

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ

ДЕРЖАВНА УСТАНОВА

«ІНСТИТУТ ТЕХНІЧНИХ ПРОБЛЕМ МАГНЕТИЗМУ

НАЦІОНАЛЬНОЇ АКАДЕМІЇ НАУК УКРАЇНИ»

(ДУ «ІТПМ НАН УКРАЇНИ»)

Реферат роботи

**на здобуття премії Президента України для молодих вчених**

НОРМАЛІЗАЦІЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ КАБЕЛЬНИХ ЛІНІЙ

ПРИ ДВОСТОРОННЬОМУ ЗАЗЕМЛЕННІ

**ГРІНЧЕНКО Володимир Сергійович** – кандидат технічних наук, заступник директора з наукової роботи ДУ «ІТПМ НАН України».

**ТКАЧЕНКО Олександр Олегович** – кандидат технічних наук, молодший науковий співробітник ДУ «ІТПМ НАН України».

## 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 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.

Тривалий час не існувало коректних аналітичних методик моделювання та розрахунку МП при двосторонньому заземленні екранів кабелів, що було 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). Саме тому розвиток методів математичного моделювання та розрахунку магнітного поля кабельних ліній при двосторонньому заземленні екранів кабелів став актуальною темою досліджень.

**Метою роботи** є розробка методів розрахунку та нормалізації магнітного поля високовольтних трифазних кабельних ліній при двосторонньому заземленні власних екранів кабелів.

Для досягнення мети 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 моделювання, розрахунку та нормалізації їхнього МП. Аналіз засвідчив необхідність розвитку таких методів. Виходячи з цього, авторами поставлено ряд завдань:

1) розробити математичну модель магнітного поля трифазних кабельних ліній при двосторонньому заземленні власних екранів кабелів та оцінити її похибку;

2) отримати співвідношення для інженерного розрахунку коефіцієнта екранування магнітного поля кабельних ліній при двосторонньому заземленні екранів в залежності від параметрів кабелів для типових схем їх прокладання («у трикутник», «у площині»);

3) отримати співвідношення для інженерного розрахунку коефіцієнта екранування магнітного поля кабельних ліній при двосторонньому заземленні екранів кабелів, охоплених феромагнітними осердями, в залежності від параметрів осердь та параметрів кабелів для типових схем їх прокладання – «у трикутник» та «у площині»;

4) верифікувати розроблену математичну модель і отримані розрахункові співвідношення шляхом експерименту та чисельного розрахунку;

5) розробити методику розрахунку магнітного поля трифазних кабельних ліній при двосторонньому заземленні їх екранів та струмів в екранах;

*з часу попереднього висування роботи:*

6) визначити міру теплового впливу струмів в екранах кабелів на пропускну здатність КЛ у зоні муфтових з'єднань при двосторонньому заземленні.

7) розробити високоефективний одноконтурний екран, використання якого не призводить до зниження пропускну здатності КЛ.

В представленій роботі показано, що МП таких технічних об'єктів, як повітряні та кабельні ЛЕП, може 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. Так, особливістю високовольтних КЛ з ізоляцією зі зшитого поліетилену 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, при реалізації якого утворюються додаткові контури для протікання струмів в екранах, що індуковані струмами жил 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 до схеми їх замикання. Тоді індукція МП КЛ є суперпозицією індукцій МП, що створюються струмами жил та струмами екранів кабелів.

Однак у відомих літературних джерелах відсутні аналітичні розв'язки задачі розрахунку МП, яке створюється струмами в екранах, що унеможливорює визначення МП КЛ. Зокрема, в роботах іноземних авторів J.R. Riba Ruiz, X.A. Morera, B. Nova`k, L. Koller, I. Berta, M.B. Коровкіна та Г.В. Грешнякова, присвячених дослідженню електромагнітних процесів в КЛ при двосторонньому заземленні, використовується переважно чисельне моделювання, а в певних роботах 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 як відношення діючого значення індукції МП КЛ з розімкненими екранами  $B_{ж}$  до діючого значення індукції МП КЛ з замкненими екранами  $B_{кл}$ . 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  $m$ .

Саме тому було розроблено математичну модель МП КЛ. Вона дозволила отримати аналітичний розв'язок задачі моделювання магнітного поля трифазних кабельних ліній при двосторонньому заземленні власних екранів кабелів, визначити комплексні амплітуди струмів в екранах і коефіцієнти екранування МП при різних схемах прокладання кабелів, в тому числі для кабелів, охоплених феромагнітними осердями (ФО).

Рішення задачі моделювання МП КЛ виконано 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 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. В силу прийнятих припущень МП трифазних КЛ є плоскопаралельним, тому моделювання виконується у двовимірній постановці.

Діюче значення магнітної індукції  $B_{кл}$  визначається через просторові компоненти її комплексної амплітуди. В свою чергу, для коректного розрахунку комплексної амплітуди магнітної індукції поля КЛ необхідно попередньо визначити комплексні амплітуди струмів, що індукуються в екранах кабелів. Для цього було розроблено еквівалентну електричну схему трифазної КЛ з двосторонньо замкненими екранами. Електромагнітні процеси в КЛ відповідно до неї можуть бути описані системою рівнянь, в які входять ряд параметрів, як то комплексні амплітуди струмів в жилі та екрані  $k$ -ого кабелю, активний опір екрана кабелю довжиною  $l$ , кутова частота струму, власна індуктивність екрана, коефіцієнт взаємної індукції між

жилою і екраном одного кабелю, коефіцієнт взаємної індукції між екраном  $i$ -ого та жилою  $k$ -ого кабелів, коефіцієнт взаємної індукції між екраном  $i$ -ого та екраном  $k$ -ого кабелів.

Таким чином, вперше авторами розроблено 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 математичну модель можна визначити коефіцієнти екранування  $SF$  МП для найбільш поширених схем прокладання кабелів КЛ «у трикутник» та «у площині».

**При прокладанні кабелів КЛ «у трикутник»** коефіцієнти взаємної індукції між екранами та екраном і жилою сусідніх кабелів рівні між собою. Для цього випадку знайдено вираз для струму в екранах, що включає в себе такі параметри як еквівалентна індуктивність одиниці довжини екрана кабелю, опір одиниці довжини екрана кабелю та радіус перерізу екрана. Відповідно, за допомогою цього виразу отримано співвідношення для визначення коефіцієнта екранування  $SF$  МП при прокладанні КЛ «у трикутник».

**При прокладанні кабелів КЛ «у площині»** зазначені вище коефіцієнти взаємної індукції не рівні між собою. Тому вирази для струмів в екранах для випадків, коли струми в жилах утворюють систему струмів прямої та зворотної послідовності, має дещо різний вигляд. Для отримання компактного виразу для коефіцієнту екранування  $SF_{пл}$  при прокладанні кабелів «у площині» використано перетворення Кларк, а його похибка не перевищує 5%.

Для підвищення коефіцієнта екранування МП при двосторонньому заземленні екранів кожен з кабелів охоплюється ФО, що дозволяє посилити магнітний зв'язок між струмами жил та екранів кабелів КЛ. Відповідні вирази для розрахунку коефіцієнта екранування отримано при прокладанні кабелів «у трикутник» та «у площині».

**Експериментальна перевірка.** Виконано верифікацію розробленої математичної моделі магнітного поля кабельних ліній при двосторонньому

замиканні власних екранів кабелів на основі експериментальних досліджень і чисельного моделювання. В роботі показано, що 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».

Для експериментальної перевірки розробленої математичної моделі МП КЛ при двосторонньому замиканні екранів кабелів створено фізичний макет трифазної КЛ, який складається з 3-х кабелів типу АПвЕгаПу-110 1×240 / 70. Переріз жил кабелів складає 240 мм<sup>2</sup>, переріз мідного екрана – 70 мм<sup>2</sup>, діаметр екрана – 55 мм. Довжина макету – 10 м. Показано, що розроблена математична модель МП КЛ дозволяє виконувати розрахунок МП при двосторонньому заземленні екранів кабелів з похибкою в межах 5%.

Також виконано експериментальну перевірку можливості підвищення коефіцієнту екранування шляхом охоплення кабелів ФО. 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 підтверджують коректність отриманих розрахункових співвідношень (відмінність результатів розрахунку та експерименту не більше 15%) і можливість чотирьохкратного підвищення коефіцієнта екранування МП КЛ при двосторонньому заземленні екранів кабелів шляхом охоплення кабелів КЛ феромагнітними осердями.

*З часу попереднього висування роботи:* Визначено міру теплового впливу струмів в екранах кабелів у зоні муфтових з'єднань на загальну пропускну здатність КЛ. Так, у зоні муфтових з'єднань струм в жилах кабелів дорівнює струму на основній трасі КЛ, а відстань між кабелями збільшується в кілька разів. Тому температура силових кабелів, що обумовлена тепловим впливом власних струмів, зменшується. Це дозволяє використовувати ФО для підвищення коефіцієнта екранування зі збереженням пропускну здатності КЛ.

Для нормалізації МП КЛ у випадку, коли двостороннє заземлення не забезпечує необхідну ефективність екранування, розроблено одноконтурний екран з ФО та несиметричним магнітним зв'язком. Він забезпечує високу ефективність

екранування МП, а його проводи віддалено від КЛ на висоту  $0,4 \div 0,6$  відстані між сусідніми силовими кабелями, що дозволяє мінімізувати тепловий вплив на КЛ порівняно із відомими контурними екранами аналогічної ефективності. Відповідно, використання запропонованого екрана не призводить до зниження пропускної здатності КЛ.

**Основні висновки.** У роботі отримано нові науково обґрунтовані результати, які вирішують наукову задачу 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 верифікованої методики розрахунку магнітного поля, необхідних для санітарно-гігієнічної оцінки рівня магнітного поля при проектуванні нових та модернізації діючих кабельних ліній.

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

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

2) За допомогою розробленої 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 математичної моделі та застосування перетворення Кларк і дозволяє виконувати розрахунок з похибкою в межах 5%.

4) Розвинено математичну модель магнітного поля трифазних кабельних ліній при двосторонньому заземленні власних екранів кабелів для випадку



охоплення кабелів феромагнітними осердями та вперше отримано співвідношення, що дозволяють виконувати інженерний розрахунок коефіцієнтів екранування магнітного поля кабельних ліній з феромагнітними осердями.

**Практичне значення отриманих результатів.** Основні результати виконаних в роботі досліджень і практичних розробок використано:

– 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-МЄВ40.1-37471933-49:2011.2. Проектування кабельних ліній напругою до 330 кВ: Настанова (зі змінами). – Київ: Міненерговугілля України, 2017. – 139 с.», в розділах присвячених проектуванню та розрахунку магнітного поля кабельних ліній при двосторонньому заземленні екранів кабелів.

– в ДУ «ІТПМ НАН України» при виконанні фундаментальних і прикладних досліджень в рамках тематичного плану, а також при розробці змін до нормативних документів Міненерговугілля СОУ-Н ЕЕ 20.179:2008 та СОУ-Н-МЄВ40.1-37471933-49:2011.2.

Результати досліджень опубліковані у 30 наукових працях, з яких 16 статей включено до наукометричних баз Scopus та Web of Science, 12 тез доповідей на міжнародних та всеукраїнських науково-технічних конференціях. Загальна кількість посилань на публікації за виключенням самоцитувань (та h-індекс) у Google Scholar – 41 (4), у Scopus – 13 (2), у Web of Science – 12 (2).

канд. техн. наук, заст.  
директора з наук. роботи  
ДУ «ІТПМ НАН України»

В.С. Грінченко

канд. техн. наук, мол. наук.  
співробітник ДУ «ІТПМ  
НАН України»

О.О Ткаченко