

В.Ю. Розов, С.Ю. Реуцкий, Д.Є. Пелєвін, К.Д. Кундіус

Наближений метод розрахунку магнітного поля повітряних ліній електропередачі 330-750 кВ в зоні виконання робіт без зняття напруги

Проблема. Для організації ефективного захисту робочого персоналу від дії сильного електромагнітного впливу при виконанні робіт на високовольтних лініях електропередачі (ЛЕП) під напругою, потребують розвитку існуючі методи розрахунку магнітного поля (МП) в напрямі їх спрощення при оперативному використанні. **Мета.** Метою роботи є розробка наближеного методу та спрощеної методики розрахунку індукції магнітного поля поблизу поверхні проводів ЛЕП 330-750 кВ для оперативного визначення безпечної дистанції робочого персоналу до поверхні проводів ЛЕП при поточному значенні їх робочого струму. **Методологія.** Запропоновано новий наближений метод розрахунку індукції МП в зоні виконання робіт на ЛЕП під напругою, що ґрунтується на законі Біо-Савара, та визначенні максимальних значень індукції МП ЛЕП на осях симетрії N підвісу N проводів, що є визначальними для захисту робочого персоналу. **Результати.** Виявлено перевищення прийнятого в Євросоюзі гранично допустимого рівня МП для окремих ЛЕП при їх номінальних струмах, та необхідність реалізації заходів із зменшення МП. **Оригінальність.** Показано, що розподіл МП ЛЕП 330-750 кВ поблизу N її розщеплених проводів з похибкою не більш 2,5 % може визначатися за МП тільки однієї із фаз ЛЕП. Цей розподіл МП, що є нерівномірним, визначається порядком осевої симетрії N з максимальними значеннями індукції магнітного поля, що лежать на осях симетрії N підвісу проводів фаз. **Практична цінність.** Виконана розробка наближеного методу і спрощеної методики розрахунку індукції магнітного поля поблизу поверхні проводів високовольтної ЛЕП 330-750 кВ, що дозволяють оперативно, без використання комп'ютера, розраховувати безпечну відстань до проводів конкретної ЛЕП при поточному значенні її робочого струму, а також визначити необхідні заходи із захисту персоналу від МП, які можуть бути реалізовані або шляхом фізичного обмеження мінімальної відстані від тіла робітника до поверхні проводів до небезпечної, або необхідного зменшення робочого струму ЛЕП на час ремонтних робіт. **Верифікація.** Здійснено експериментальну перевірку запропонованих метода та методики на лабораторній установці з макетом фази ЛЕП 330 кВ із проводів типу АС 400 при струмі 1500 А, яка підтвердила коректність запропонованих розрахункових співвідношень. Бібл. 30, рис. 9.

Ключові слова: високовольтна лінія електропередачі, роботи без зняття напруги, магнітне поле поблизу проводів, метод розрахунку.

Вступ. Виконання ремонтних робіт під робочою напругою на повітряних лініях електропередачі (ЛЕП) надвисокої напруги [1-6] – ефективний шлях підвищення рентабельності магістральних електромереж, що дозволяє зберегти електроживлення споживачів в період ремонту. Однак при організації таких робіт, що здійснюються в Україні робочим персоналом Національної енергетичної компанії НЕК «Укренерго» (NRC Ukrenergo) поблизу проводів ЛЕП (рис. 1), виникає проблема захисту персоналу від дії сильного електромагнітного поля промислової частоти, яке характеризується діючими значеннями напруженості E електричного поля (ЕП) і індукції B магнітного поля (МП) та може досягати небезпечної рівня [7, 8].



Рис. 1. Виконання НЕК «Укренерго» ремонтних робіт на ЛЕП 330 кВ без зняття напруги

На теперішній час проблему захисту персоналу від ЕП практично вирішено за допомогою спеціальних екрануючих захисних костюмів (рис. 1) із електропровідного матеріалу [9-13]. Але ці костюми не екранують МП [14, 15]. Відомі методи за засоби паси-

вного та активного екранування МП ЛЕП, що використовуються для його зменшення в житлових та громадських будинках [16-20], також не можуть бути застосовані поблизу проводів ЛЕП, так як потребують значного вільного простору для розміщення екрануючих елементів, якого поблизу проводів ЛЕП немає. Тому захист персоналу від МП ЛЕП поблизу її проводів, яке є потенційним [21, 22] і спадає при віддаленні від ЛЕП, може бути здійснено традиційним шляхом – захистом відстанню [19] за рахунок введення безпечної дистанції між проводами і тілом робітника. Така безпечна дистанція повинна забезпечувати спадання індукції МП на тілі робітника до гранично припустимого рівня (6 мТл), що регламентується вимогами Євросоюзу [7, 8]. Для визначення цієї безпечної дистанції необхідно оперативно, в польових умовах, після отримання даних про поточне навантаження ЛЕП, здійснювати розрахунки індукції МП в робочій зоні ЛЕП (рис. 1). Робоча зона формується на відстані від 2 мм до L мм від поверхні проводів ЛЕП. Тут 2 мм – це товщина захисного костюму, яка обмежує мінімальну відстань між проводом і тілом робітника при його торканні до проводу, а L – безпечна відстань, на якій індукція МП ЛЕП гарантовано спадає до гранично допустимого рівня.

Але відомі методи розрахунку МП, які можуть бути застосовані поблизу проводів ЛЕП [23-27], ґрунтуються на досить складних для практичного використання чисельних розрахунках, реалізація яких потребує застосування комп'ютера із спеціальною програмою. Це затрудняє здійснення оперативного визначення в польових умовах індукції МП поблизу проводів ЛЕП, що необхідно для організації безпечної роботи персоналу за МП при виконанні ремонтних робіт

на ЛЕП під навантаженням без зняття напруги. Більш прийнятними для оперативного розрахунку МП ЛЕП є аналітичні методи, котрі ґрунтуються на законі Біо-Савара [21, 22, 28]. Але ці методи обґрунтовані тільки для розрахунку МП на значній відстані від ЛЕП, що перевищує міжфазну відстань між її проводами [21, 22, 29]. Крім того, вказані методи не враховують таку істотну для розрахунку МП особливість конструктивного виконання фазних проводів ЛЕП 330-750 кВ, як їх розщеплення [2, 3, 30] і також потребують використання комп'ютера. Таким чином, відомі методи розрахунку МП поблизу проводів ЛЕП 330-750 кВ потребують розвитку.

Метою роботи є розробка наближеного методу та спрощеної методики розрахунку індукції магнітного поля поблизу поверхні проводів ЛЕП 330-750 кВ для оперативного визначення безпечної дистанції робочого персоналу до поверхні проводів ЛЕП при поточному значенні їх робочого струму.

Конструктивне виконання ЛЕП 330-750 кВ. Аналіз геометричних розмірів підвісу проводів реальних ЛЕП 330-750 кВ [2, 30] показує, що їх фази виконуються розщепленими на $N \in (2-5)$ проводів, осі яких лежать у вершинах правильних симетричних многокутників (рис. 2) з радіусом описаного кола R .

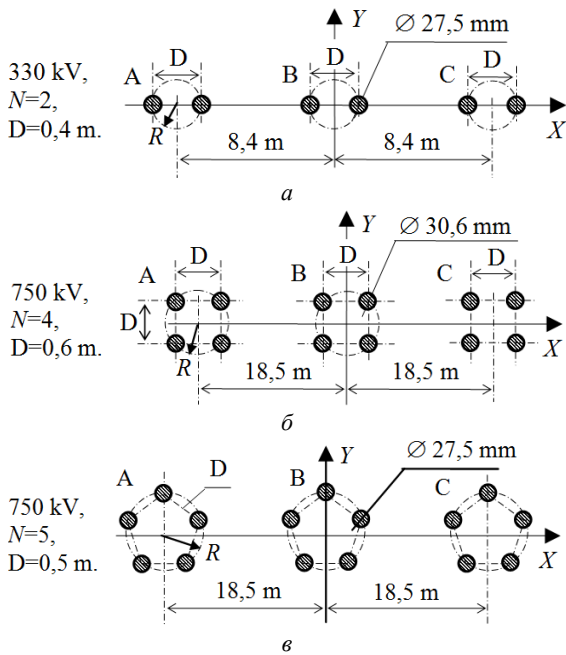


Рис. 2. Конструкція підвісу проводів працюючих в Україні ЛЕП 330-750 кВ

Як слідує із рис. 2, діаметри d проводів ЛЕП (27-31 мм) на порядок менші відстані D (0,4-0,6 м) між розщепленими проводами фази та від міжфазної відстані (8,4-18,5 м). Це дозволяє при розрахунку МП знехтувати нерівномірністю щільності струму в проводах, спричиненою ефектом близькості, і успішно використовувати аналітичний метод [22] для наближеного розрахунку індукції МП ЛЕП в точках спостереження P (рис. 3), які знаходяться поблизу поверхні проводів ($l_r \in (0,002-500)$ мм).

Метод розрахунку МП. Обґрунтуємо можливість виконання розрахунку індукції МП при знаходженні точки спостереження P (рис. 3) поблизу пове-

рхні проводів ЛЕП, на основі використання запропонованого авторами в [22, 29] методу, що ґрунтується на законі Біо-Савара і пройшов ретельну експериментальну перевірку.

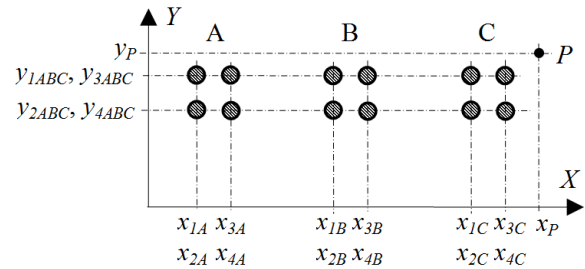


Рис. 3. Координати розташування проводів фаз ЛЕП та точки спостереження P на прикладі ЛЕП 750 кВ

Аналіз будемо виконувати на площині, орієнтованій нормально до напрямку осі ЛЕП для підвісу проводів відповідно до рис. 4 із типовими припущеннями [21, 22] про потенційність і плоскопаралельність МП ЛЕП. Ці припущення необхідно доповнити положеннями про те, що струми в розщеплених проводах окремих фаз ЛЕП ідентичні, мають рівномірну щільність, а проводи виконані із однорідного матеріалу і мають правильну циліндричну форму з діаметром d .

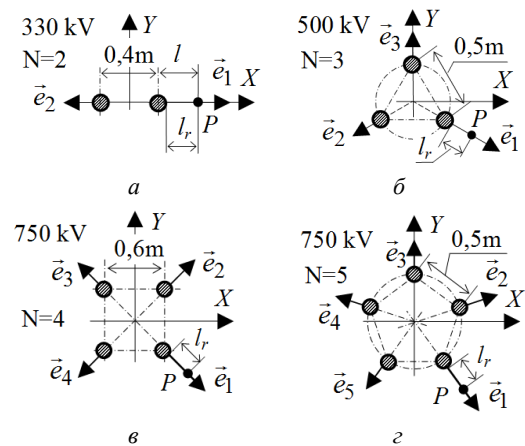


Рис. 4. Геометрія підвісу проводів фаз ЛЕП 330-750 кВ

Тоді відповідно до [22, 29], діючі значення компонент вектору індукції МП кожної фази $\xi \in A, B, C$ в точці спостереження P (рис. 3) при розщепленні фаз ЛЕП на N проводів, можуть бути обчислені як:

$$B_{x,\xi,n}(P) = \frac{\mu_0 I}{2\pi N} \sum_{n=1}^N \frac{y_P - y_{\xi,n}}{(x_P - x_{\xi,n})^2 + (y_P - y_{\xi,n})^2}, \quad (1)$$

$$B_{y,\xi,n}(P) = -\frac{\mu_0 I}{2\pi N} \sum_{n=1}^N \frac{x_P - x_{\xi,n}}{(x_P - x_{\xi,n})^2 + (y_P - y_{\xi,n})^2}, \quad (2)$$

$$B_d(P) = \sqrt{(B_x(P))^2 + (B_y(P))^2}, \quad (3)$$

де I – фазний струм ЛЕП; x_P, y_P – координати точки спостереження P ; $x_{\xi,n}, y_{\xi,n}$ – координати перетину осей проводів n фаз $\xi \in A, B, C$ площини, перпендикулярній осі ЛЕП, $B_d(P)$ – модуль вектору індукції МП в точці P .

Результати розрахунку розподілу індукції МП фази A ЛЕП відповідно до (1-3) при різних N (рис. 2) і номінальному струмі представлені на рис. 5. Розподіл МП для інших фаз ЛЕП є ідентичним.

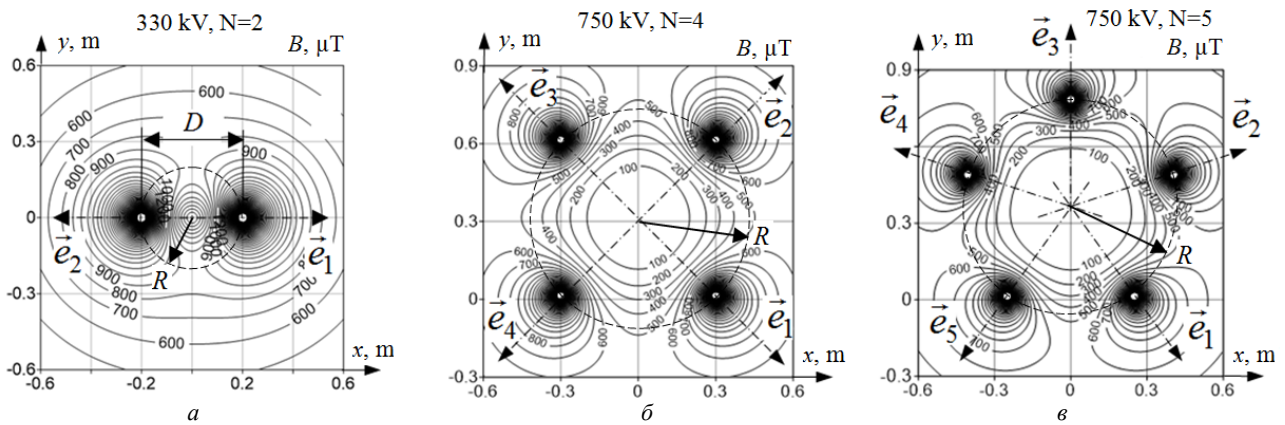


Рис. 5. Розподіл індукції МП поблизу проводів фаз різних ЛЕП в площині, нормальній до її осі

Аналіз характеру розподілу індукції МП (рис. 5) показує, що вона є нерівномірною і має зони з максимальними значеннями, що співпадають з напрямками \vec{e} (рис. 4, 5), які визначаються порядком осьової симетрії N проводів фази ЛЕП. Тому розрахунок МП пропонується виконувати на осях симетрії \vec{e} за умов $P \in \vec{e}$, що відповідають найгіршим для робочого персоналу випадкам із максимальними значеннями індукції МП і при цьому дозволяють істотно спростити розрахунок.

На рис. 6 представлені результати розрахунку відповідно до (1-3) індукції МП фаз різних ЛЕП при номінальних струмах і віддаленні точки спостереження від поверхні проводів на відстань l_r .

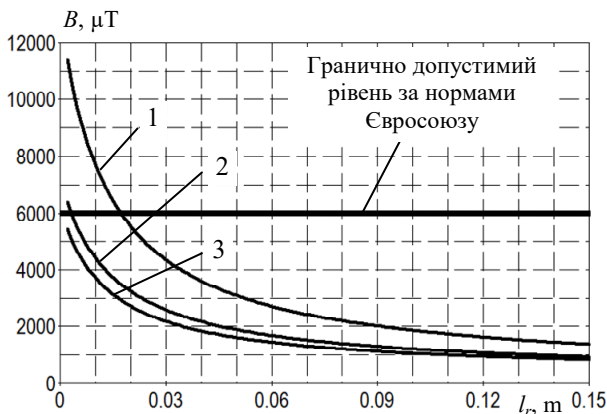


Рис. 6. Залежність максимальних значень індукції МП різних ЛЕП від відстані l_r до поверхні їх проводів (1 – ЛЕП 330, $N=2$, $I_n=1,7$ кА; 2 – ЛЕП 750, $N=4$, $I_n=2$ кА; 3 – ЛЕП 750, $N=5$, $I_n=2$ кА)

Як слідує з рис. 6, при номінальних струмах індукція МП на мінімальній відстані від P до проводів (2 мм) складає від 11,4 мТл для ЛЕП 330 кВ до 6,4 мТл для ЛЕП 750 кВ і перевищує гранично допустимий рівень 6 мТл в 1,9-1,07 разів. Для найгіршого випадку (для ЛЕП 330 кВ, рис. 2,а) індукція МП спадає до гранично допустимого рівня тільки при $l_r = 17$ мм, що вказує на необхідність обмеження робочої дистанції на 15 мм, або відповідного зменшення навантаження ЛЕП та її робочого струму – до 0,52 від номінального. При цьому робоча зона L ЛЕП при розрахунку може бути обмежена відстанню $l_r = 20$ мм, при якій можна знехтувати взаємним впливом МП від струмів різних фаз ЛЕП. Тоді розрахунок максимальних значень ін-

дукції МП поблизу проводів ЛЕП може виконуватися для однієї фази і відповідно до (1-3) буде описаний наступними співвідношеннями:

$$P \in \vec{e}, \sqrt{(x_p - x_n)^2 + (y_p - y_n)^2} > R, \quad (4)$$

$$B_{\max x, n}(P) = \frac{\mu_0 I}{2\pi N} \sum_{n=1}^N \frac{y_p - y_n}{(x_p - x_n)^2 + (y_p - y_n)^2}, \quad (5)$$

$$B_{\max y, n}(P) = -\frac{\mu_0 I}{2\pi N} \sum_{n=1}^N \frac{x_p - x_n}{(x_p - x_n)^2 + (y_p - y_n)^2}, \quad (6)$$

$$B_{\max d}(P) = \sqrt{(B_{\max x}(P))^2 + (B_{\max y}(P))^2}, \quad (7)$$

де \vec{e} – вектор, напрям якого співпадає із одною із N осей симетрії розщеплених проводів ЛЕП.

При цьому відносна похибка розрахунку при використанні співвідношень (4-7), які не враховують взаємний вплив за МП від струмів різних фаз ЛЕП (в порівнянні з розрахунком за співвідношеннями (1-3), не перевищує 2,5 % (рис. 7) і є цілком прийнятною для наближеного розрахунку.

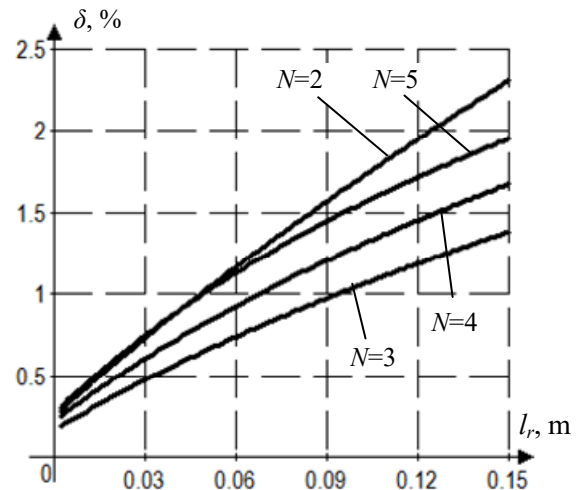


Рис. 7. Розрахована за (4-7) та (1-3) відносна похибка розрахунку МП різних ЛЕП поблизу проводів однієї фази без врахування впливу МП від струмів інших фаз ($N \in 2-5$)

Для подальшого спрощення розрахунку здійснимо перетворення співвідношень (4-7), переходячи від координат розташування проводів x_p, y_p, x_n, y_n , до геометричних параметрів підвісу проводів R, D та відстані l (рис. 2-4) і отримаємо наступні спрощені розрахункові співвідношення для різних N :

$$B_{N=2}(l) = I \cdot \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{(l+R)}{l(l+2R)}, \quad (8)$$

$$B_{N=3}(l) = I \cdot \frac{\mu_0}{6\pi} \left[\frac{1}{l} + \frac{2(l+1.5R)}{l^2 + 3Rl + 3R^2} \right], \quad (9)$$

$$B_{N=4}(l) = I \cdot \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{(l+R)^3}{(l+R)^4 - R^4}, \quad (10)$$

$$B_{N=5}(l) = I \cdot \frac{\mu_0}{10\pi} \left[\frac{1}{l} + \frac{2(l+R - R \cos(2\pi/5))}{(l+R - R \cos(2\pi/5))^2 + (R \sin(2\pi/5))^2} + \frac{2(l+R - R \cos(4\pi/5))}{(l+R - R \cos(4\pi/5))^2 + (R \sin(4\pi/5))^2} \right], \quad (11)$$

де $R = \frac{D}{2 \sin(\pi/N)}$; l – відстань від осі проводу до точки спостереження P .

Отримані розрахункові співвідношення (4-11) є науковою основою для спрощеної методики розрахунку і дозволяють оперативно, за допомогою калькулятора, розраховувати максимальні значення індукції МП ЛЕП для поточних значень струму навантаження в функції відстані l до проводів ЛЕП з урахуванням геометрії їх підвісу.

Таким чином, на основі проведеного вище аналізу можуть бути запропоновані наближений метод розрахунку (4-7) та побудована на його основі спрощена методика розрахунку (8-11) для оперативного визначення індукції МП в зоні виконання робіт на ЛЕП під напругою, що ґрунтується на законі Біо-Савара та визначенні максимальних значень індукції для будь якої із фаз, що лежать на осях симетрії підвісу розщеплених проводів і визначають безпечну відстань до проводів конкретної ЛЕП при поточному значенні її робочого струму.

Використання запропонованих методу та методики дозволяє оперативно визначати конкретні заходи із захисту персоналу від МП при виконанні робіт під напругою, які можуть бути реалізовані або шляхом обмеження мінімальної відстані від тіла робітника до проводів (установки на проводи ЛЕП в робочій зоні накидок або матів необхідної товщини), або відповідного зменшення робочого струму ЛЕП на період ремонтних робіт.

Експериментальна перевірка запропонованих методу та методики розрахунку. Експериментальну перевірку запропонованих розрахункових співвідношень (8-12) здійснено на експериментальній установці з лабораторним макетом фази ЛЕП 330 кВ (рис. 8), що створена на магнітовимірювальному стенді магнітодинамічного комплексу Відділу магнетизму технічних об'єктів Інституту проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України.

Макет виконано на основі 2-х проводів ЛЕП типу АС 400 з $d = 28$ мм і довжиною по 5 м та їх розташуванням відповідно до рис. 2,а. Експериментальна установка дозволяє виконувати дослідження при струмі в кожному проводі від 100 до 750 А (200-1500 А на фазу). В якості регульованого джерела живлення використовувався трифазний індукційний регулятор типу ИР62 ($P_n = 30$ кВА, $U_n = 22-382$ В), навантажений на два понижувальні однофазні трансформатори типу

ОСУ-80/0,5 ($P_n = 100$ кВА, $U_n = 12,2$ В, $I_n = 8140$ А), що підключені до відповідних проводів лабораторної установки. Індукція МП вимірювалась магнітометром типу Gaussmeter 410 із спеціальною системою позиціонування його датчика (рис. 8), а струм в проводах макету вимірювався за допомогою трансформаторів струму типу ТНФП3000/5 А і амперметрів типу Э526.



Рис. 8. Експериментальна установка з лабораторним макетом фази ЛЕП 330 кВ і пристроєм позиціонування датчика магнітометру

Результати експериментальних досліджень представлені на (рис. 9) і підтверджують співпадіння результатів розрахунку і експерименту при номінальному струмі в проводах 500-750 А з розкидом не більш 10 %, що є цілком прийнятним для фізичного експерименту. Цей розкид в основному пов'язаний із неідеальністю проводу типу АС 400 (його виконанні із скручених жил, рис. 8) і потребує подальшого аналізу. При зменшенні струму похибка збільшується, що пов'язано із збільшенням впливу завади за МП від кабелів живлення макету (рис. 8).

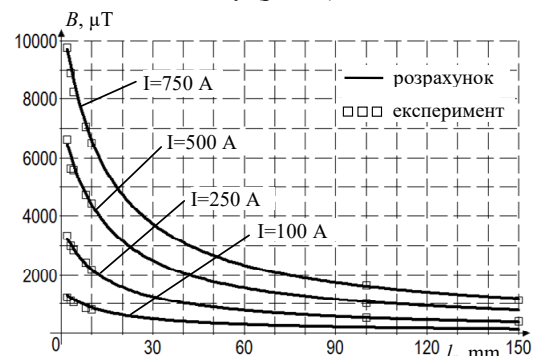


Рис. 9. Результати вимірювання індукції МП на лабораторному макеті фази ЛЕП 330 (рис. 8) при $l_s = 0,002-0,150$ м і струмах в проводах 100-750 А та їх порівняння з розрахунком

Висновки.

1. Виконано аналіз геометричних розмірів підвісу проводів типових ліній електропередачі 330-750 кВ на основі якого показано, що для наближеного розрахунку індукції магнітного поля поблизу їх проводів може бути використаний аналітичний метод на основі закону Біо-Савара з визначенням магнітного поля тільки для однієї із її фаз, без врахування впливу від магнітного поля струмів інших фаз, що дозволяє спростити розрахунок при обмеженій похибці, що не перевищує 2,5 %.

2. Здійснено розрахунок індукції магнітного поля поблизу проводів діючих ліній електропередачі 330-750 кВ при їх номінальних струмах, який показав перевищення прийнятого в Євросоюзі гранично допустимого рівня індукції (6 мТл) для ліній електропередачі 330 кВ з $N=2$ (на відстані від поверхні проводів 17 мм) та 750 кВ $N=4$ (на відстані 3 мм) і необхідність прийняття заходів із зменшення магнітного поля, що діє на персонал при виконанні робіт під напругою.

3. Запропоновано наближений метод розрахунку індукції магнітного поля поблизу поверхні N розщеплених проводів фаз ліній електропередачі 330-750 кВ, осі яких лежать у вершинах симетричних многокутників із порядком симетрії N , що заснований на визначенні тільки максимальних значень індукції магнітного поля, що лежать на осях симетрії N підвісу проводів і є визначальними для організації захисту робочого персоналу від дії магнітного поля. Метод дозволяє істотно спростити розрахунок, виконуючи його тільки для осей симетрії, а не для всього простору.

4. На основі запропонованого наближеного методу розроблено спрощену методику розрахунку магнітного поля, яку можна реалізовувати без застосування комп'ютера, що дозволяє в польових умовах оперативно розраховувати безпечну відстань до проводів конкретної ЛЕП при поточному значенні її робочого струму і визначити заходи, необхідні для захисту персоналу від МП при виконанні робіт під напругою, які можуть бути реалізовані або шляхом фізичного обмеження до небезпечної відстані від тіла робітника до поверхні проводів, або необхідного зменшення робочого струму ЛЕП на час ремонтних робіт.

5. Здійснено експериментальну перевірку запропонованих наближеного методу та спрощеної методики розрахунку магнітного поля на його основі на лабораторній установці з макетом фази лінії електропередачі 330 кВ із проводів типу АС 400 при номінальному струмі 1500 А (750 А на провід). Експеримент підтвердив співпадіння результатів розрахунку і експерименту з припустимою для інженерних розрахунків похибкою не більш 10 %, та коректність запропонованого методу розрахунку, а також доцільність розробки на їх основі нормативних документів Міненерго України із захисту робочого персоналу від негативно впливу магнітного поля при виконанні робіт на лініях електропередачі без зняття напруги.

Подяка. Автори висловлюють подяку інженерам відділу магнетизму технічних об'єктів ІПМаш НАН України А.В. Єрісову та О.В. Соколу за творчий підхід та мужність, проявлені при створенні під обстрілами, в умовах воєнного стану, експериментальної установки та успішному випробуванні лабораторного макету ЛЕП 330 кВ.

Конфлікт інтересів. Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Lovrencic A., Racz L., Gocsei G., Nemeth B. Improving the Reliability of the Transmission and Distribution Network. *2019 7th International Youth Conference on Energy (IYCE)*, 2019, pp. 1-6. doi: <https://doi.org/10.1109/IYCE45807.2019.8991565>.
2. Правила улаштування електроустановок. – Видання офіційне. Міненерговугілля України. – Х.: Видавництво «Форт», 2017. – 760 с.
3. СОУ-Н ЕЕ 20.666:2007 Інструкція з виконання робіт під напругою на ПЛ 110-750 кВ. – К.: ОЕП «ГРІФРЕ», 2007.
4. Собчук В.С., Собчук Н.В. Технології робіт під напругою. – Вінниця: ВНТУ, 2006. – 101 с.
5. Казанський С.В. Експлуатація електричних систем: Обслуговування електричних мереж під робочою напругою. – Київ: НТУУ «КПІ», 2016. – 237 с.
6. *IEEE Guide for Maintenance Methods on Energized Power Lines*. IEEE Std 516-2021, 2022, pp. 1-159. doi: <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2022.9678146>.
7. Directive 2013/35/EU of the European Parliament and of the Council of 26 June 2013 on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (electromagnetic fields). *Official Journal of the European Union*, 2013, L 179, pp. 1-21. Режим доступу: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2013:L179:001:0021:EN:PDF> (Дата звернення: 12.05.2022).
8. Stam R. Comparison of international policies on electromagnetic fields (power frequency and radiofrequency fields). *National Institute for Public Health and the Environment Ministry of Health, Welfare and Sport*, 2018, 18 p. doi: <https://doi.org/10.21945/rivm-document-electromagnetic-fields>.
9. Su Y., Wang X., Li Y., Pan Z., Liu Z. Analysis of the conductivity property of live working shielding clothing. *Journal of Industrial Textiles*, 2018, vol. 48, no. 3, pp. 643-659. doi: <https://doi.org/10.1177/1528083717732071>.
10. Gocsei G., Nemeth B., Tarcsa D. Extra low frequency electric and magnetic fields during live-line maintenance. *2013 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)*, 2013, pp. 100-104. doi: <https://doi.org/10.1109/EIC.2013.6554212>.
11. Gocsei G., Nemeth B., Tamus Z.A., Kiss I., Meixner J. Shielding efficiency of conductive clothing during live-line maintenance. *2014 11th International Conference on Live Maintenance (ICOLIM)*, 2014, pp. 1-5. doi: <https://doi.org/10.1109/ICOLIM.2014.6934339>.
12. Gocsei G., Nemeth B., Tamus Z.A., Kiss I. Face protection investigation against electric field on live line workers. *2012 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, 2012, pp. 535-539. doi: <https://doi.org/10.1109/ELINSL.2012.6251527>.
13. Malgesini R., Valagussa C., Villa A., Carraro R., De Dona G., Milanello C.D., Parizia A.A. Conductive clothing for live line working. *2014 11th International Conference on Live Maintenance (ICOLIM)*, 2014, pp. 1-4. doi: <https://doi.org/10.1109/ICOLIM.2014.6934340>.
14. Gocsei G., Nemeth B., Kiss I., Berta I. Shielding efficiency of conductive clothing in magnetic field. *Journal of Electrostatics*, 2013, vol. 71, no. 3, pp. 392-395. doi: <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2013.01.001>.
15. Gocsei G., Nemeth B., Kiss I., Berta I. Health effects of magnetic fields during live-line maintenance. *2014 11th International Conference on Live Maintenance (ICOLIM)*, 2014, pp. 1-6. doi: <https://doi.org/10.1109/ICOLIM.2014.6934329>.
16. Kuznetsov B.I., Nikitina T.B., Bovdii I.V., Voloshko O.V., Kolomiets V.V., Kobylianskyi B.B. Comparison of the effectiveness of triple-loop and double-loop systems of active shielding of a magnetic field in a multi-storey old buildings.

Electrical Engineering & Electromechanics, 2022, no. 3, pp. 21-27. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2022.3.04>.

17. Kuznetsov B.I., Nikitina T.B., Bovdii I.V., Voloshko O.V., Kolomiets V.V., Kobylanskiy B.B. Method of adjustment of three circuit system of active shielding of magnetic field in multi-storey buildings from overhead power lines with wires triangular arrangement. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2022, no. 1, pp. 21-28. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2022.1.03>.

18. Розов В.Ю., Пелевин Д.Е., Пелевина Е.Д. Внешнее магнитное поле городских трансформаторных подстанций и методы его нормализации. *Електротехніка і електромеханіка*, 2017, № 5, С. 60-66. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2017.5.10>.

19. Розов В.Ю., Реуцкий С.Ю., Пелевин Д.Е., Пилюгина О.Ю. Магнитное поле линий электропередачи и методы его снижения до безопасного уровня. *Технічна електродинаміка*, 2013, № 2, С. 3-9.

20. Conti R., Giorgi A., Rendina R., Sartore L., Sena E.A. Technical solutions to reduce 50 Hz magnetic fields from power lines. *2003 IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings*, 2003, vol. 2, pp. 1016-1021. doi: <https://doi.org/10.1109/PTC.2003.1304685>.

21. Розов В.Ю., Реуцкий С.Ю., Пелевин Д.Е., Яковенко В.Н. Исследование магнитного поля высоковольтных линий электропередачи переменного тока. *Технічна електродинаміка*, 2012, № 1, С. 3-9.

22. Розов В.Ю., Реуцкий С.Ю., Пилюгина О.Ю. Метод расчета магнитного поля трехфазных линий электропередачи. *Технічна електродинаміка*, 2014, № 5, С. 11-13.

23. Kim Y.S. Analysis of Magnetic Field for Power Transmission Line With Multiple AC Singular Currents by Coupling of Fourier Series Expansion and FEM. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2013, vol. 49, no. 5, pp. 2013-2016. doi: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2013.2242451>.

24. Pao-la-or P., Isaramongkolrak A., Kulworawanichpong T. Finite Element Analysis of Magnetic Field Distribution for 500-kV Power Transmission Systems. *Engineering Letters*, 2010, vol. 18, no. 1, pp. 1-9.

25. Li Q., Rowland S.M., Shuttleworth R. Calculating the Surface Potential Gradient of Overhead Line Conductors. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2015, vol. 30, no. 1, pp. 43-52. doi: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2014.2325597>.

26. Krajewski W. Numerical evaluation of the magnetic field exposure near the transition tower of an overhead-underground HV line. *Progress In Electromagnetics Research M*, 2010, vol. 14, pp. 247-261. doi: <https://doi.org/10.2528/PIERM10101102>.

27. Moro F., Turri R. Accurate calculation of the right-of-waywidth for power line magnetic field impact assessment. *Progress In Electromagnetics Research B*, 2012, vol. 37, pp. 343-364. doi: <https://doi.org/10.2528/PIERB11112206>.

28. Moro F., Turri R. Fast Analytical Computation of Power-Line Magnetic Fields by Complex Vector Method. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2008, vol. 23, no. 2, pp. 1042-1048. doi: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2007.915212>.

29. СОУ-Н ЕЕ 20.179:2008 Розрахунок електричного і магнітного полів ліній електропередавання. Методика (зі змінами) (у редакції наказу Міненерго вугілля від 01 липня 2016 р. №423). – К.: Міненергвугілля України, 2016. – 37 с.

30. Кирик В.В. Електричні мережі та системи. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2021. – 324 с.

REFERENCES

1. Lovrencic A., Racz L., Gocsei G., Nemeth B. Improving the Reliability of the Transmission and Distribution Network. *2019 7th International Youth Conference on Energy (IYCE)*, 2019, pp. 1-6. doi: <https://doi.org/10.1109/IYCE45807.2019.8991565>.

2. *Pravila ulashtuvannya electroustanovok* [Electrical installation regulations]. Kharkiv, Fort Publ., 2017. 760 p. (Ukr).

3. *SOU-N EE 20.666:2007 Instruksiya z vikonannya robot pid naprugoyu na PL 110-750 kV* [SOU-N EE 20.666:2007 Instructions for performing live work on 110-750 kV power lines]. Kyiv, OEP GRIFRE Publ., 2007. (Ukr).

4. Sobchuk V.S., Sobchuk N.V. *Tehnologiyi robot pid naprugoyu* [Technologies of works under voltage]. Vinnytsia, VNTU Publ., 2006. 101 p. (Ukr).

5. Kazanskiy S.V. *Ekspluatatsiya elektrichnih system. Obslughovuvannya elektrichnih merezh pid robochoyu naprugoyu* [Operation of electrical systems. Maintenance of electrical networks under working voltage]. Kyiv, NTUU «KPI» Publ., 2016. 237 p. (Ukr).

6. *IEEE Guide for Maintenance Methods on Energized Power Lines*. IEEE Std 516-2021, 2022, pp. 1-159. doi: <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2022.9678146>.

7. Directive 2013/35/EU of the European Parliament and of the Council of 26 June 2013 on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (electromagnetic fields). *Official Journal of the European Union*, 2013, L 179, pp. 1-21. Available at: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2013:001:0021:EN:PDF> (Accessed 12 May 2022).

8. Stam R. Comparison of international policies on electromagnetic fields (power frequency and radiofrequency fields). *National Institute for Public Health and the Environment Ministry of Health, Welfare and Sport*, 2018, 18 p. doi: <https://doi.org/10.21945/rivm-document-electromagnetic-fields>.

9. Su Y., Wang X., Li Y., Pan Z., Liu Z. Analysis of the conductivity property of live working shielding clothing. *Journal of Industrial Textiles*, 2018, vol. 48, no. 3, pp. 643-659. doi: <https://doi.org/10.1177/1528083717732071>.

10. Gocsei G., Nemeth B., Tarcsa D. Extra low frequency electric and magnetic fields during live-line maintenance. *2013 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)*, 2013, pp. 100-104. doi: <https://doi.org/10.1109/EIC.2013.6554212>.

11. Gocsei G., Nemeth B., Tamus Z.A., Kiss I., Meixner J. Shielding efficiency of conductive clothing during live-line maintenance. *2014 11th International Conference on Live Maintenance (ICOLIM)*, 2014, pp. 1-5. doi: <https://doi.org/10.1109/ICOLIM.2014.6934339>.

12. Gocsei G., Nemeth B., Tamus Z.A., Kiss I. Face protection investigation against electric field on live line workers. *2012 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, 2012, pp. 535-539. doi: <https://doi.org/10.1109/ELINSL.2012.6251527>.

13. Malgesini R., Valagussa C., Villa A., Carraro R., De Dona G., Milanello C.D., Parizia A.A. Conductive clothing for live line working. *2014 11th International Conference on Live Maintenance (ICOLIM)*, 2014, pp. 1-4. doi: <https://doi.org/10.1109/ICOLIM.2014.6934340>.

14. Gocsei G., Nemeth B., Kiss I., Berta I. Shielding efficiency of conductive clothing in magnetic field. *Journal of Electrostatics*, 2013, vol. 71, no. 3, pp. 392-395. doi: <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2013.01.001>.

15. Gocsei G., Nemeth B., Kiss I., Berta I. Health effects of magnetic fields during live-line maintenance. *2014 11th International Conference on Live Maintenance (ICOLIM)*, 2014, pp. 1-6. doi: <https://doi.org/10.1109/ICOLIM.2014.6934329>.

16. Kuznetsov B.I., Nikitina T.B., Bovdii I.V., Voloshko O.V., Kolomiets V.V., Kobylanskiy B.B. Comparison of the effectiveness of triple-loop and double-loop systems of active shielding of a magnetic field in a multi-storey old buildings. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2022, no. 3, pp. 21-27. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2022.3.04>.

17. Kuznetsov B.I., Nikitina T.B., Bovdii I.V., Voloshko O.V., Kolomiets V.V., Kobylanskiy B.B. Method of adjustment of three circuit system of active shielding of magnetic field in multi-storey buildings from overhead power lines with wires triangular arrangement. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2022, no. 3, pp. 21-27. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2022.3.04>.

- chanics, 2022, no. 1, pp. 21-28. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2022.1.03>.
18. Rozov V.Y., Pelevin D.Y., Pielievina K.D. External magnetic field of urban transformer substations and methods of its normalization. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2017, no. 5, pp. 60-66. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2017.5.10> (Rus).
19. Rozov V.Yu., Reutskyi S.Yu., Pelevin D.Ye., Pyliugina O.Yu. The magnetic field of power transmission lines and the methods of its mitigation to a safe level. *Technical Electrodynamics*, 2013, no. 2, pp. 3-9. (Rus).
20. Conti R., Giorgi A., Rendina R., Sartore L., Sena E.A. Technical solutions to reduce 50 Hz magnetic fields from power lines. *2003 IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings*, 2003, vol. 2, pp. 1016-1021. doi: <https://doi.org/10.1109/PTC.2003.1304685>.
21. Rozov V.Yu., Reutskyi S.Yu., Pelevin D.Ye., Yakovenko V.N. The research of magnetic field of high-voltage ac transmission lines. *Technical Electrodynamics*, 2012, no. 1, pp. 3-9. (Rus).
22. Rozov V.Yu., Reutskyi S.Yu., Pyliugina O.Yu. Method of calculating the magnetic field of three-phase power lines. *Technical Electrodynamics*, 2014, no. 5, pp. 11-13. (Rus).
23. Kim Y.S. Analysis of Magnetic Field for Power Transmission Line With Multiple AC Singular Currents by Coupling of Fourier Series Expansion and FEM. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2013, vol. 49, no. 5, pp. 2013-2016. doi: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2013.2242451>.
24. Pao-la-or P., Isaramongkolrak A., Kulworawanichpong T. Finite Element Analysis of Magnetic Field Distribution for 500-kV Power Transmission Systems. *Engineering Letters*, 2010, vol. 18, no. 1, pp. 1-9.
25. Li Q., Rowland S.M., Shuttleworth R. Calculating the Surface Potential Gradient of Overhead Line Conductors. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2015, vol. 30, no. 1, pp. 43-52. doi: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2014.2325597>.
26. Krajewski W. Numerical evaluation of the magnetic field exposure near the transition tower of an overhead-underground HV line. *Progress In Electromagnetics Research M*, 2010, vol. 14, pp. 247-261. doi: <https://doi.org/10.2528/PIERM10101102>.
27. Moro F., Turri R. Accurate calculation of the right-of-waywidth for power line magnetic field impact assessment. *Progress In Electromagnetics Research B*, 2012, vol. 37, pp. 343-364. doi: <https://doi.org/10.2528/PIERB11112206>.
28. Moro F., Turri R. Fast Analytical Computation of Power-Line Magnetic Fields by Complex Vector Method. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2008, vol. 23, no. 2, pp. 1042-1048. doi: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2007.915212>.
29. SOU-N EE 20.179:2008 *Rozrahunok elektrichnogo i magnitnogo poliv linij elektroperedavannya. Metodika (zi zminami) (u redakcii nakazu Minenergo vugillya vid 01 lipnya 2016 r. №423)*. [SOU-N EE 20.179:2008 Calculation of electric and magnetic fields of power lines. Methodology (with changes) (in the edition of the order of the Minenergougillya dated July 1, 2016, no. 423)]. Kyiv, Minenergougillya Ukraine Publ., 2016. 37 p. (Ukr).
30. Kirik V.V. *Elektrichni merezhi ta sistemi* [Electrical networks and systems]. Kyiv, NTUU «KPI» Publ., Politehnika Publ., 2021. 324 p. (Ukr).

Надійшла (Received) 08.04.2022
 Прийнята (Accepted) 23.06.2022
 Опублікована (Published) 07.09.2022

How to cite this article:

Rozov V.Yu., Reutskyi S.Yu., Pelevin D.Ye., Kundius K.D. Approximate method for calculating the magnetic field of 330-750 kV high-voltage power line in maintenance area under voltage. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2022, no. 5, pp. 71-77. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2022.5.12>

Розов Володимир Юрійович¹, д.т.н., проф., чл.-кор. НАН України, Реуцький Сергій Юрійович¹, к.т.н., с.н.с., Пелєвін Дмитро Євгенівич¹, к.т.н., ст. досл., Кундіус Катерина Дмитрівна¹, пров. інженер, аспірантка,
¹ Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України, 61046, Харків, вул. Пожарського, 2/10, e-mail: vyurozov@gmail.com; sergiyreutskiy@gmail.com; pelevindmitro@ukr.net (Corresponding Author); kundiuickateryna@ukr.net

V.Yu. Rozov¹, S.Yu. Reutskyi¹, D.Ye. Pelevin¹, K.D. Kundius¹
¹ A. Pidhornyi Institute of Mechanical Engineering Problems of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2/10, Pozharskogo Str., Kharkiv, 61046, Ukraine.

Approximate method for calculating the magnetic field of 330-750 kV high-voltage power line in maintenance area under voltage.

Problem. In order to organize effective protection of working personnel from the action of strong electromagnetic influence when performing work on live high-voltage power lines (HVPL), the existing methods of calculating the magnetic field (MF) need to be developed in the direction of their simplification during operational use. **Goal.** The purpose of the work is to develop an approximate method and a simplified methodology for calculating the magnetic field flux density near the surface of the 330-750 kV HVPL wires for the prompt determination of the safe distance of the working personnel to the surface of the HVPL wires at the current value of their operating current. **Methodology.** A new approximate method of calculating the flux density of the MF in the area of work on live HVPL based on the Biot-Savart law and determining the maximum values of the flux density of the MF on the axes of symmetry N of the suspension of N wires, which are decisive for the protection of working personnel, is proposed. **Results.** Exceeding the maximum acceptable level of the MF for individual power lines at their nominal currents, adopted in the European Union, and the need to implement measures to reduce MF were revealed. **Originality.** It is shown that the distribution of the 330-750 kV HVPL near N of its split wires with an error of no more than 2.5 % can be determined by the current of only one of the phases of the HVPL. This distribution of MF, which is uneven, is determined by the order of axial symmetry N with the maximum values of the flux density of the MF lying on the axes of symmetry N of the suspension of the phase wires. **Practical value.** The development of an approximate method and a simplified methodology for calculating the flux density of the MF near the surface of the wires of 330-750 kV HVPL, which allows you to quickly, without the use of a computer, calculate the safe distance to the wires of a specific HVPL at the current value of its operating current, as well as determine the necessary measures for the protection of personnel from the MF, which can be implemented either by physically limiting the minimum distance from the worker's body to the surface of the wires to a dangerous one, or by necessary reduction of the HVPL operating current during repair work. **Verification.** An experimental verification of the proposed method and methodology was carried out on a laboratory installation with a mock-up of a phase of a 330 kV HVPL from AC 400 type wires at 1500 A current, which confirmed the correctness of the proposed calculation relationships. References 30, figures 9.

Key words: high-voltage power line, live-line maintenance, magnetic field near wires, calculation method.