



ГРІНЧЕНКО

Володимир Сергійович — кандидат технічних наук, науковий співробітник Державної установи «Інститут технічних проблем магнетизму НАН України», vsgrinchenko@gmail.com

УДК 621.3.013

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКРАНУВАННЯ ТЕХНОГЕННОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ ВИСОКОВОЛЬТНИХ КАБЕЛЬНИХ ЛІНІЙ

За матеріалами наукового повідомлення
на засіданні Президії НАН України
7 травня 2014 року

Розроблено метод чисельного моделювання процесу електромагнітного екранування магнітного поля підземних кабельних ліній електропередачі. За допомогою цього методу досліджено екранувальні властивості різноманітних незамкнених електромагнітних екранів, що складаються з кількох тонкостінних плоских або U-подібних електропровідних елементів. Запропоновано нову конструкцію екрана з двох U-подібних електропровідних елементів, яка дозволяє приблизно на 20% збільшити ефективність екранування магнітного поля кабельної лінії порівняно з відомими електромагнітними екранами еквівалентної металомісткості. Досліджено можливість зниження магнітного поля кабельних ліній електропередачі завдяки використанню власних екранів високовольтних кабелів.

Ключові слова: електромагнітне екранування, підземна кабельна лінія, U-подібний екран, чисельне моделювання.

Вступ

Магнітне поле промислової частоти є техногенним фактором навколишнього середовища. Одним із його джерел є лінії електропередачі (ЛЕП). Сьогодні в Україні довжина високовольтних повітряних ЛЕП, розташованих у зонах житлової забудови, вимірюється тисячами кілометрів. Результати медико-статистичних досліджень переконливо свідчать, що створюване ними магнітне поле промислової частоти негативно впливає на здоров'я населення: дія низькочастотного магнітного поля спричинює зміни в гематологічних параметрах крові та імунному статусі людини, негативно позначається на репродуктивній, центральній нервовій та серцево-судинній системах, а

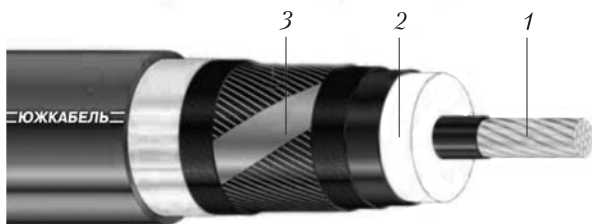


Рис. 1. Основні конструктивні елементи силового кабелю на номінальну змінну напругу 10/110 кВ: 1 – алюмінієва або мідна жила, 2 – ізоляція зі зшитого поліетилену, 3 – мідний екран, який забезпечує рівномірність електричного поля в шарі ізоляції



Рис. 2. Типова конструкція трифазної кабельної лінії електропередачі

також на біоелектричній активності головного мозку. Унаслідок цього більшість країн світу, в тому числі й Україна, запроваджують дедалі жорсткіші санітарні норми щодо гранично допустимого рівня магнітної індукції низькочастотного поля. Так, нові санітарні нормативи України передбачають обмеження до рівня 10 мкТл діючого значення магнітної індукції поля частотою 50 Гц у зоні житлової забудови.

Сьогодні найперспективнішим засобом передавання електричної енергії в житлових зонах є підземні високовольтні кабелі з ізоляцією зі зшитого поліетилену. Основні конструктивні елементи таких кабелів наведено на рис. 1. Типова трифазна кабельна лінія електропередачі складається з трьох однофазних високовольтних кабелів з робочим струмом у кілька

кілоамперів (рис. 2). Кабельні лінії електропередачі, на відміну від традиційних повітряних ЛЕП, створюють на порядок менше магнітне поле. Крім того, вони не потребують відчуження значних земельних ділянок, вартість яких постійно зростає. Проте величина магнітної індукції кабельних ліній може перевищувати гранично допустимий санітарний рівень, що спричинює необхідність вживати заходів щодо її зменшення.

Найпоширенішим методом зниження рівня магнітного поля високовольтних кабельних ліній є електромагнітне екранування. Принцип дії електромагнітного екрана такий. Під дією первинного магнітного поля (у нашому випадку поля кабельної лінії) у стінках екрана, який виготовляють з матеріалу з високою електропровідністю, індукуються струми провідності. Індуковані струми створюють протилежно спрямоване вторинне поле, яке й компенсує первинне магнітне поле. Тому електромагнітні екрани виготовляють переважно з алюмінію, оскільки він має високу питому електропровідність за відносно невеликої вартості.

В Україні процес заміни повітряних ЛЕП на підземні кабельні лінії тільки-но розпочався, тоді як у провідних країнах світу вони вже набули значного поширення. Тому проблемі нормалізації магнітного поля кабельних ліній присвячено досить багато закордонних публікацій. Аналіз даних літератури свідчить, що для зниження магнітного поля підземних кабельних ліній найчастіше застосовують плоскі, U-подібні та L-подібні електромагнітні екрани. Для опису їх екранувальних властивостей використовують поняття ефективності екранування, яке визначається як відношення діючого значення магнітної індукції в точці спостереження без застосування екрана до діючого значення магнітної індукції в разі використання екрана. Плоскі екрани є конструктивно простими, однак вони мають відносно малу ефективність екранування. Найбільша ефективність екранування досягається незамкненими екранами U-подібної конструкції. Інші конфігурації електромагнітних екранів (H-, V-, W-подібні) не набули значного поширення, оскільки вони

конструктивно складніші, а їхня ефективність екранування істотно не відрізняється від ефективності U-подібних екранів.

Забезпечення необхідної величини ефективності екранування завдяки збільшенню товщини екрана призводить до значних витрат металу, що суттєво підвищує вартість. З огляду на це актуальним стає пошук інших шляхів підвищення ефективності екранування магнітного поля кабельних ліній.

Ідея виконаних досліджень полягає в підвищенні ефективності екранування магнітного поля кабельних ліній за допомогою кількох екранувальних елементів, розташованих у просторі певним чином. Застосування стандартних програмних пакетів для дослідження екранувальних властивостей таких екранів ставить високі вимоги до обчислювальних засобів, тому було розроблено математичну модель, яка дає змогу ефективно досліджувати екранувальні властивості тонкостінних незамкнених електромагнітних екранів.

Теоретичною основою опису процесу електромагнітного екранування є система рівнянь Максвелла, яка у цьому випадку може бути записана у квазістаціонарному наближенні. Крім того, при аналізі було прийнято такі припущення: задача розв'язується у двовимірній постановці, а поле, створюване протяжними кабельними лініями, вважається плоскопаралельним; кабелі розглядаються як струмові нитки; вплив зовнішнього середовища на розподіл магнітного поля не враховується.

Використання закону повного струму в інтегральній формі, записаного в квазістаціонарному наближенні в термінах комплексних амплітуд, та умови калібрування Вейля дозволило отримати кінцеве рівняння. Для його розв'язання використовувався метод скінченних різниць. Задана розрахункова область містила кабельну лінію, електромагнітний екран і зону, яку потрібно захистити. На границях розрахункової області було введено одноосові добре погоджені шари: це додаткове середовище займає кілька комірок розрахункової сітки і відіграє допоміжну роль, а її анізотропні параметри забезпечують швидко і безвідбивне

згасання в ній електромагнітного поля. Також розрахункову область було розділено на ряд додаткових підобластей, частина з яких містила тонкостінні електропровідні елементи екрана. У кожній підобласті було накладено розрахункову сітку, причому крок усередині екранувальних елементів був дрібнішим. Розв'язки з сусідніх підобластей «зшивалися» на їх границях. Для кожного вузла сітки рівняння, отримане із закону повного струму, було записано в скінченно-різницевій формі, а одержана система алгебраїчних рівнянь (її матриця має тридіагональний вигляд) розв'язувалася за допомогою прогонки ітераційним методом змінних напрямів. Ітераційний процес тривав доти, доки зміна значень компонент магнітної індукції не ставала меншою за задану відносну похибку.

Запропонована математична модель дала змогу на основі чисельного моделювання знаходити розподіл магнітного поля в системі «кабельна лінія – тонкостінні електропровідні елементи електромагнітного екрана» і моделювати процес електромагнітного екранування.

Синтез незамкнених екранів з метою підвищення ефективності екранування магнітного поля кабельної лінії

За допомогою розробленої моделі було досліджено залежності ефективності екранування магнітного поля кабельних ліній електропередачі від різних параметрів екрана: під час чисельного моделювання варіювалися типи екранувальних елементів (плоскі чи U-подібні), товщина і ширина цих елементів, кількість екранувальних елементів за умови збереження їх сукупної металомісткості, розташування крайніх елементів, відстань між сусідніми елементами за умови фіксації нижнього або верхнього елемента, розташування середніх елементів за умови фіксації крайніх елементів тощо.

У процесі дослідження залежності діючого значення магнітної індукції від висоти розташування верхньої пластини двохелементного екрана було виявлено глобальний мінімум. Наявність екстремуму свідчить про те, що існує оптимальна конструкція екрана, при якій

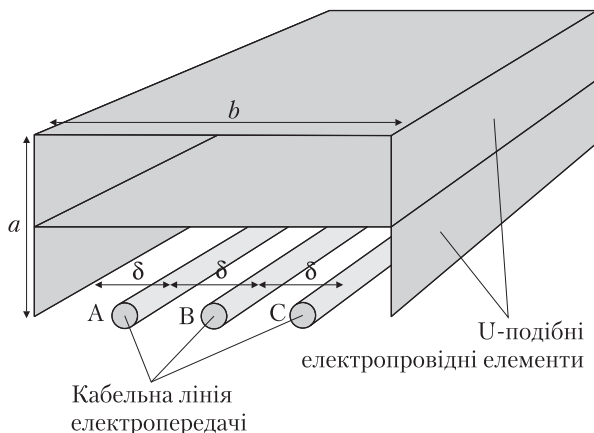


Рис. 3. Запропонована конструкція електромагнітного екрана для високовольтної кабельної лінії: $a = 2\delta$, $b = 4\delta$, де δ – відстань між осями сусідніх кабелів

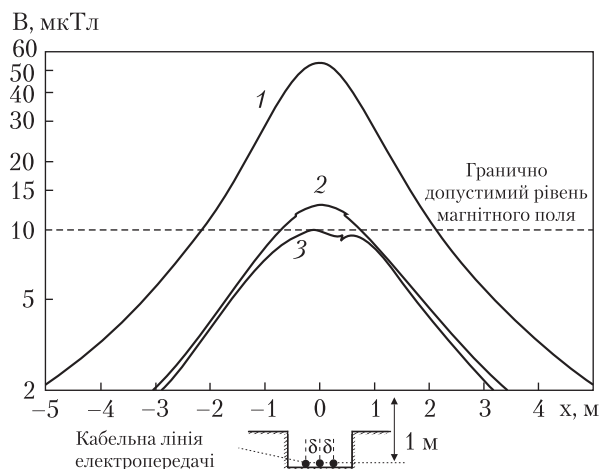


Рис. 4. Діюче значення магнітної індукції поля кабельної лінії на висоті 0,5 м над рівнем землі при використанні різних типів екранів: 1 – неекрановане магнітне поле; 2 – з U-подібним електромагнітним екраном (товщина стінок 2 мм); 3 – з електромагнітним екраном запропонованої конструкції (товщина стінок 1 мм)

величина поля, що екранується, мінімальна. Це було підтверджено експериментально на магнітовимірювальному стенді Інституту технічних проблем магнетизму НАН України.

Розвиваючи ідею застосування електромагнітних екранів, що складаються з двох елементів, було досліджено екранувальні властивості системи двох U-подібних електропровідних елементів. У результаті чисельного моделюван-

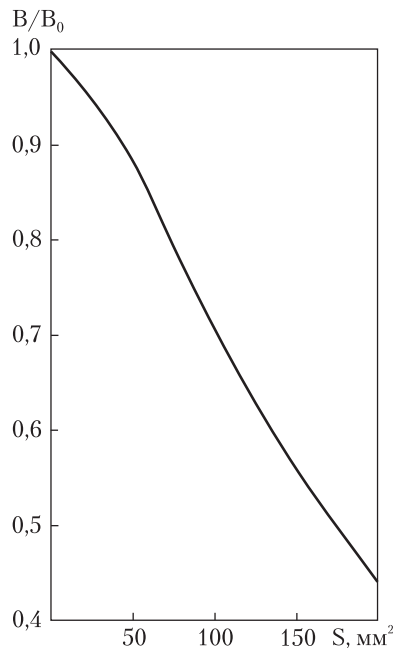


Рис. 5. Залежність коефіцієнта екранування магнітного поля кабельної лінії від площі поперечного перерізу заземлених власних екранів кабелів

ня та експериментальних досліджень запропоновано нову конструкцію незамкненого електромагнітного екрана підвищеної ефективності для екранування магнітного поля у верхньому півпросторі підземної трифазної високовольтної кабельної лінії з горизонтальним розташуванням кабелів окремих фаз. Він складається з двох розміщених один над одним U-подібних елементів, ширина яких у 4 рази перевищує відстань між фазними кабелями, висота дорівнює міжфазній відстані, край нижнього U-подібного екранувального елемента досягає горизонтальної площини розташування кабельної лінії, а відстань між кабелями та найближчим до них екранувальним елементом і величина проміжку між екранувальними елементами дорівнює міжфазній відстані (рис. 3).

Ефективність екранування магнітного поля трифазної кабельної лінії таким екраном на 20 % більша за ефективність екранування одинарним U-подібним екраном еквівалентної металомісткості. Це підвищення досягається завдяки тому, що нижній екранувальний елемент знаходиться біля кабелів, а верхній елемент

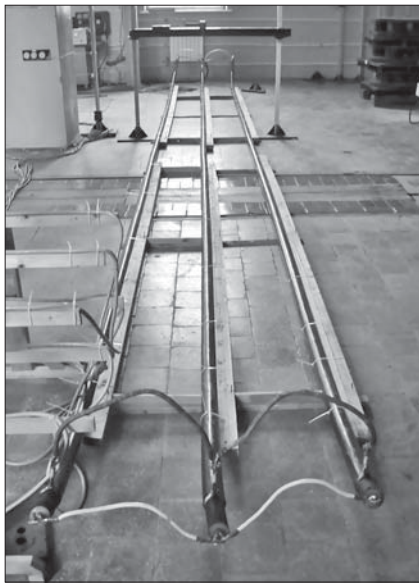


Рис. 6. Експериментальна установка для дослідження магнітного поля кабельної лінії

розташований ближче до частини простору, в якій розподіл магнітної індукції неекранованого магнітного поля вздовж горизонтальної осі x має найбільші значення, чим забезпечується додаткове її зниження в цій зоні.

На рис. 4 наведено результат екранування магнітного поля кабельної лінії (глибина закладання кабелів – 0,5 м, відстань між осями сусідніх кабелів $\delta = 0,2$ м, діюче значення струму в жилах кабелів $I = 800$ А) за допомогою екранів еквівалентної металомісткості відомої та запропонованої конструкції. Як видно із зображених на рис. 4 залежностей, запропонований екран з двох U-подібних елементів (крива 3) дозволяє знизити магнітне поле до нормованого рівня. Водночас відомий U-подібний екран еквівалентної металомісткості, взятий як прототип, має гірші екранувальні властивості (крива 2).

Є також інші способи зниження магнітного поля кабельних ліній. Сьогодні разом з колегами з Національної енергетичної компанії «Укренерго» досліджується підхід, заснований на використанні власних екранів кабелів (поз. 3 на рис. 1). Ці екрани, як правило, заземлюються з обох боків кабельної лінії. За

допомогою чисельного моделювання вперше отримано залежність коефіцієнта екранування B/B_0 від площі S поперечного перерізу власних екранів кабелів (рис. 5), де B – екрановане магнітне поле, B_0 – магнітне поле при розімкнених власних екранах кабелів. З наведеної залежності випливає, що завдяки використанню власних екранів кабелів магнітне поле кабельної лінії може бути зменшене більш як удвічі. Результати моделювання підтверджено експериментально на стенді Інституту технічних проблем магнетизму НАН України (рис. 6).

Висновки

У результаті проведених досліджень розроблено математичну модель, яка описує процеси і явища електромагнітного екранування магнітного поля при використанні тонкостінних електромагнітних екранів різних конструкцій.

На основі цієї моделі обґрунтовано можливість підвищення ефективності екранування магнітного поля у верхньому півпросторі горизонтальних кабельних ліній електропередачі завдяки проведенню оптимізації геометричних параметрів і просторового розташування електропровідних елементів екрана.

Уперше показано, що найбільшу ефективність екранування магнітного поля кабельних ліній мають екрани, що складаються з двох розміщених один над одним U-подібних електропровідних елементів. Визначено умови, яким мають задовольняти конструктивні параметри електромагнітного екрана задля підвищення його ефективності екранування без збільшення металомісткості.

Отримано та експериментально обґрунтовано значення ефективності екранування магнітного поля високовольтної кабельної лінії електропередачі із заземленими власними екранами її кабелів залежно від величини поперечного перерізу цих екранів.

Доповідач висловлює велику подяку співавторам робіт, на основі яких зроблено це повідомлення, а саме: чл.-кор. НАН України В.Ю. Розову та д.т.н. М.М. Резинкіній (ДУ «Інститут технічних проблем магнетизму НАН України»).

В.С. Гринченко

ГУ «Институт технических проблем магнетизма Национальной академии наук Украины»
ул. Индустриальная, 19, Харьков, 61106, Украина

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКРАНИРОВАНИЯ ТЕХНОГЕННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ

Разработан метод численного моделирования процесса электромагнитного экранирования магнитного поля подземных кабельных линий электропередачи. При помощи этого метода исследованы экранирующие свойства различных незамкнутых электромагнитных экранов, состоящих из нескольких тонкостенных плоских или U-образных проводящих элементов. Предложена новая конструкция экрана из двух U-образных проводящих элементов, которая позволяет примерно на 20% увеличить эффективность экранирования магнитного поля кабельной линии по сравнению с известными электромагнитными экранами эквивалентной металлоемкости. Исследована возможность снижения магнитного поля кабельных линий электропередачи за счет использования собственных экранов высоковольтных кабелей.

Ключевые слова: электромагнитное экранирование, подземная кабельная линия, U-образный экран, численное моделирование.

V.S. Grinchenko

Institute of Technical Problems of Magnetism of National Academy of Sciences of Ukraine
19 Industrialna St., Kharkov, 61106, Ukraine

INCREASE OF SCREENING EFFICIENCY OF TECHNOGENIC MAGNETIC FIELD OF UNDERGROUND HIGH-VOLTAGE POWER CABLES

A method of numerical simulation of electromagnetic shielding of underground high-voltage power cables magnetic field is developed. The screening properties of various unclosed electromagnetic shields, comprising several flat or U-shaped conductive elements, are explored. A new shield of two U-shaped conductive elements is designed. The magnetic field screening efficiency of the designed shield is about 20% higher than the screening efficiency of known electromagnetic shields with the equal specific quantity of metal. The possibility of the cable lines magnetic field reducing through the use of the own high-voltage cables shields is explored.

Keywords: electromagnetic shielding, underground power cables, U-shaped shield, numerical simulation.