\text{ж}k} = \mu_0^{-1} \cdot \dot{B}_{\text{ж}k}$ , співвідношення для визначення горизонтальної  $X$ - та вертикальної  $Y$ -компоненти індукції МП, що створюється струмом жили  $k$ -ого кабелю, можна представити як:

$$\dot{B}_{\text{ж}k_x} = \sum_{k=1}^3 \frac{\mu_0}{2\pi} i_{\text{ж}k} \cdot \frac{-(y - y_k)}{(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2}, \quad \dot{B}_{\text{ж}k_y} = \sum_{k=1}^3 \frac{\mu_0}{2\pi} i_{\text{ж}k} \cdot \frac{x - x_k}{(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2}, \quad (3)$$

де  $(x, y)$  – координати точки спостереження;  $(x_k, y_k)$  – координати осі  $k$ -ого кабелю.

Однак у відомих літературних джерелах відсутні аналітичні розв'язки задачі розрахунку МП, яке створюється струмами  $i_{\text{е}k}$ , що унеможлиблює визначення МП КЛ відповідно до (2). Зокрема, в роботах М.В. Коровкіна та Г.В. Грешнякова, присвячених дослідженню електромагнітних процесів в КЛ при двосторонньому заземленні, використовується чисельне моделювання і основний акцент зроблено на розв'язок теплової задачі.

В роботах М.В. Дмитрієва, Е.Т. Ларіної, О.В. Бистрова та Л.О. Коврігіна отримано аналітичні вирази для розрахунку діючих значень струмів в екранах кабелів при двосторонньому заземленні тільки для випадку прокладання кабелів «у трикутник». Але результати цих робіт не дозволяють коректно вирішувати задачі моделювання МП високовольтних трифазних КЛ при двосторонньому заземленні їх екранів за допомогою аналітичних розв'язків для будь-якої схеми прокладання кабелів і, в першу чергу, «у площині».

Аналітичний розв'язок задачі розрахунку МП КЛ при двосторонньому заземленні екранів використано в методиці СОУ-Н ЕЕ 20.179: 2008 (редакція 2008 р.). В ній двосторонньо замкнені екрани кабелів розглядаються як система електромагнітного екранування. Ефективність цієї системи може бути визначена за допомогою коефіцієнта екранування  $SF$ , який визначається відповідно до (4) як відношення діючого значення індукції МП КЛ з розімкненими екранами  $B_{\text{ж}}$  до діючого значення індукції МП КЛ з замкненими екранами  $B_{\text{кл}}$ , або за допомогою коефіцієнта ослаблення  $m$ , який є оберненим до  $SF$

$$B_{\text{кл}} = m \cdot B_{\text{ж}} = \frac{B_{\text{ж}}}{SF}. \quad (4)$$

Однак досвід застосування цієї методики та результати експериментальних досліджень індукції МП КЛ із замкненими екранами показали її істотну (більше 40%) похибку, що обумовлена суттєвою методичною похибкою визначення наведених у методиці коефіцієнтів ослаблення  $m$ .

Таким чином, для коректного вирішення задач моделювання та розрахунку МП високовольтних трифазних КЛ при двосторонньому заземленні їх екранів за допомогою аналітичних розв'язків, необхідний розвиток відомих методів моделювання та розрахунку їх МП.

У другому розділі отримано аналітичний розв'язок задачі моделювання магнітного поля трифазних кабельних ліній при двосторонньому заземленні власних екранів кабелів, визначено комплексні амплітуди струмів в екранах і коефіцієнти екранування МП при різних схемах прокладання кабелів, в тому числі для кабелів, охоплених ФО.

Рішення задачі моделювання МП КЛ виконується при наступних припущеннях: кабелі трифазної КЛ, що працює в сталому симетричному режимі з частотою 50 Гц, прямолінійні, нескінченно довгі та укладені паралельно один одному; двостороннє заземлення екранів кабелів КЛ заміщується їх двостороннім

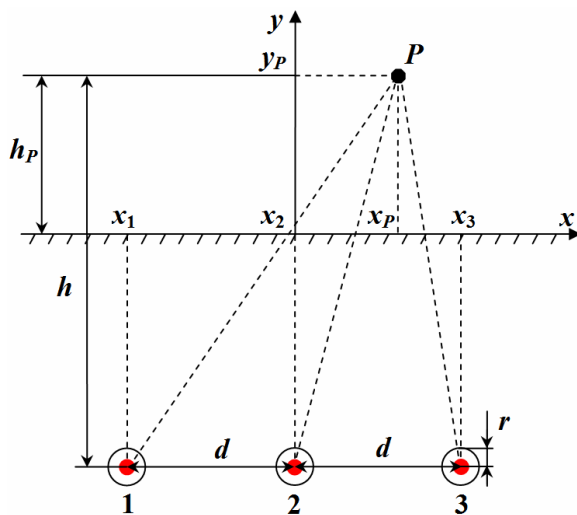


Рисунок 3 – Схема для розрахунку МП КЛ у точці спостереження  $P$  ( $h_P = 0,5$  м,  $h = 1,2 \div 2,0$  м)

замиканням; густина індукваного струму в екрані кожного кабелю рівномірна в поперечному перерізі; товщина екрана істотно менша за його радіус, що дозволяє розглядати екран кабелю як циліндричну поверхню; відстань до точки спостереження МП КЛ щонайменше вдвічі більша за відстань між її кабелями, а струм в екранах не впливає на струм у жилах кабелів.

В силу прийнятих припущень МП трифазних КЛ є плоскопаралельним, тому моделювання виконується у двовимірній постановці (рис. 3).

Оскільки густина струму в екранах прийнята рівномірною, індукція  $\vec{B}_{ek}$  може бути визначена за допомогою (3) після

заміни струму  $\dot{I}_{jk}$  на  $\dot{I}_{ek}$ . Тоді вирази для просторових  $X$ - та  $Y$ -компонент комплексних амплітуд індукції МП відповідно до (2) і (3), а також діюче значення індукції МП КЛ можуть бути визначені як:

$$\dot{B}_{клx} = \sum_{k=1}^3 \frac{\mu_0}{2\pi} (\dot{I}_{jk} + \dot{I}_{ek}) \frac{-(y - y_k)}{(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2}, \quad \dot{B}_{кly} = \sum_{k=1}^3 \frac{\mu_0}{2\pi} (\dot{I}_{jk} + \dot{I}_{ek}) \frac{x - x_k}{(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2}; \quad (5)$$

$$B_{кл} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{|\dot{B}_{клx}|^2 + |\dot{B}_{кly}|^2}.$$

З (5) витікає, що для розрахунку МП КЛ необхідно визначити комплексні амплітуди струмів  $\dot{I}_{ek}$ , що індукуються в екранах кабелів. Для визначення цих струмів виконується аналіз електромагнітних процесів в трифазній КЛ з двосторонньо замкненими екранами на основі еквівалентної схеми, представленої на (рис. 4).

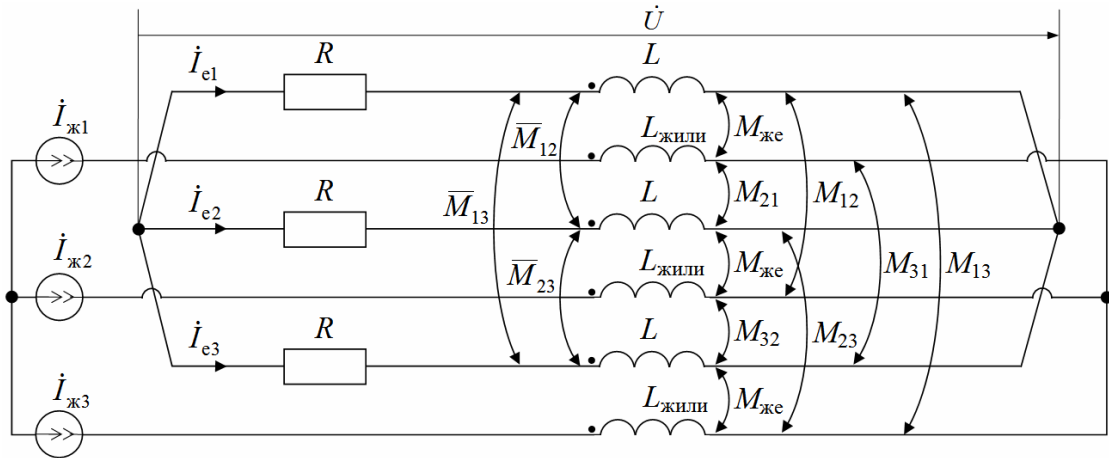


Рисунок 4 – Еквівалентна електрична схема трифазної КЛ з двосторонньо замкненими екранами

Електромагнітні процеси в КЛ відповідно до її еквівалентної схеми (рис. 4) можуть бути описані наступною системою рівнянь

$$\begin{cases} -(R + j\omega L)\dot{I}_{e1} - j\omega M_{12}\dot{I}_{e2} - j\omega M_{13}\dot{I}_{e3} + \dot{U} = j\omega M_{же1}\dot{I}_{ж1} + j\omega M_{12}\dot{I}_{ж2} + j\omega M_{13}\dot{I}_{ж3}; \\ -(R + j\omega L)\dot{I}_{e2} - j\omega M_{21}\dot{I}_{e1} - j\omega M_{23}\dot{I}_{e3} + \dot{U} = j\omega M_{же2}\dot{I}_{ж2} + j\omega M_{21}\dot{I}_{ж1} + j\omega M_{23}\dot{I}_{ж3}; \\ -(R + j\omega L)\dot{I}_{e3} - j\omega M_{31}\dot{I}_{e1} - j\omega M_{32}\dot{I}_{e2} + \dot{U} = j\omega M_{же3}\dot{I}_{ж3} + j\omega M_{31}\dot{I}_{ж1} + j\omega M_{32}\dot{I}_{ж2}; \\ \dot{I}_{e1} + \dot{I}_{e2} + \dot{I}_{e3} = 0, \end{cases} \quad (6)$$

де  $\dot{I}_{жk}$  та  $\dot{I}_{ek}$  – відповідно, комплексні амплітуди струмів в жилі та екрані  $k$ -ого кабелю;  $R$  – активний опір екрана кабелю довжиною  $l$ ;  $\omega = 2\pi \cdot 50$ ,  $s^{-1}$  – кутова частота струму;  $L$  – власна індуктивність екрана;  $M_{же}$  – коефіцієнт взаємної індукції між жилою і екраном одного кабелю;  $M_{ik}$  – коефіцієнт взаємної індукції між екраном  $i$ -ого та жилою  $k$ -ого кабелів;  $\bar{M}_{ik}$  – коефіцієнт взаємної індукції між екраном  $i$ -ого та екраном  $k$ -ого кабелів;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ , Гн/м – магнітна стала;  $j$  – уявна одиниця.

Індуктивність  $L$  визначена за допомогою відомого співвідношення для циліндричного порожнистого екрана, а розрахункові співвідношення для коефіцієнтів взаємної індукції  $M_{же}$ ,  $M_{ik}$ ,  $\bar{M}_{ik}$  отримані шляхом подвійного інтегрування по елементарним ниткам струмів відповідних жил та екранів:

$$L = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left( \ln \frac{2l}{r} - 1 \right), \quad M_{же} = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left( \ln \frac{2l}{r} - 1 \right), \quad M_{ik} = \bar{M}_{ik} = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left( \ln \frac{2l}{d_{ik}} - 1 \right), \quad (7)$$

де  $r$  – радіус перерізу екрана;  $d_{ik}$  – відстань між осями  $i$ -ого та  $k$ -ого кабелів.

Таким чином, співвідношення (5)-(7) описують вперше розроблену фізико-математичну модель МП КЛ при двосторонньому замиканні екранів кабелів, яка дозволяє визначати величини струмів в екранах, а також знаходити розподіл МП трифазної КЛ для будь-яких схем прокладання кабелів.

Використовуючи розроблену фізико-математичну модель (5)-(7) можна визначити коефіцієнти екранування  $SF$  МП для найбільш поширених схем прокладання кабелів КЛ «у трикутник» (рис. 5, а) та «у площині» (рис. 5, б).

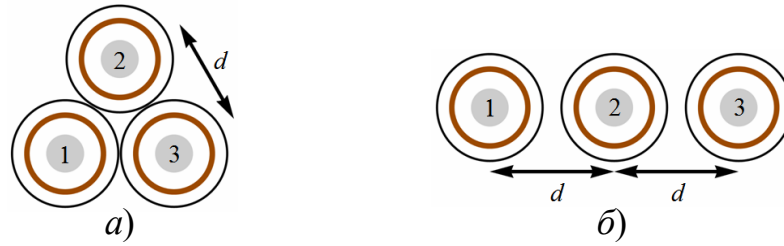


Рисунок 5 – Прокладання КЛ: «у трикутник» (а), «у площині» (б)

**При прокладанні кабелів КЛ «у трикутник»** коефіцієнти взаємної індукції між екранами та екраном і жилою сусідніх кабелів рівні між собою, тобто  $\forall i \neq k$   $M_{ik} = M = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left( \ln \frac{2l}{d} - 1 \right)$ . Для цього випадку рішення системи рівнянь (6) з урахуванням (7) має вигляд

$$\dot{I}_{ек}^{тр} = -\dot{I}_{жк} \cdot \frac{j\omega(M_{же} - M)}{R + j\omega(L - M)} = -\dot{I}_{жк} \cdot \frac{j\omega M^*}{R^* + j\omega M^*} = \alpha \cdot \dot{I}_{жк}, \quad \alpha = \frac{-j\omega M^*}{R^* + j\omega M^*}, \quad (8)$$

де  $M^* = M_{же} - M = L - M = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \ln \frac{d}{r}$  – еквівалентна індуктивність одиниці довжини екрана кабелю;  $R^*$  – опір одиниці довжини екрана кабелю.

Відповідно, за допомогою (4)-(5) та (8) можна отримати співвідношення для визначення коефіцієнта екранування  $SF$  МП при прокладанні КЛ «у трикутник»

$$SF_{тр} = \frac{1}{|1 + \alpha|} = \left| 1 + j \cdot \frac{\mu_0 \omega}{2\pi R^*} \cdot \ln \frac{d}{r} \right|. \quad (9)$$

**При прокладанні кабелів КЛ «у площині»** коефіцієнти взаємної індукції не рівні між собою:

$$M_{12} = M_{23} \neq M_{31}, \quad M_{12} = M_{23} = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left( \ln \frac{2l}{d} - 1 \right), \quad M_{31} = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left( \ln \frac{l}{d} - 1 \right). \quad (10)$$

Рішення системи (6)-(7) для випадку, коли струми в жилах утворюють систему струмів прямої послідовності, має наступний вигляд:

$$\dot{I}_{е1}^{пл} = \dot{I}_{ж1} \cdot \frac{Q \cdot \ln 2\Delta \cdot \ln \frac{\Delta^3}{2} + \sqrt{3} \ln 2 - j \ln 4\Delta^3}{-Q \cdot \ln 2\Delta \cdot \ln \frac{\Delta^3}{2} + \frac{3}{Q} + 2j \ln 2\Delta^3};$$

$$\dot{I}_{е2}^{пл} = \dot{I}_{ж2} \cdot \frac{Q \ln \frac{\Delta^3}{2}}{-Q \ln \frac{\Delta^3}{2} + 3j}, \quad \dot{I}_{е3}^{пл} = \dot{I}_{ж3} \cdot \frac{Q \cdot \ln 2\Delta \cdot \ln \frac{\Delta^3}{2} - \sqrt{3} \ln 2 - j \ln 4\Delta^3}{-Q \cdot \ln 2\Delta \cdot \ln \frac{\Delta^3}{2} + \frac{3}{Q} + 2j \ln 2\Delta^3}, \quad (11)$$

де  $Q = \frac{\mu_0 \omega}{2\pi R^*}$ ,  $\Delta = \frac{d}{r}$  – безрозмірні параметри КЛ.

Якщо струми в жилах утворюють систему струмів зворотної послідовності, то в (11) коефіцієнти при  $\dot{I}_{ж1}$  та  $\dot{I}_{ж3}$  поміняються місцями.

Таким чином, за допомогою запропонованої фізико-математичної моделі (5)-(7) вперше отримано аналітичні співвідношення (11) для розрахунку комплексних значень струмів в екранах кабелів КЛ при двосторонньому замиканні екранів у разі прокладання кабелів «у площині». При цьому аналітичне співвідношення для розрахунку коефіцієнта екранування  $SF_{пл}$  при прокладанні кабелів «у площині» може бути отримане з (4)-(5) та (11), але воно має досить громіздкий вигляд, що ускладнює його практичне застосування при проектуванні КЛ.

Для отримання компактного виразу  $SF_{пл}$  при прокладанні кабелів «у площині» скористаємося перетворенням Кларк, яке дозволяє здійснити перетворення струмів симетричної трифазної системи у дві однофазні. Тоді струми в жилах кабелів можуть бути представлені як суперпозиція  $\alpha$ - і  $\beta$ -компонент перетворення Кларк:

$$\dot{I}_{ж1} = -\frac{\dot{I}_\alpha}{2} + \frac{\sqrt{3}\dot{I}_\beta}{2}, \quad \dot{I}_{ж2} = \dot{I}_\alpha, \quad \dot{I}_{ж3} = -\frac{\dot{I}_\alpha}{2} - \frac{\sqrt{3}\dot{I}_\beta}{2}, \quad (12)$$

де  $\dot{I}_\alpha = I$ ,  $\dot{I}_\beta = -j \cdot I$ ,  $I$  – амплітуда струму в жилах кабелів.

Якщо МП КЛ розраховується в точці  $P$ , що віддалена від КЛ на відстань більшу ніж подвійна відстань  $d$  між фазними кабелями, то МП КЛ з похибкою в межах 5% визначається його дипольною складовою, що формується  $\beta$ -компонентами струмів жил. З (12) випливає, що  $\beta$ -компонента струму у жилі середнього кабелю дорівнює нулю. В силу симетрії  $\beta$ -компонента струму в екрані середнього кабелю також дорівнює нулю. Тому можна перейти від розгляду трифазної КЛ до однофазної з еквівалентним МП, яка складається із першого та третього кабелів (рис. 6) з амплітудою струму в їх жилах  $\sqrt{3}I/2$ . Екрани цих двох кабелів з'єднані на кінцях та утворюють замкнений екранний контур.

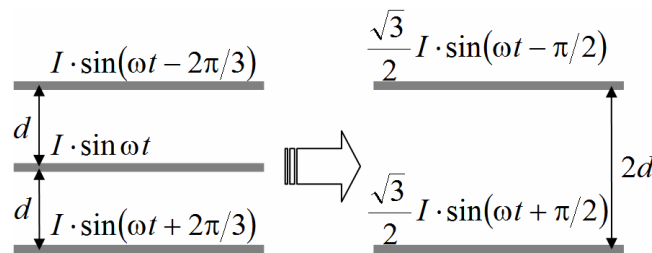


Рисунок 6 – Трифазна КЛ та однофазна КЛ з еквівалентним МП

Тоді комплексна амплітуда струму в екранному контурі еквівалентної однофазної КЛ може бути представлена як

$$\dot{I}_e^{пл} = j \frac{\sqrt{3}I}{2} \cdot j \omega \frac{\mu_0}{\pi} \ln \frac{2d}{r} \left/ \left( 2R^* + j \omega \frac{\mu_0}{\pi} \ln \frac{2d}{r} \right) \right. \quad (13)$$

Підставляючи (12)-(13) у (4)-(5) отримуємо компактне розрахункове співвідношення для визначення коефіцієнта екранування  $SF_{пл}$  МП КЛ при прокладанні кабелів «у площині», що має методичну похибку не більш 5%

$$SF_{\text{пл}} = \left| 1 + j \cdot \frac{\mu_0 \omega}{2\pi R^*} \cdot \ln \frac{2d}{r} \right|. \quad (14)$$

Таким чином, на основі запропонованої фізико-математичної моделі, автором вперше отримано компактний вираз (14) для розрахунку коефіцієнта екранування МП КЛ при прокладанні кабелів «у площині», гранична методична похибка якого для реальних КЛ не перевищує 5%.

**КЛ з феромагнітними осерддями.** У деяких випадках кожний з кабелів КЛ, при двосторонньому заземленні екранів кабелів, охоплюється ФО (рис. 7), що

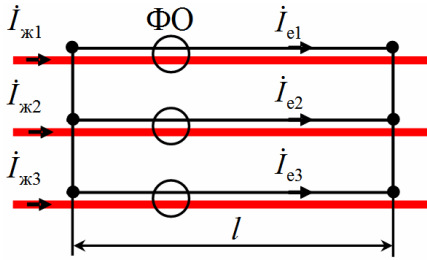


Рисунок 7 – КЛ з двостороннім замиканням екранів та ФО

дозволяє посилити магнітний зв'язок між струмами жил та екранів кабелів КЛ і збільшити коефіцієнт екранування МП при двосторонньому заземленні екранів кабелів.

Для визначення коефіцієнту екранування МП розглядається трифазна КЛ (рис. 7) з прокладанням кабелів «у трикутник», що охоплені циліндричними ФО. При цьому для струмів в екранах КЛ виконується 1-й закон Кірхгофа

$$\dot{I}_{e1} + \dot{I}_{e2} + \dot{I}_{e3} = 0. \quad (15)$$

Використовуючи закон Ома в комплексній формі та закон електромагнітної індукції для контурів зі струмом (рис. 7) можна записати

$$\begin{cases} (\dot{I}_{e1} - \dot{I}_{e2}) \cdot R^* = -j\omega \cdot (\dot{\Psi}_1^{(1,2)} - \dot{\Psi}_2^{(1,2)}); \\ (\dot{I}_{e2} - \dot{I}_{e3}) \cdot R^* = -j\omega \cdot (\dot{\Psi}_2^{(2,3)} - \dot{\Psi}_3^{(2,3)}), \end{cases} \quad (16)$$

де  $\dot{\Psi}_k^{(p,q)} \equiv \dot{\Psi}_k^{(q,p)}$  – комплексні амплітуди повного потоку МП, що створюється струмами жили і екрана  $k$ -ого кабелю та пронизує контур, утворений екранами кабелів з номерами  $p$  та  $q$ ; номери екранів  $k$ ,  $p$  та  $q$  пробігають значення від 1 до 3.

**При прокладанні кабелів «у трикутник»**  $\dot{\Psi}_k^{(p,q)} = 0$  з огляду на осьову симетрію, коли  $k \neq p$  та  $k \neq q$ . Для визначення  $\dot{\Psi}_k^{(k,q)}$  прийемо наступні додаткові припущення: циліндричні ФО, що охоплюють кабелі, не насичуються, а їх магнітна проникність  $\mu$  постійна; кожен з ФО намагнічується струмами жили та екрана тільки того кабелю, який він охоплює; МП всередині ФО вісесиметричне.

Тоді комплексна амплітуда індукції МП, створюваного струмами жили і екрана  $k$ -ого кабелю, має тільки кутову компоненту відносно вісі кабелю і дорівнює  $\mu\mu_0(\dot{I}_{ek} + \dot{I}_{жk})/2\pi r$  всередині ФО і  $\mu_0(\dot{I}_{ek} + \dot{I}_{жk})/2\pi r$  поза ФО. Розбиваючи струми в екранах кабелів з номерами  $k$  та  $p$  на елементарні трубки струму нескінченно малого перерізу, і виконуючи інтегрування по всіх контурах, утворених цими трубками, знаходимо

$$\dot{\Psi}_k^{(k,p)} = \frac{\mu_0(\dot{I}_{ek} + \dot{I}_{жk})}{2\pi} \cdot \ln \frac{d}{r} + \frac{l_{\text{ФО}}}{l} \cdot \frac{(\mu - 1)\mu_0(\dot{I}_{ek} + \dot{I}_{жk})}{2\pi} \cdot \ln \frac{r_1}{r_2}, \quad (17)$$

де  $l$  – довжина екранованої ділянки КЛ;  $l_{\text{ФО}}$  – довжина ФО, встановлених на кожен з кабелів, м;  $r_1$  і  $r_2$  – відповідно, зовнішній та внутрішній радіус ФО.

Вирази (15)-(16) утворюють систему трьох рівнянь відносно  $I_{e1}$ ,  $I_{e2}$  та  $I_{e3}$ . Підставляючи (17) знаходимо її рішення

$$I_{ek}^{тр} = -I_{жк} \frac{j\omega M^*}{R^* + j\omega M^*} = \alpha \cdot I_{жк}, \quad \alpha = \frac{-j\omega M^*}{R^* + j\omega M^*}, \quad (18)$$

де  $M^* = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \ln \frac{d}{r} + \frac{l_{\Phi 0}}{l} \cdot \frac{(\mu-1)\mu_0}{2\pi} \cdot \ln \frac{r_1}{r_2}$  – еквівалентна індуктивність одиниці довжини екрана кабелю, охопленого осердям.

Підставляючи (18) в (4)-(5) отримуємо співвідношення для розрахунку коефіцієнта екранування при прокладанні кабелів «у трикутник»

$$SF_{тр} = \frac{1}{|1 + \alpha|} = \left| 1 + j \cdot \frac{\mu_0 \omega}{2\pi R^*} \cdot \ln \frac{d}{r} + j \cdot \frac{l_{\Phi 0}}{l} \cdot \frac{(\mu-1)\mu_0 \omega}{2\pi R^*} \cdot \ln \frac{r_1}{r_2} \right|. \quad (19)$$

Для отримання коефіцієнта екранування при прокладанні кабелів «у площині» достатньо враховувати тільки МП, що утворюється  $\beta$ -компонентами струмів, отриманих за допомогою перетворення Кларк. При цьому компактне співвідношення для розрахунку коефіцієнта екранування може бути отримано підстановкою  $d \rightarrow 2 \cdot d$  в співвідношення (19). Відповідно, вираз для розрахунку коефіцієнта екранування при прокладанні кабелів «у площині» має вигляд

$$SF_{пл} = \left| 1 + j \cdot \frac{\mu_0 \omega}{2\pi R^*} \cdot \ln \frac{2d}{r} + j \cdot \frac{l_{\Phi 0}}{l} \cdot \frac{(\mu-1)\mu_0 \omega}{2\pi R^*} \cdot \ln \frac{r_1}{r_2} \right|. \quad (20)$$

Таким чином, автором вперше розроблено фізико-математичну модель МП трифазних КЛ при двосторонньому замиканні власних екранів кабелів, охоплених феромагнітними осердями із заданими параметрами.

У третьому розділі виконано верифікацію розробленої фізико-математичної моделі магнітного поля кабельних ліній при двосторонньому замиканні власних екранів кабелів на основі експериментальних досліджень і чисельного моделювання.

Необхідно визначити похибку моделювання МП КЛ, виконаного на основі аналітичних розв'язків, що зумовлена ефектом близькості, який спричиняє нерівномірність густини струмів у екранах кабелів. Для цього виконується чисельне моделювання МП реальних високовольтих КЛ з двостороннім замиканням екранів КЛ зі схемами прокладання кабелів «у трикутник» та «у площині» на основі методу скінчених елементів в програмному середовищі *COMSOL Multiphysics*. При цьому значення  $h$  (рис. 3) змінювалось від 0,5 м до 2 м з кроком 0,5 м, відстань  $d$  – від 0,1 м до 0,3 м з кроком 0,1 м, діаметр екранів кабелів  $D$  становив 55 мм і 70 мм, а їх переріз  $S$  – 100 мм<sup>2</sup>, 200 мм<sup>2</sup> і 300 мм<sup>2</sup>.

Теоретичною основою для опису розподілу МП КЛ є закон повного струму, записаний у квазістаціонарному наближенні. Беручи до уваги зв'язок векторного потенціалу з напруженістю МП і з огляду на те, що векторний потенціал має тільки одну ненульову компоненту, рівняння приймає вигляд:

$$\frac{\partial^2 \dot{A}_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \dot{A}_z}{\partial y^2} - j\mu_0\omega\sigma \dot{A}_z + \mu_0\dot{\delta}_z^{\text{стор}} = 0, \quad (21)$$

де  $\dot{A}_z$  – комплексна амплітуда компоненти векторного потенціалу електромагнітного поля по осі  $Z$ , направленої паралельно КЛ;  $\sigma$  – електропровідність середовища, для якого записується рівняння ( $\sigma_{Cu}=5,0 \cdot 10^7$  См/м,  $\sigma_{air}=0$  См/м);  $\dot{\delta}_z^{\text{стор}}$  – густина сторонніх струмів, яка описує струм у жилах.

На межах поділу середовищ з різними електрофізичними властивостями виконуються наступні умови:

$$\dot{A}_z^i = \dot{A}_z, \quad \frac{\partial \dot{A}_z^i}{\partial n} = \frac{\partial \dot{A}_z}{\partial n}, \quad (22)$$

де  $\vec{n}$  – одиничний вектор нормалі до поверхні межі поділу середовищ; верхній індекс  $i$  вказує на середовище, що проводить струм.

Розрахунковою областю є коло діаметром 6 м, на межах якої векторний потенціал електромагнітного поля прийнято рівним нулю. При побудові розрахункової сітки кожний екран розбивався на 20 елементів уздовж перерізу та на 200 елементів по периметру. В решті областей використовувалася трикутна сітка, мінімальний розмір якої дорівнював 1/40 діаметра жили кабелю.

Результатом чисельного моделювання є розподіл  $\dot{A}_z$ , який дозволяє визначити розподіл діючого значення магнітної індукції  $B_{\text{кл}}^{\text{чис}}$  КЛ. Перевірку чисельного розрахунку проведено шляхом порівняння результатів з рішеннями, отриманими при двократному збільшенні розрахункової області та використанні більш густої сітки. Також перевірку виконано шляхом порівняння результатів з аналітичним рішенням, отриманим при відстані між кабелями у 20 разів більшою за діаметр екрана, коли густина струму в екрані рівномірна. У всіх випадках похибка розрахунку не перевищила 0,5%.

Результати чисельного моделювання розподілу струму в екранах (рис. 8, а) показують, що нерівномірність густини струму може досягати 25%. Але вказана нерівномірність не призводить до суттєвої похибки аналітичного розрахунку індукції МП в точці спостереження, віддаленій на відстань  $h > 1$  м.

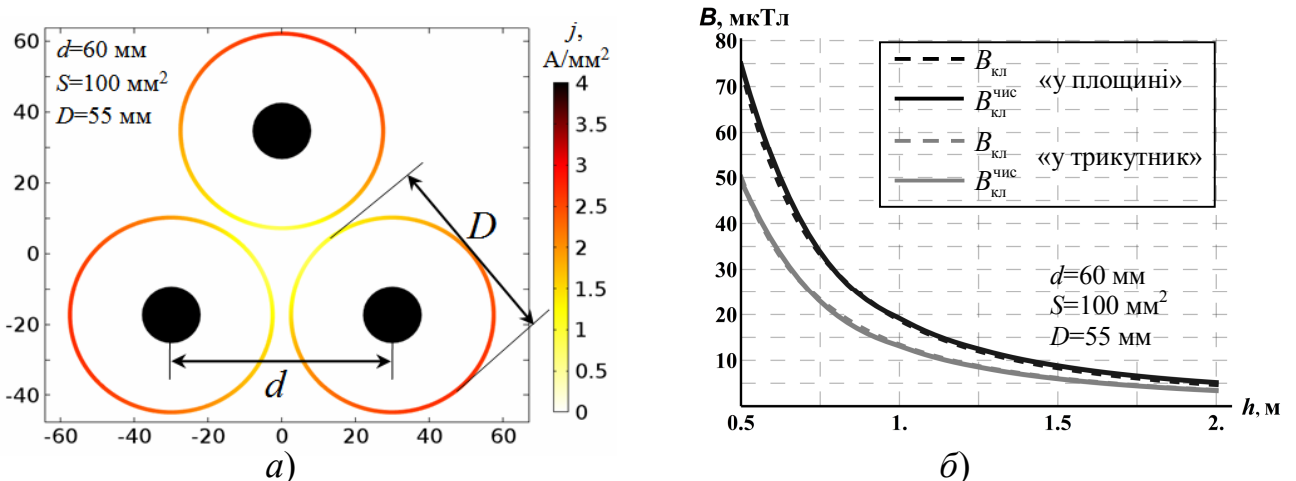


Рисунок 8 – Розподіл густини струму в екранах КЛ (а); співставлення результатів розрахунку МП КЛ на основі фізико-математичної та чисельної моделей (б)

На рис. 8, б співставлені результати моделювання  $B_{\text{кл}}$  на основі розробленої аналітичної моделі (5)-(7) та результати виконаного чисельного моделювання  $B_{\text{кл}}^{\text{чис}}$ . Розрахунки виконано при струмі в жилах КЛ 1000 А для граничного випадку максимальної нерівномірності густини струму в екранах кабелів ( $D=55$  мм,  $S=100$  мм<sup>2</sup>,  $d=0,06$  м). Як витікає з рис. 8, б, розходження результатів аналітичного та чисельного моделювання при  $h=0,5 \div 2,0$  м не перевищує 8% при прокладанні КЛ «у трикутник» і 5% при прокладанні КЛ «у площині».

Таким чином, максимальна похибка аналітичного розрахунку МП КЛ для граничного випадку (прокладанні кабелів КЛ «впритул», рис. 8) не перевищує 8%, а для КЛ, виконаних відповідно до нормативних документів з  $d > 2D$  не перевищує 5%, що підтверджує коректність припущення про рівномірність густини струму в екранах кабелів для інженерних розрахунків.

Для експериментальної перевірки розробленої фізико-математичної моделі МП КЛ при двосторонньому замиканні екранів кабелів, створено експериментальну установку (рис. 9), яка містить фізичний макет трифазної КЛ. Він складається з 3-х кабелів типу АПвЕгаПу-110 1×240 / 70 (переріз жили 240 мм<sup>2</sup>, переріз мідного екрана 70 мм<sup>2</sup>, діаметр екрана 55 мм) довжиною по 10 м; опір одиниці довжини екранів кабелів з урахуванням перемичок П – 0,29 Ом/км.

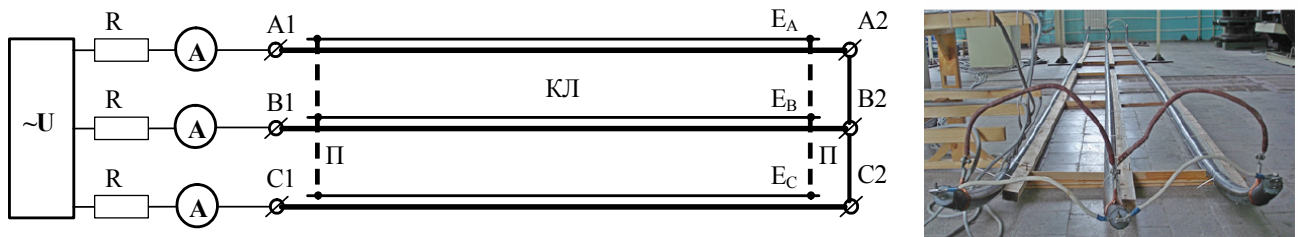


Рисунок 9 – Експериментальна установка з фізичним макетом КЛ

Діюче значення струму в жилах КЛ складало 95 А. Індукція МП КЛ вимірювалась трикомпонентним магнітометром EMF-828 (похибка <5%) при прокладанні кабелів «у трикутник» та «у площині». Величина  $d$  складала 0,07 м та 0,5 м. В табл. 1 наведено значення коефіцієнтів ослаблення  $m$  МП КЛ, отримані експериментальним шляхом та розраховані відповідно до (9) та (14). Як слідує з табл. 1, розкид результатів розрахунку та експерименту не перевищує 5%.

Таблиця 1 – Значення коефіцієнта ослаблення  $m$  МП, отримані експериментально та розраховані на основі розробленої фізико-математичної моделі

Схема прокладання КЛ	Відстань між осями жил $d$ , м	Коефіцієнт ослаблення $m$	Висота точки вимірювання $h$ , м								
			0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
	0,07	розрахунок	0,92	0,93	0,94	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96
		експеримент	0,92	0,92	0,95	0,94	0,94	0,95	0,94	0,95	0,94
	0,5	розрахунок	0,79	0,78	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77
		експеримент	0,79	0,76	0,77	0,79	0,77	0,77	0,76	0,79	0,78

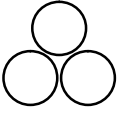
	0,07	розрахунок	0,97	0,96	0,97	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,95
		експеримент	0,96	0,95	0,96	0,95	0,96	0,95	0,96	0,97	0,98
	0,5	розрахунок	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84
		експеримент	0,80	0,80	0,80	0,81	0,81	0,82	0,81	0,84	0,83



Рисунок 10 – Макет трифазної КЛ, кабелі якої охоплені ФО

Таким чином, запропонована фізико-математична модель МП КЛ дозволяє з похибкою, що не перевищує 5%, виконувати розрахунок МП при двосторонньому заземленні екранів кабелів.

Експериментальна перевірка розробленої фізико-математичної моделі (15)-(20) для МП КЛ в разі охоплення кабелів ФО виконана на фізичному макеті КЛ, представленим на рис. 10. В якості ФО використовувалися статорні осердя асинхронних електродвигунів. Магнітна проникність ФО  $\mu=3000$ , зовнішній радіус ФО

$r_1=65$  мм, внутрішній –  $r_2=50$  мм. Довжина ФО складала 100 мм, 200 мм, 300 мм.

Результати експериментальних досліджень (рис. 11) підтверджують коректність отриманих розрахункових співвідношень (відмінність результатів розрахунку та експерименту не більше 15%) і можливість 2-4-кратного підвищення коефіцієнта екранування МП КЛ при двосторонньому заземленні екранів кабелів шляхом охоплення кабелів КЛ феромагнітними осердями.

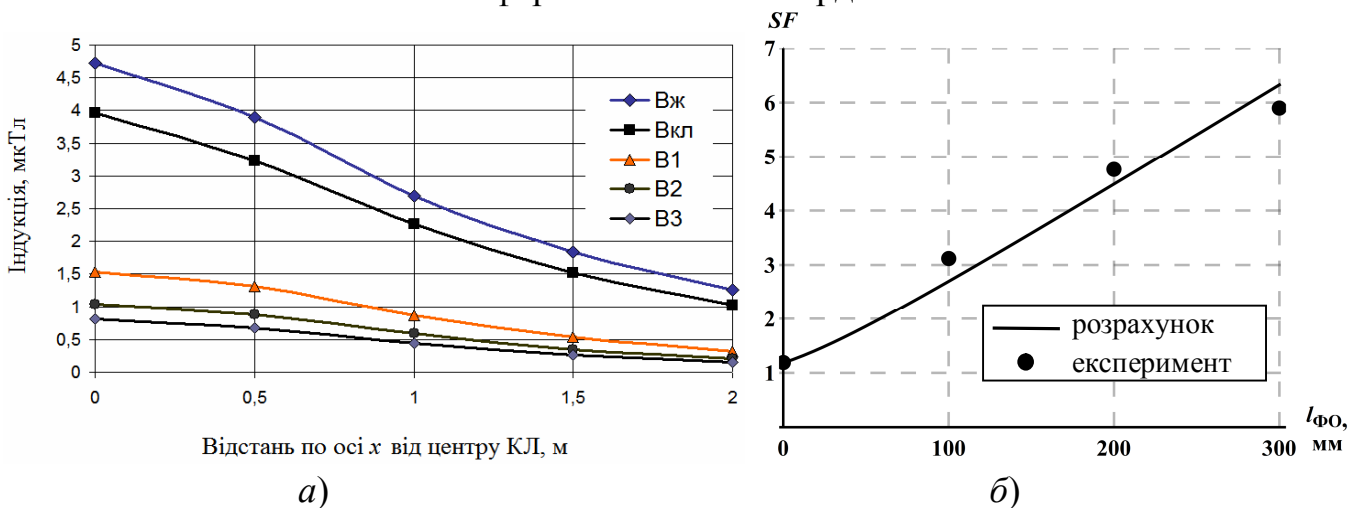


Рисунок 11 – Результати вимірювань індукції МП КЛ при прокладці кабелів «у площині» ( $B_{ж}$  – при розімкнутих екранах кабелів;  $B_{кл}$  – із замкненими екранами без ФО;  $B_1, B_2, B_3$  – по 1, по 2 і по 3 ФО на кожному кабелі) (а); залежність коефіцієнта екранування від довжини ФО (б)

У четвертому розділі представлено верифіковану методику розрахунку МП КЛ і повздовжніх струмів в екранах кабелів при їх двосторонньому заземленні та наведені результати впровадження дисертаційної роботи в нормативних документах Міненерговугілля.

Методику створено на основі розробленої фізико-математичної моделі МП КЛ. Розрахунок діючого значення індукції МП КЛ в точці  $P$  при двосторонньо заземлених екранах КЛ виконується відповідно до (4), де величина  $B_{ж}$  визначається при заданих параметрах КЛ одним з відомих верифікованих методів: представленим в настанові СОУ-Н-МЕВ40.1-37471933-49:2011.2 чи відповідно до (3) та (5).

Спершу визначаються такі вхідні параметри КЛ, як схема прокладання кабелів, номінальний струм в жилах  $I_{жк}$ , відстань між осями кабелів  $d$ , радіус екрана  $r$ , активний опір одиниці довжини екрана  $R^*$ .

Потім розраховується коефіцієнт екранування: при прокладанні «у трикутник» відповідно до (9), при прокладанні «у площині» відповідно до (14). Далі відповідно до (4) розраховується значення  $B_{кл}$ .

Струм в екранах кабелів може бути розраховано в загальному випадку згідно (6). При прокладанні кабелів «у трикутник» та «у площині» – за допомогою отриманих виразів (8) та (11) відповідно.

Розраховані згідно (4), (9) і (14) та експериментально обґрунтовані значення коефіцієнта ослаблення  $m=1/SF$  МП для КЛ типового конструктивного виконання представлені в табл. 2, яка включена до нормативних документів Міненерговугілля (СОУ-Н-МЕВ40.1-37471933-49:2011.2 та СОУ-Н ЕЕ 20.179:2008) і нині широко використовуються в Україні при проектуванні реальних КЛ.

Таблиця 2 – Значення коефіцієнта ослаблення  $m=1/SF$  МП КЛ в залежності від перерізу екрана  $S$  для різних значень  $D$  і  $d$  кабелів з двостороннім заземленням екранів, використані в СОУ-Н-МЕВ40.1-37471933-49:2011.2 та СОУ-Н ЕЕ 20.179:2008

Відстань між осями кабелів $d$ , м	Переріз екрана $S$ , мм <sup>2</sup>	Розташування кабелів КЛ в горизонтальній площині			Розташування кабелів КЛ у кутах рівностороннього трикутника		
		Внутрішній діаметр екрана кабелю, мм					
		25	50	70	25	50	70
0,1	25	0,99	0,99	1,00	0,99	1,00	1,00
	50	0,95	0,97	0,97	0,96	0,98	0,99
	70	0,90	0,95	0,96	0,93	0,97	0,98
	100	0,82	0,89	0,91	0,88	0,93	0,95
	150	0,70	0,78	0,82	0,78	0,86	0,90
	200	0,59	0,68	0,74	0,69	0,79	0,84
0,2	25	0,97	0,98	0,98	0,99	0,99	1,00
	50	0,90	0,93	0,95	0,94	0,96	0,97
	70	0,84	0,88	0,90	0,89	0,93	0,95
	100	0,73	0,80	0,83	0,81	0,87	0,90
	150	0,59	0,66	0,71	0,68	0,77	0,81
	200	0,48	0,56	0,60	0,57	0,67	0,73

Продовж. табл. 2

0,5	25	0,95	0,96	0,97	0,98	0,98	0,99
	50	0,85	0,89	0,90	0,90	0,93	0,94
	70	0,77	0,81	0,84	0,83	0,87	0,90
	100	0,65	0,70	0,74	0,72	0,78	0,82
	150	0,50	0,56	0,59	0,57	0,64	0,68
	200	0,40	0,45	0,48	0,46	0,53	0,58

Також на основі виразу (11) розроблено нову методику розрахунку діючих значень струмів в екранах кабелів, та показано, що вона дозволяє в порівнянні з прийнятою в чинних нормативних документах методикою зменшити похибку розрахунку до 5%, яка наразі перевищує 30%.

Таким чином, розроблено і впроваджено експериментально перевірені практичні рекомендації та методики з інженерного розрахунку МП трифазних КЛ та струмів в екранах кабелів при їх двосторонньому заземленні.

У додатках наведено матеріали щодо впровадження результатів дисертаційної роботи; протокол лабораторних випробувань кабельної лінії за параметрами магнітного поля; список публікацій здобувача за темою дисертаційного дослідження.

## ВИСНОВКИ

У дисертації отримано нові науково обґрунтовані результати, які вирішують наукову задачу фізико-математичного моделювання та розрахунку магнітного поля високовольтних трифазних кабельних ліній при двосторонньому заземленні їх екранів за допомогою аналітичних розв'язків. Ці результати у своїй сукупності складають істотний внесок в рішення науково-практичної задачі теоретичної електротехніки з моделювання електромагнітних процесів в кабельних лініях електропередачі та розробки на їх основі верифікованих методик розрахунку магнітного поля, необхідних для санітарно-гігієнічної оцінки рівня магнітного поля при проектуванні нових та модернізації діючих кабельних ліній.

1. Досліджено особливості трифазної КЛ, виконаної з одножильних кабелів, як джерела МП при двосторонньому заземленні екранів кабелів і показано, що коректні методи моделювання і розрахунку МП КЛ можуть бути створені тільки за умови визначення комплексних значень струмів в замкнених екранах кабелів, що індуктивно зв'язані зі струмами жил кабелів.

Проведено аналіз електромагнітних процесів в трифазній КЛ при двосторонньому заземленні екранів на основі методу комплексних амплітуд і запропоновано узагальнену фізико-математичну модель магнітного поля КЛ, що дозволяє визначати методи і методики розрахунку МП КЛ на її основі для різних схем прокладання кабелів.

Теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено, що гранична похибка розробленої на основі аналітичних розв'язків фізико-математичної моделі

МП КЛ, зумовлена нерівномірністю розподілу густини струму в екранах кабелів, для загального випадку не перевищує 5%, що дозволяє використовувати дану модель для розробки інженерних методів розрахунку МП.

2. Запропоновано і експериментально перевірено компактний вираз для розрахунку коефіцієнта екранування МП КЛ при двосторонньому замиканні екранів кабелів при їх прокладанні «у трикутник» та спрощений компактний вираз для розрахунку коефіцієнта екранування МП КЛ при прокладанні «у площині», похибка якого не перевищує 5%, що дозволяє рекомендувати їх для використання при проектуванні високовольтних трифазних КЛ з нормованим рівнем МП.

3. Отримано вирази для розрахунку коефіцієнта екранування МП КЛ при охопленні кабелів КЛ феромагнітними осердями в залежності від параметрів кабелів, схеми їх прокладання та параметрів феромагнітних осердь, що дозволяє рекомендувати отримані вирази для використання при проектуванні високовольтних трифазних КЛ з феромагнітними осердями та нормованим рівнем МП.

4. Проведено верифікацію розроблених фізико-математичних моделей і розрахункових співвідношень на основі натурального експерименту та чисельного розрахунку. Підтверджено, що похибка запропонованої фізико-математичної моделі для розрахунку МП КЛ не перевищує 5%, а у випадку використання ФО – 15%, що дозволяє рекомендувати запропоновані моделі для використання при проектуванні КЛ з двостороннім заземленням екранів кабелів.

5. Розроблено верифіковану методику розрахунку МП КЛ при двосторонньому замиканні власних екранів їх кабелів, яка використана при розробці нормативних документів Міненерговугілля «*СОУ-Н-МЕВ40.1-37471933-49: 2011.2. Проектування кабельних ліній напругою до 330 кВ: Настанова (зі змінами).* – Київ: Міненерговугілля України, 2017. - 139 с.» та «*СОУ-Н ЕЕ 20.179: 2008. Розрахунок електричного і магнітного полів ліній електропередавання. Методика (зі змінами).* – Київ: Міненерговугілля України, 2016. – С. 37».

6. На основі розробленої фізико-математичної моделі МП КЛ отримано і запропоновано для практичного застосування в нормативних документах Міненерговугілля нову методику розрахунку діючих значень струмів в екранах кабелів, що дозволяє, в порівнянні з прийнятою в діючих нормативних документах методикою, зменшити похибку розрахунку, яка наразі перевищує 30%, до 5-8% в залежності від параметрів кабелів та схеми їх прокладання.

Основні результати виконаних в дисертації досліджень і практичних розробок використано при виконанні тематичного плану ДУ «ІТПМ НАН України», у введених в дію нормативних документах Міненерговугілля, передані НЕК Укренерго для подальшого використання при розробці нових нормативних документів з проектування КЛ і розрахунку їх МП.

## **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Ткаченко А.О. Исследование магнитного поля трехфазных кабельных линий из одножильных кабелей при двустороннем заземлении их экранов / В.Ю. Розов, А.А. Квицинский, П.Н. Добродеев, В.С. Гринченко, А.В. Ерисов,

А.О. Ткаченко // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2015. – № 4. – С. 56-61.

2. Ткаченко А.О. Повышение эффективности контурного экранирования магнитного поля высоковольтных кабельных линий / В.Ю. Розов, П.Н. Добродеев, А.В. Ерисов, А.О. Ткаченко // *Технічна електродинаміка*. – 2016. – № 4. – С. 5-7.

3. Ткаченко А.О. Аналитический расчет магнитного поля трехфазных кабельных линий при двустороннем замыкании собственных экранов кабелей / В.Ю. Розов, А.О. Ткаченко, А.В. Ерисов, В.С. Гринченко // *Технічна електродинаміка*. – 2017. – № 2. – С. 13-18.

4. Ткаченко А.О. Повышение точности расчета токов в экранах кабелей при двустороннем заземлении трехфазной кабельной линии / В.С. Гринченко, А.О. Ткаченко, Н.В. Гринченко // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2017. – № 2. – С. 39-42.

5. Ткаченко А.О. Определение погрешности аналитического расчета магнитного поля высоковольтных кабельных линий при двухстороннем замыкании экранов кабелей, вызванной неравномерностью плотности тока в экранах / А.О. Ткаченко // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2017. – № 3. – С. 44-48.

6. Ткаченко А.О. Расчет магнитного поля трехфазных кабельных линий при двустороннем замыкании собственных экранов кабелей, охваченных ферромагнитными сердечниками / В.Ю. Розов, В.С. Гринченко, А.О. Ткаченко // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2017. – № 5. – С. 44-47.

7. Ткаченко А.О. Расчет экранных токов в трехфазных кабельных линиях с треугольным расположением фаз / В.С. Гринченко, А.О. Ткаченко, К.В. Чунихин // *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XXIV міжнародної науково-практичної конференції, Ч. II*. – Харків, НТУ «ХПІ». – 2016. – С. 12.

8. Ткаченко А.О. Анализ погрешностей инженерных выражений для токов в экранах кабелей, заземленных с обоих концов / В.С. Гринченко, А.О. Ткаченко // *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XXV міжнародної науково-практичної конференції, Ч. II*. – Харків, НТУ «ХПІ». – 2017. – С. 79.

9. Ткаченко А.О. Моделирование магнитного поля высоковольтных кабельных линий при двустороннем заземлении собственных экранов кабелей / В.Ю. Розов, В.С. Гринченко, А.О. Ткаченко // *Совершенствование энергоустановок методами математического и физического моделирования: Тезисы докладов XVI международной научно-технической конференции, Секция. 3*. – Харків, ІПМАШ. – 2017. – С. 1.

10. Tkachenko O. Magnetic field calculation of cable line with two-point bonded shields / V. Grinchenko, O. Tkachenko, K. Chunikhin // *IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering*. – 2017. – P. 211-214.

11. Ткаченко А.О. Аналитический расчет магнитного поля кабельных линий при двустороннем замыкании экранов кабелей, охваченных ферромагнитными сердечниками / В.С. Гринченко, А.О. Ткаченко // *Актуальні проблеми автоматики та приладобудування України: матеріали I Міжнародної науково-технічної конференції*. – Харків. – 2017. – С. 218-219.

12. Tkachenko O. Analytical Calculation of Magnetic Field Shielding Factor for Cable Line with Two-Point Bonded Shields / V. Rozov, V. Grinchenko, O. Tkachenko, A. Yerisov // IEEE 17th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory. – 2018. – P. 358 – 361.

## АНОТАЦІЇ

**Ткаченко О.О. Магнітне поле високовольтних кабельних ліній при двосторонньому заземленні екранів кабелів.** На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.09.05 – теоретична електротехніка. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2019.

Дисертація присвячена розвитку методів вирішення задачі фізико-математичного моделювання та розрахунку магнітного поля (МП) високовольтних трифазних кабельних ліній (КЛ), виконаних з одножильних кабелів, при двосторонньому заземленні їх екранів. Для високовольтної трифазної КЛ запропоновано фізико-математичну модель, що дозволяє виконувати розрахунок МП КЛ і струмів в екранах за будь-якої схеми прокладання кабелів. Отримано вирази для коефіцієнта екранування МП КЛ при прокладанні кабелів «у площині» і «у трикутник» та, з використанням перетворення Кларк, наближений компактний вираз при прокладанні кабелів «у площині», похибка якого не перевищує 5%. Теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено можливість 2-4-кратного підвищення коефіцієнта екранування МП КЛ при двосторонньому заземленні екранів кабелів шляхом охоплення кабелів КЛ феромагнітними осердями. Отримано вирази для розрахунку коефіцієнта екранування в залежності від параметрів феромагнітних осердь, параметрів кабелів і схеми їх прокладання.

Виконано верифікацію запропонованої фізико-математичної моделі та розрахункових співвідношень шляхом чисельного моделювання та на основі експерименту.

Розроблено методику розрахунку МП КЛ та діючих значень струмів в екранах при двосторонньому заземленні власних екранів кабелів.

*Ключові слова:* магнітне поле, трифазна кабельна лінія, двостороннє заземлення екранів, феромагнітне осердя, перетворення Кларк.

**Ткаченко А.О. Магнитное поле высоковольтных кабельных линий при двухстороннем заземлении экранов кабелей.** На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук (доктора философии) по специальности 05.09.05 – теоретическая электротехника. – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2019.

Диссертация посвящена развитию методов решения задачи физико-математического моделирования и расчета магнитного поля (МП) высоковольтных трехфазных кабельных линий (КЛ), выполненных из одножильных кабелей, при двустороннем заземлении их экранов. Полученные в диссертации результаты в совокупности составляют существенный вклад в решение научно-практической задачи теоретической электротехники по моделированию электромагнитных

процессов в кабельных линиях электропередачи и разработки на их основе верифицированных методик расчета магнитного поля для обеспечения экологической безопасности кабельных линий.

Проведен анализ электромагнитных процессов в трехфазной КЛ при двустороннем заземлении экранов на основе метода комплексных амплитуд и предложено физико-математическую модель МП КЛ, которая позволяет выполнять расчет МП КЛ и токов в экранах при любой схеме прокладки кабелей. Получены выражения для коэффициента экранирования МП КЛ при прокладке кабелей «в плоскости» и «в треугольник» и, с использованием преобразования Кларк, приближенное компактное выражение при прокладке кабелей «в плоскости», погрешность которого не превышает 5%. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена возможность 2-4-кратного повышения коэффициента экранирования МП КЛ при двустороннем заземлении экранов кабелей путем охвата кабелей КЛ ферромагнитными сердечниками. Получены выражения для расчета коэффициента экранирования в зависимости от параметров ферромагнитных сердечников, параметров кабелей и схемы их прокладки. Предложенную физико-математическую модель и расчетные соотношения верифицировано путем численного моделирования и на основе эксперимента.

Разработана методика расчета МП КЛ и действующих значений токов в экранах при двустороннем заземлении собственных экранов кабелей.

Основные результаты, выполненных в диссертации исследований и практических разработок, использованы: в действующих нормативных документах Минэнергоугля «СОУ-Н ЕЕ 20.179:2008» и «СОУ-Н-МЕВ40.1-37471933-49:2011.2», в НЭК «Укрэнерго» при разработке новых нормативных документов по проектированию КЛ и расчету их МП, а также в ГУ «ИТПМ НАН Украины» при выполнении фундаментальных и прикладных исследований в рамках тематического плана.

*Ключевые слова:* магнитное поле, трехфазная кабельная линия, двустороннее заземления экранов, ферромагнитный сердечник, преобразование Кларк.

**Tkachenko O.O. Magnetic field of high-voltage cable lines with two-point bonded cable shields.** – Manuscript.

Thesis for scientific degree of candidate of technical sciences (Ph.D.), specialty 05.09.05 – theoretical electrical engineering. – National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, 2019.

The thesis is devoted to the advancement of methods of physico-mathematical simulation and calculation of the magnetic field created by the high-voltage three-phase cable lines consisting of single-core cables with two-point bonded cable shields.

The current tendency of the development of city electric networks implies an increasingly widespread use of three-phase high-voltage cable lines performed by single-conductor cables with cross-linked polyethylene insulation. However, the cable line magnetic field can exceed the reference level for the population (0.5  $\mu\text{T}$  for living space and 10  $\mu\text{T}$  for an urban area). Therefore, when designing cable lines it is mandatory to calculate accurately their magnetic field using existing regulation documents and analytical solutions based on known methods. At the same time, in the case of two-point bonding, the cable shields form closed loops in which longitudinal currents are induced.

These currents create an additional magnetic field that substantially changes the initial cable line magnetic field, that must be taken into account.

The problem of simulation of the magnetic field of the cable line with two-point bonded cable shields can be solved numerically. However, analytical methods are more affordable for cable line designers. Also, these methods produce results with a transparent physical interpretation. However, the analytical methods of solving these problems are insufficiently studied. This is due to the lack of theoretically based methods for determining the complex amplitude of currents in the shields of three-phase cable lines and the methods of magnetic field simulating at any arrangement of phase cables.

In the thesis, the features of a three-phase cable line with two-point bonded shields as the source of the magnetic field are investigated. It is shown that correct methods of calculating the magnetic field of cable lines can be created only if the currents in cable shields, which are inductively connected with the currents in cable cores, are determined. The analysis of electromagnetic processes in a three-phase cable line with two-point bonded shields based on the method of complex amplitudes is carried out. A generalized physico-mathematical model of the magnetic field of cable lines is developed. It allows to calculate the electric currents induced in shields of cables and to determine the magnetic field distribution for the arbitrary arrangement of cables.

The exact expression for the magnetic field shielding factor for the trefoil cable line with two-point bonded shields is obtained. Using the Clark transformation, a simplistic expression for the magnetic field shielding factor is received for the flat cable line with two-point bonded shields. Its error is within 5%. The possibility of the magnetic field shielding factor 2-4 times increase by ferromagnetic cores installed on cables is justified theoretically and experimentally. In this case the shielding factor depends on parameters of ferromagnetic cores, parameters of cables and their arrangement. The respective expressions for the shielding factor are obtained for trefoil and flat cable lines.

The verification of the proposed physico-mathematical model and analytical expressions is performed by numerical simulation and experimentally.

Methodologies of the magnetic field and root-mean-square shield currents calculating for the cable line with two-point bonded cable shields are developed.

*Key words:* magnetic field, three-phase cable line, two-point bonded shields, ferromagnetic core, Clark transformation.



Підписано до друку 09.04.2019 р.  
Формат 60 x 84 1/16. Папір офсетний.  
Друк-цифровий. Умовн. друк. арк. 0,9. Тираж 100 прим. Зам. № 19041501

---

Надруковано у копії-центрі «МОДЕЛІСТ»  
(ФО-П Миронов М.В., Свідоцтво ВО4№022953)  
м. Харків, вул. Мистецтв, 3 літер Б-1  
Тел. 7-170-354  
[www.modelist.in.ua](http://www.modelist.in.ua)