

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

**«ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ ТА МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ МАГНІТНОГО ПОЛЯ
ВИСОКОВОЛЬТНИХ КАБЕЛЬНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ
ПРИ ДВОСТОРОННЬОМУ ЗАЗЕМЛЕННІ ЕКРАНІВ КАБЕЛІВ»**

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 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.

Аналітичних методик моделювання та розрахунку МП при двосторонньому заземленні екранів кабелів не існувало, 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 виявився актуальною темою.

Метою роботи є розвиток теоретичних засад моделювання та розробка методів розрахунку магнітного поля високовольтних трифазних кабельних ліній при двосторонньому заземленні їх екранів за допомогою аналітичних розв'язків.

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. На основі розроблених методів розрахунку магнітного поля трифазних кабельних ліній при двосторонньому заземленні екранів кабелів запропоновано та експериментально верифіковано відповідну методику, яка дозволяє на етапі проектування кабельних ліній здійснювати розрахунок магнітного поля для будь-якої схеми прокладання кабелів кабельних ліній і забезпечує перевірку відповідності рівня магнітного поля екологічним нормам.

Основні результати виконаних в роботі досліджень і практичних розробок використано:

– 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-МЕВ40.1-37471933-49:2011.2;

– 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 магнітного поля кабельних ліній 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 Національну енергетичну компанію «Укренерго» і дозволяє зменшити похибку розрахунку до 5%, яка наразі перевищує 30%.

Публікації. Результати досліджень опубліковані у 19 наукових працях, з яких 13 статей включено до наукометричних баз Scopus та Web of Science, 5 тез доповідей на міжнародних конференціях. Загальна кількість посилань на публікації (та h-індекс) у Google Shcolar – 92 (5), у Scopus – 18 (3), у Web of Science – 16 (2).

КОРОТКИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

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.

Магнітне поле 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 (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 індуковані струмами жил $\dot{I}_{жк}$

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 схеми їх замикання (рис. 2, б). Тоді індукція

$\dot{B}_{кл}$ МП КЛ є суперпозицією індукцій МП, що створюються струмами жил та струмами екранів кабелів.

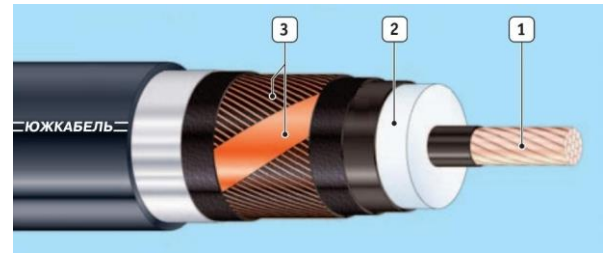


Рисунок 1 – Основні конструктивні елементи високовольтного кабелю:
1 – алюмінієва або мідна жила,
2 – ізоляція зі зшитого поліетилену,
3 – мідний екран

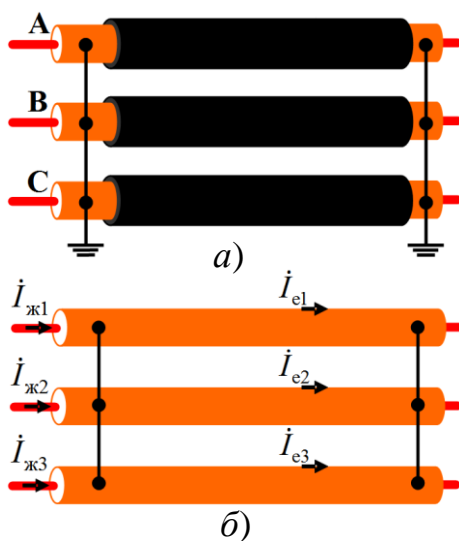


Рисунок 2 – Трифазна КЛ з двостороннім заземленням екранів (а), та двостороннім замиканням екранів (б)

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

Однак у відомих літературних джерелах відсутні аналітичні розв'язки задачі розрахунку МП, яке створюється струмами \dot{I}_{ek} , що унеможливорює визначення МП КЛ. Зокрема, в роботах іноземних авторів 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

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 (1) як відношення діючого значення індукції МП КЛ з розімкненими екранами $B_{ж}$ до діючого значення індукції МП КЛ з замкненими екранами $B_{кл}$:

$$B_{кл} = B_{ж} / SF. \quad (1)$$

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 .

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 феромагнітними осердями (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 замиканням; густина індукovanого 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.

Індукція $B_{кл}$ визначається як корінь квадратний із суми квадратів модулів X - та Y -компонент. Вирази для просторових X - та Y -компонент комплексних амплітуд індукції МП можуть бути визначені як:

$$\dot{B}_{\text{кЛ},x} = \sum_{k=1}^3 \frac{\mu_0}{2\pi} (\dot{i}_{\text{ж}k} + \dot{i}_{\text{ек}k}) \frac{-(y-y_k)}{(x-x_k)^2 + (y-y_k)^2}, \quad \dot{B}_{\text{кЛ},y} = \sum_{k=1}^3 \frac{\mu_0}{2\pi} (\dot{i}_{\text{ж}k} + \dot{i}_{\text{ек}k}) \frac{x-x_k}{(x-x_k)^2 + (y-y_k)^2}. \quad (2)$$

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

З (2) витікає, що для розрахунку МП КЛ необхідно визначити комплексні амплітуди струмів $\dot{I}_{\text{ек}k}$, що індуються в екранах кабелів.

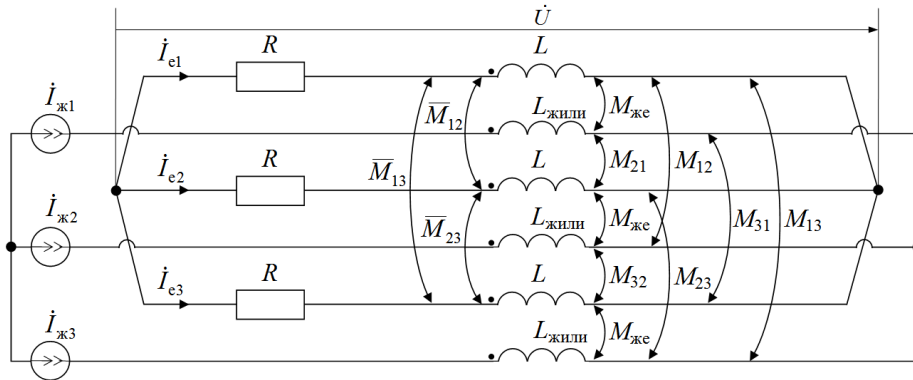


Рисунок 3 – Еквівалентна електрична схема трифазної КЛ з двосторонньо замкненими екранами

Електромагнітні процеси в КЛ відповідно до її еквівалентної схеми (рис. 3) можуть бути описані наступною системою рівнянь

$$\begin{cases} -(R + j\omega L)\dot{I}_{e1} - j\omega M_{12}\dot{I}_{e2} - j\omega M_{13}\dot{I}_{e3} + \dot{U} = j\omega M_{\text{же}e}\dot{I}_{\text{ж}1} + j\omega M_{12}\dot{I}_{\text{ж}2} + j\omega M_{13}\dot{I}_{\text{ж}3}; \\ -(R + j\omega L)\dot{I}_{e2} - j\omega M_{21}\dot{I}_{e1} - j\omega M_{23}\dot{I}_{e3} + \dot{U} = j\omega M_{\text{же}e}\dot{I}_{\text{ж}2} + j\omega M_{21}\dot{I}_{\text{ж}1} + j\omega M_{23}\dot{I}_{\text{ж}3}; \\ -(R + j\omega L)\dot{I}_{e3} - j\omega M_{31}\dot{I}_{e1} - j\omega M_{32}\dot{I}_{e2} + \dot{U} = j\omega M_{\text{же}e}\dot{I}_{\text{ж}3} + j\omega M_{31}\dot{I}_{\text{ж}1} + j\omega M_{32}\dot{I}_{\text{ж}2}; \\ \dot{I}_{e1} + \dot{I}_{e2} + \dot{I}_{e3} = 0, \end{cases} \quad (3)$$

де $\dot{I}_{\text{ж}k}$ та $\dot{I}_{\text{ек}k}$ – відповідно, комплексні амплітуди струмів в жилі та екрані k -ого кабелю; R – активний опір екрана кабелю довжиною l ; $\omega=2\pi \cdot 50, \text{с}^{-1}$ – кутова частота струму; L – власна індуктивність екрана; $M_{\text{же}e}$ – 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; $\mu_0=4\pi \cdot 10^{-7}, \text{Гн/м}$ – магнітна стала; j – уявна одиниця.

Таким чином, співвідношення (2)-(3) описують вперше розроблену 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 (2)-(3) 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, 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 (3) має вигляд

$$I_{ek}^{тр} = -I_{жk} \cdot \frac{j\omega(M_{же} - M)}{R + j\omega(L - M)} = -I_{жk} \cdot \frac{j\omega M^*}{R^* + j\omega M^*} = \alpha \cdot I_{жk}, \quad \alpha = \frac{-j\omega M^*}{R^* + j\omega M^*}, \quad (4)$$

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; r – радіус перерізу екрана.

Відповідно, за допомогою (1)-(2) та (4) можна отримати співвідношення для визначення коефіцієнта екранування SF МП при прокладанні КЛ «у трикутник»

$$SF_{тр} = \frac{1}{|1 + \alpha|} = \left| 1 + j \cdot \frac{\mu_0 \omega}{2\pi R^*} \cdot \ln \frac{d}{r} \right|. \quad (5)$$

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

$$M_{12} = M_{23} \neq M_{31}, \quad M_{12} = M_{23} = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left(\ln \frac{2l}{d} - 1 \right), \quad M_{31} = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left(\ln \frac{l}{d} - 1 \right). \quad (6)$$

Рішення системи (3) для випадку, коли струми в жилах утворюють систему струмів прямої послідовності, має наступний вигляд:

$$I_{e1,3}^{пр} = I_{ж1,3} \cdot \frac{Q \cdot \ln 2\Delta \cdot \ln \frac{\Delta^3}{2} \pm \sqrt{3} \ln 2 - j \ln 4\Delta^3}{-Q \cdot \ln 2\Delta \cdot \ln \frac{\Delta^3}{2} + \frac{3}{Q} + 2j \ln 2\Delta^3}; \quad I_{e2}^{пр} = I_{ж2} \cdot \frac{Q \ln \frac{\Delta^3}{2}}{-Q \ln \frac{\Delta^3}{2} + 3j}, \quad (7)$$

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

Для отримання компактного виразу $SF_{пл}$ при прокладанні кабелів «у площині» використано перетворення Кларк. Похибка виразу не перевищує 5%

$$SF_{пл} = \left| 1 + j \cdot \frac{\mu_0 \omega}{2\pi R^*} \cdot \ln \frac{2d}{r} \right|. \quad (8)$$

КЛ з феромагнітними осердями. У деяких випадках кожний з кабелів КЛ, при двосторонньому заземленні екранів кабелів, охоплюється ФО (рис. 4), що дозволяє посилити магнітний зв'язок між струмами жил та екранів кабелів КЛ і збільшити коефіцієнт екранування МП при двосторонньому заземленні екранів кабелів. При прокладанні кабелів «у трикутник» для розрахунку коефіцієнта екранування отримано наступний вираз

$$SF_{тр} = \frac{1}{|1 + \alpha|} = \left| 1 + j \cdot \frac{\mu_0 \omega}{2\pi R^*} \cdot \ln \frac{d}{r} + j \cdot \frac{l_{\text{ФО}}}{l} \cdot \frac{(\mu - 1)\mu_0 \omega}{2\pi R^*} \cdot \ln \frac{r_1}{r_2} \right|. \quad (9)$$



Рисунок 4 – Макет трифазної КЛ, кабелі якої охоплені ФО

Компактне співвідношення для розрахунку коефіцієнта екранування «у площині» може бути отримано підстановкою $d \rightarrow 2 \cdot d$ в співвідношення (9).

У третьому розділі 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 експериментальну установку, яка містить фізичний макет трифазної КЛ. Він складається з 3-х кабелів типу АПвЕгаПу-110 1×240 / 70 (переріз жили 240 мм², переріз мідного екрана 70 мм², діаметр екрана 55 мм) довжиною по 10 м.

Експериментальна перевірка (9) для МП КЛ в разі охоплення кабелів ФО виконана на фізичному макеті КЛ, представленому на рис. 4. 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 2-4-кратного підвищення коефіцієнта екранування МП КЛ при двосторонньому заземленні екранів кабелів шляхом охоплення кабелів КЛ феромагнітними осердями.

У четвертому розділі представлено верифіковану методику розрахунку МП КЛ і повздовжніх струмів в екранах кабелів при їх двосторонньому заземленні та наведені результати впровадження роботи в нормативних документах Міненерговугілля. Розраховані згідно (1), (5) і (8) та експериментально обґрунтовані значення коефіцієнта ослаблення $m=1/SF$ МП для КЛ типового конструктивного виконання представлені в таблиці, 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.

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.

Основні результати виконаних досліджень і практичних розробок використано 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, при виконанні тематичного плану ДУ «ІТІМ НАН України».