

Зниження індукції магнітного поля паралельних ЛЕП методом оптимізації порядку підвісу фаз

Димерець А. В., ORCID [0000-0002-7617-5291](https://orcid.org/0000-0002-7617-5291)

Ревко Д. А., ORCID [0000-0002-8913-9222](https://orcid.org/0000-0002-8913-9222)

Кафедра «Електроніка, автоматика, робототехніка та мехатроніка», inel.stu.cn.ua

Красножон О. В., к.т.н., ORCID [0000-0003-2500-254X](https://orcid.org/0000-0003-2500-254X)

Кафедра «Радіотехнічні та вбудовані системи», rtes.stu.cn.ua

Красножон А. В., к.т.н. доц., ORCID [0000-0002-6215-7535](https://orcid.org/0000-0002-6215-7535)

Кафедра «Електрична інженерія та інформаційно-вимірювальні технології», esim.stu.cn.ua

Національний університет «Чернігівська політехніка», ROR [048mcz794](https://orcid.org/048mcz794)

Чернігів, Україна

Анотація—У зв'язку з шкідливим впливом низькочастотного магнітного поля на здоров'я людини актуальною є задача зниження індукції магнітного поля ліній електропередачі поза межами їх охоронних зон. Проведено математичне моделювання магнітного поля ліній електропередачі, що проходять паралельно, на невеликій відстані. Порівняно величину індукції магнітного поля однієї лінії та двох паралельних за різних порядків підвісу фазних проводів. Показано, що за однакового порядку підвісу фаз та однакового напрямку струмів двох ліній спостерігається значне зростання індукції магнітного поля на межі охоронної зони та поза нею, а також збільшується відстань до межі з допустимим рівнем індукції. Визначено, що за певного порядку підвісу фаз можливо досягти значного зменшення величини індукції магнітного поля, і для різних типів опор оптимальними (дають мінімальне значення індукції магнітного поля поза межею охоронної зони) будуть різні варіанти підвісу. Також показано, що за протилежного напрямку струмів ліній найкращим стає однакокий порядок підвісу.

Ключові слова — лінія електропередачі; індукція магнітного поля; охоронна зона; математичне моделювання; порядок підвісу фаз.

I. ВСТУП

Повітряні лінії електропередачі (ЛЕП) змінного струму частотою 50 Гц є одним з найбільших джерел низькочастотного магнітного поля (МП). Медико-санітарні дослідження, проведені в США та Швеції ще в кінці 20-го сторіччя [1-2], виявили, що таке МП має значний негативний вплив на здоров'я людей, а також інші біологічні об'єкти. З метою захисту населення від впливу МП з обох боків від ЛЕП встановлюються охоронні зони, що обмежують мінімальну відстань до житлових та громадських споруд. Проте поточні розміри охоронних зон не дають безпечного рівня індукції МП поза їх межами [3-7]. Тож є актуальною задачею зниження індукції МП ЛЕП поза межами охоронної зони.

Дослідження МП та методів його зниження здебільшого проводиться для однієї окремої лінії. Але деякі повітряні ЛЕП мають ділянки, на яких дві лінії

проходять паралельно одна одній на невеликій відстані (10–30 м). У цьому випадку загальне МП є сумою полів цих ліній. Це може призводити до значного збільшення індукції загального МП на межі охоронної зони та поза нею. Тому необхідно: дослідити МП двох паралельних ЛЕП, що проходять на невеликій відстані одна від одної; оцінити наскільки сильно відрізняється величина індукції такого МП від поля однієї лінії; визначити, чи необхідно це враховувати при встановленні охоронних зон навколо таких ліній.

До того ж, дві такі одноколові лінії можуть бути розглянуті як одна рознесена двоколова. Тоді можна також спробувати застосувати метод оптимізації геометрії та порядку підвісу фаз [3,10-11], який дозволяє значно знизити індукції МП на межі охоронної зони ЛЕП та поза нею.



II. ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ

На сьогоднішній день відомо та досліджено багато методів зниження індукції МП ЛЕП [3-7,8-14]. Проектно-технологічні методи, такі як зменшення відстані між дротами різних фаз [8-9], оптимізація геометрії підвісу [3,10-11] можуть бути застосовані на етапі розробки та будівництва нових повітряних ЛЕП. Технічні методи засновані на використанні пасивних та активних електромагнітних екранів [12-14] та можуть бути застосовані на працюючих ЛЕП.

Проектні методи доцільно реалізовувати при реконструкції повітряних ліній. Вони засновані на конструктивному виконанні геометрії підвісу проводів. Ці методи, як правило, не вимагають внесення в конструкцію ЛЕП додаткових функціональних елементів. В їх основі лежить мінімізація напруженості електричного та індукції МП за рахунок зменшення площі струмових контурів (зменшення відстані між проводами різних фаз), а також за рахунок зменшення векторної суми (оптимізація геометрії підвісу проводів).

Фізичне зниження МП ЛЕП при застосуванні методу симетрії досягається за рахунок забезпечення взаємної компенсації однойменних магнітних моментів (ММ) ЛЕП і підвищення інтенсивності загасання МП при збільшенні порядку симетрії системи [3]. Результати показали, що метод симетрії дозволяє зменшити індукції МП на 50-80%. Тож бачимо, що метод оптимізації геометрії підвісу проводів ЛЕП, заснований на симетруванні системи розщеплених проводів фаз, дозволяє суттєво знизити МП ЛЕП.

Аналогічний метод можна застосовувати і для багатоколових ЛЕП [10-11]. Для двоколової опори порталного типу стандартний порядок підвісу фаз – АА-ВВ-СС. Симетричне розташування АС-ВВ-СА також дозволяє значно знизити індукцію МП. Аналогічна ситуація і з опорами інших конструкцій. До того ж, даний метод може бути застосований не лише при будівництві нових ліній, а і до вже працюючих.

Дві одноколові лінії, що проходять паралельно на невеликій відстані одна від одної можна розглядати, як одну двоколову систему. Тобто в цьому випадку також можна застосувати метод симетрування і досягти зниження МП.

Метою даної роботи є зниження індукції МП двох одноколових повітряних ЛЕП 330 кВ, що проходять паралельно на невеликій відстані методом оптимізації порядку підвісу фазних проводів.

III. ОПИС ДОСЛІДЖУВАНОЇ МОДЕЛІ

Дослідження виконувалося шляхом математичного моделювання за допомогою програмного забезпечення MATLAB® згідно методики, описаної в [15-18].

Згідно даної методики при розрахунках МП ЛЕП використовуються наступні спрощення:

- розрахунки проводяться для площини, до якої проводи ЛЕП проходять нормально, на середині прольоту;
- магнітне поле за межами проводів є потенціальним і має дві просторові складові;
- навколишній простір не містить струмопровідних та феромагнітних елементів, а також додаткових джерел магнітного поля;
- проводи ЛЕП є нескінченно довгими паралельними циліндричними провідниками зі струмом, що проходять на висоті найнижчої точки їх провисання;
- струми в проводах змінюються за синусоїдальним законом, мають однакові амплітуди і фазовий зсув рівний 120°;
- струми розподілені рівномірно, поверхневий ефект не враховується;
- відносна магнітна проникність повітря $\mu = 1$;
- вплив грозозахисних тросів також не враховується.

Спочатку виконується розрахунок комплексних діючих значень горизонтальної та вертикальної складової індукції МП в точці спостереження S від кожної фази окремо. Розрахунок діючого значення індукції МП двох паралельних ЛЕП проводиться аналогічно розрахунку для однієї багатоколової. Діючі значення горизонтальної та вертикальної складових вектора індукції МП, від кожної фази P (A,B,C) в точці спостереження S обчислюються як суми складових векторів індукції МП, викликаних струмами кожної лінії [18]:

$$\begin{aligned} \dot{B}_{P,H}(x_S, y_S) &= \\ &= \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{\dot{I}_{P1}}{N_1} \cdot \sum_{n=1}^{N_1} \frac{y_S - y_P}{(x_S - x_{P1n})^2 + (y_S - y_P)^2} + \\ &+ \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{\dot{I}_{P2}}{N_2} \cdot \sum_{n=1}^{N_2} \frac{y_S - y_P}{(x_S - x_{P2n})^2 + (y_S - y_P)^2}, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \dot{B}_{P,V}(x_S, y_S) &= \\ &= \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{\dot{I}_{P1}}{N_1} \cdot \sum_{n=1}^{N_1} \frac{x_S - x_{P1n}}{(x_S - x_{P1n})^2 + (y_S - y_{P1})^2} + \\ &+ \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{\dot{I}_{P2}}{N_2} \cdot \sum_{n=1}^{N_2} \frac{x_S - x_{P2n}}{(x_S - x_{P2n})^2 + (y_S - y_{P2})^2}, \end{aligned} \quad (2)$$

де $\dot{B}_{P,H}(x_S, y_S)$, $\dot{B}_{P,V}(x_S, y_S)$ – комплексні значення горизонтальної та вертикальної складових вектора індукції МП фази P (A,B,C); \dot{I}_{P1} , \dot{I}_{P2} – комплексне значення струму фази P (A,B,C) першої та другої лінії відповідно, A; N_1 , N_2 – кількість проводів в розщепленні кожної з фаз першої та другої лінії відповідно; x_S , y_S – горизонтальна та вертикальна координати точки спостереження S в площині, в якій проводиться розрахунок, м; x_{P1n} , x_{P2n} – горизонтальні координати



точки перетину n -им проводом розщепленої фази $P(A, B, C)$ першої та другої лінії відповідно площини, в якій проводиться розрахунок, m ; y_p – вертикальна координата точки перетину фазним проводом $P(A, B, C)$ площини, в якій проводиться розрахунок, m .

Діючі значення горизонтальної та вертикальної складових вектора індукції МП у комплексній формі в точці спостереження S від всіх фаз обчислюють за формулами [18]:

$$\begin{aligned} \dot{B}_H(x_S, y_S) &= \\ &= \dot{B}_{A,H}(x_S, y_S) + \dot{B}_{B,H}(x_S, y_S) + \\ &+ \dot{B}_{C,H}(x_S, y_S), \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \dot{B}_V(x_S, y_S) &= \\ &= \dot{B}_{A,V}(x_S, y_S) + \dot{B}_{B,V}(x_S, y_S) + \\ &+ \dot{B}_{C,V}(x_S, y_S), \end{aligned} \quad (4)$$

Діюче значення індукції МП ЛЕП в точці спостереження S може бути обчислене за теоремою Піфагора:

$$B(x_S, y_S) = \sqrt{|\dot{B}_H(x_S, y_S)|^2 + |\dot{B}_V(x_S, y_S)|^2}. \quad (5)$$

Для моделювання було обрано два типи опор: ПБ330-7 (портального типу) та П330-3 (трикутного типу). Ці типи опор досить розповсюджені на території України та мають різну геометрію підвісу проводів. Було розглянуто два випадки: обидві лінії з опорами ПБ330-7; обидві лінії з опорами П330-3. Схеми розташування проводів для випадків з однаковими опорами наведені на рис. 1. Початок координат встановлено на рівні землі під центром правої лінії, адже відносно її МП проводився подальший аналіз і саме ця лінія вважається першою, а лінія розташована ліворуч — другою. Координати проводів наведені в таблиці 1.

Відстань D залишаємо змінною для можливості дослідження впливу відстані між лініями на МП. Мінімальна відстань між крайніми проводами двох паралельних ЛЕП 330 кВ, згідно пункту 2.5.189 ПУЕ [19] складає 10 м.

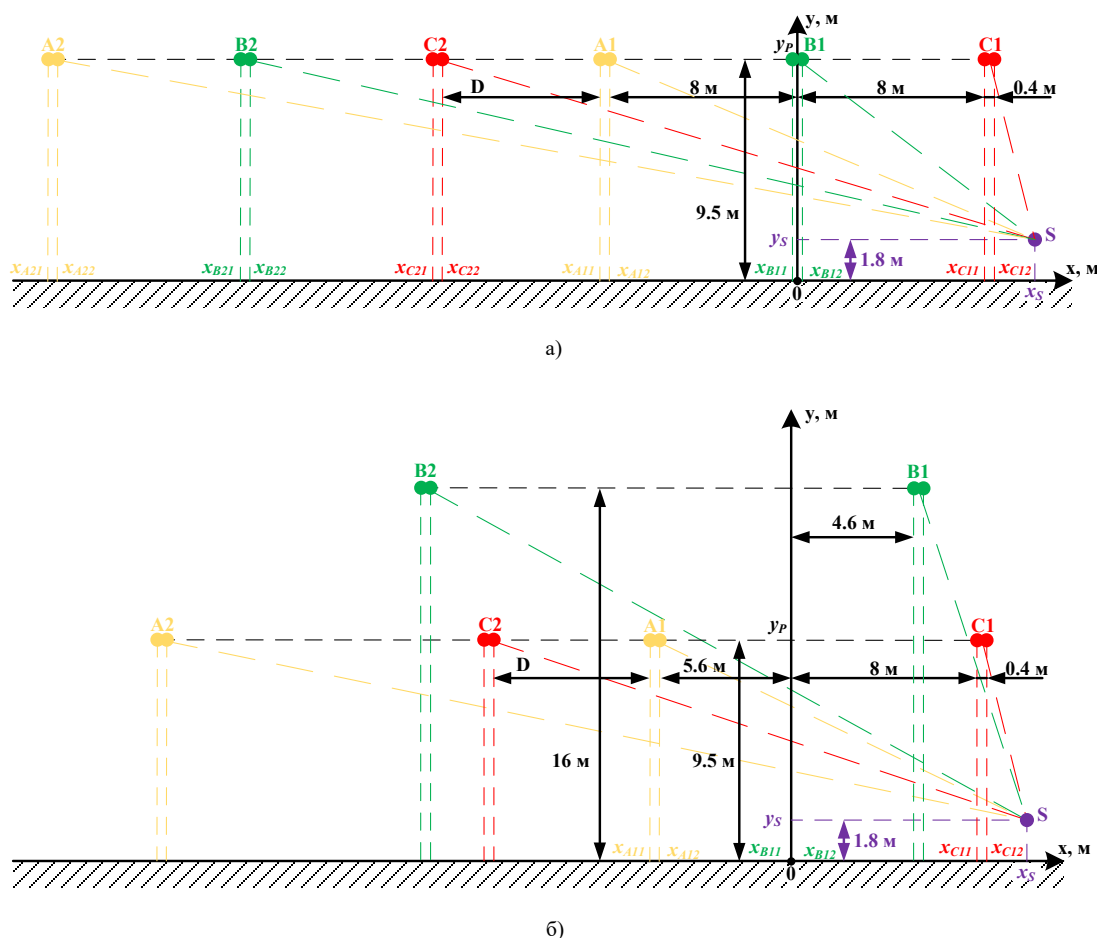


Рисунок 1 – Схема розташування системи координат та проводів ліній з опорами ПБ330-7 (а) та П330-3 (б)



ТАБЛИЦЯ 1 КООРДИНАТИ ФАЗНИХ ПРОВОДІВ

Координата	Значення	
	Обидві лінії з опорами ПБ330-7	Обидві лінії з опорами П330-3
X _{A11}	-8.4 м	-6 м
X _{A12}	-8 м	-5.6 м
X _{B11}	-0.2 м	8.1 м
X _{B12}	0.2 м	8.5 м
X _{C11}	8 м	4.6 м
X _{C12}	8.4 м	5 м
X _{A21}	(-24.8 - D) м	(-20.1 - D) м
X _{A22}	(-24.4 - D) м	(-19.7 - D) м
X _{B21}	(-16.6 - D) м	(-6 - D) м
X _{B22}	(-16.2 - D) м	(-5.6 - D) м
X _{C21}	(-8.4 - D) м	(-9.7 - D) м
X _{C22}	(-8 - D) м	(-9.3 - D) м
Y _{A1}	9.5 м	9.5 м
Y _{B1}		16 м
Y _{C1}		9.5 м
Y _{A2}		9.5 м
Y _{B2}		16 м
Y _{C2}		16 м

Нормування індукції МП проводиться на висоті 1.8 м. Тому вертикальна координата точки спостереження S фіксована – $y_S = 1.8$ м. Горизонтальна координата x_S є змінною. Це дає можливість побудови графіку залежності індукції МП від положення точки спостереження. Горизонтальна координата межі охоронної зони для ліній з опорами ПБ330-7 буде складати 38.4 м, для ліній з опорами П330-3 – 38.5 м. Значення фазного струму прийнято 500 А, типова величина струму для лінії 330 кВ.

IV. РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ

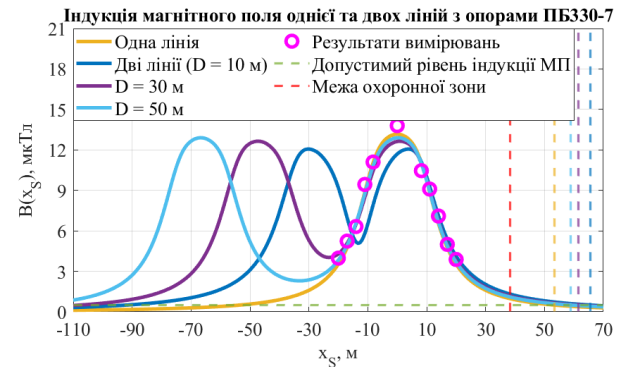
На рис. 2а-б наведено графіки зміни діючого значення індукції МП у просторі на висоті 1.8 м над землею за наявності однієї лінії та двох паралельних за різних значень відстані між ними (D) при однаковій величині фазного струму обох ліній (500 А) та однакового порядку підвісу фазних проводів (ABC-ABC).

З графіків бачимо, що наявність другої лінії в значній мірі змінює картину МП. Під лініями спостерігається зниження індукції МП у зв'язку з взаємною компенсацією. Але на відстані від ліній на межі охоронної зони та поза нею спостерігається значне підвищення індукції МП (десять відсотків). В результаті цього за заданого фазного струму (500 А) відстань до межі зони з допустимим рівнем індукції МП (0.5 мкТл), яка і за наявності однієї лінії виходить за межі охоронної зони більше ніж на 10 м, віддаляється ще на 15 м та більше за мінімальної допустимої відстані між лініями.

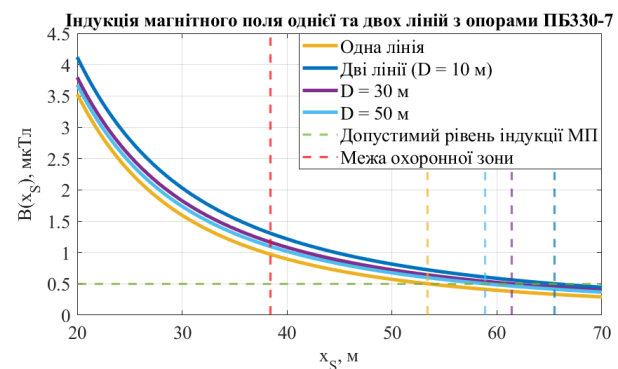
Для перевірки результатів моделювання також було проведено експериментальні вимірювання індукції МП ліній 330 кВ «Чернігівська-Ніжинська» та «Чернігівська-Гомель». Ці дві лінії містять опори типу ПБ330-7 та на досить довгій ділянці проходять паралельно одна одній на відстані 50 м. Вимірювання виконувалися з використанням тривісного магнітометра Tenmars TM-192D. Різниця між результатами

моделювання та вимірювань склала не більше 10%. Вона пояснюється по-перше похибкою вимірювального приладу, а по-друге неможливістю максимально точного вимірювання координат точки вимірювань.

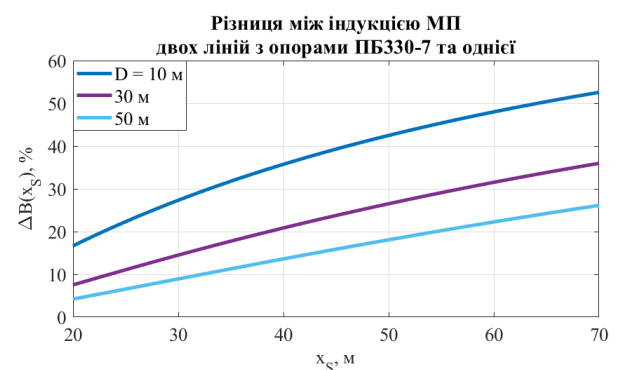
Для відносного порівняння також було отримано графіки різниці між індукцією МП в точці спостереження S за дії першої лінії та обох ліній (рис. 2в).



а)



б)



в)

Рисунок 2 – Діюче значення індукції МП в широкій області (а), поблизу межі охоронної зони (б) та різниця між індукцією МП двох ліній та однієї (в) за різних відстаней між лініями з опорами ПБ330-7



$$\Delta B(x_S) = \frac{(B_{12}(x_S) - B_1(x_S))}{B_1(x_S)} \cdot 100\%, \quad (6)$$

де $\Delta B(x_S)$ – різниця між індукцією МП в точці спостереження S за дії двох ліній та однієї, $B_1(x_S)$ – індукція МП в точці спостереження S за дії тільки першої лінії, $B_{12}(x_S)$ – індукція МП в точці спостереження S за дії обох ліній.

Як можна побачити, наявність другої лінії призводить до збільшення індукції МП на десятки відсотків, навіть за не мінімальної допустимої відстані між лініями.

Таким чином, можна однозначно стверджувати, що у випадку, коли дві ЛЕП проходять паралельно на невеликій відстані, це необхідно враховувати як при проведенні досліджень методів зниження індукції МП, так і при встановленні охоронних зон навколо таких ліній.

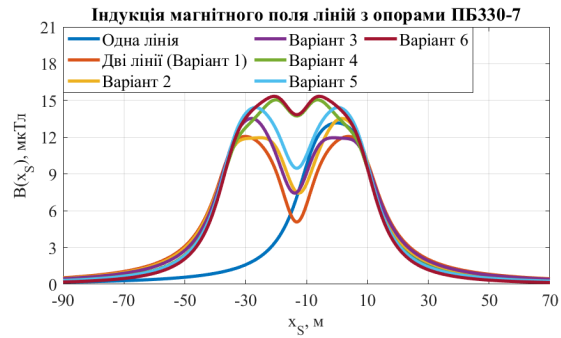
Розглянемо як на картину МП впливає порядок підвісу фазних проводів. Кожна лінія має по три фази. Можна отримати по шість різних порядків підвісу фаз для кожної лінії. Загалом отримуємо 36 різних комбінацій підвісу. Проте моделювання показало, що можна отримати лише шість різних графіків зміни індукції МП. В табл. 2 наведено порядки фаз, які відповідають кожному з 6 варіантів.

Такий розподіл можна пояснити тим, що в кожному варіанті зберігається певна закономірність порядку підвісу фаз (варіант 1 – однаковий порядок підвісу на обох лініях, варіант 6 – дзеркальний порядок), завдяки чому картина МП виходить однаковою.

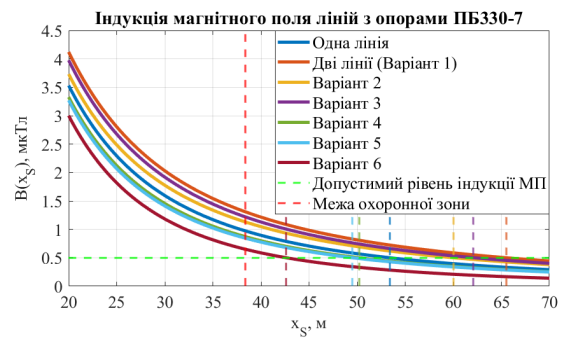
На рис. 3а-б зображено графіки зміни діючого значення індукції МП у просторі на висоті 1.8 м над землею за фіксованої відстані між лініями (10 м), фіксованого струму обох ліній (500 А), однакового напрямку протікання струмів та різних варіантах порядку фазних проводів.

ТАБЛИЦЯ 2 ВАРІАНТИ ПОРЯДКУ ПІДВІСУ ФАЗ

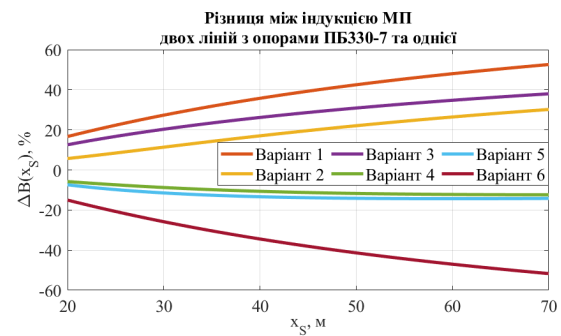
Варіант	Порядки підвісу фаз ліній (лівої-правої)
1	ABC-ABC, ACB-ACB, BAC-BAC, BCA-BCA, CAB-CAB, CBA-CBA
2	ACB-ABC, ABC-ACB, BCA-BAC, BAC-BCA, CBA-CAB, CAB-CBA
3	BAC-ABC, CAB-ACB, ABC-BAC, CBA-BCA, ACB-CAB, BCA-CBA
4	BCA-ABC, CBA-ACB, ACB-BAC, CAB-BCA, ABC-CAB, BAC-CBA
5	CAB-ABC, BAC-ACB, CBA-BAC, ABC-BCA, BCA-CAB, ACB-CBA
6	CBA-ABC, BCA-ACB, CAB-BAC, ACB-BCA, BAC-CAB, ABC-CBA



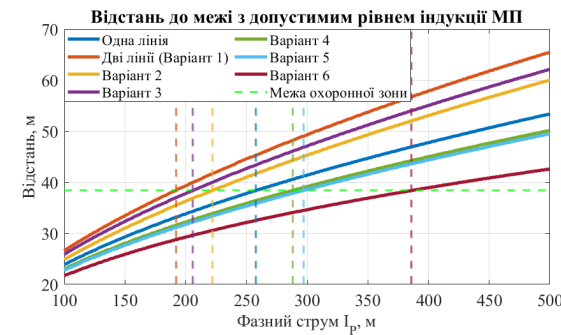
а)



б)



в)



г)

Рисунок 3 – Діюче значення індукції МП в широкій області (а), поблизу межі охоронної зони (б), різниця між індукцією МП двох ліній та однієї (в) та залежність відстані до межі з допустимим рівнем індукції МП від фазного струму (г) за різних варіантів порядку підвісу фаз та однакового напрямку струмів ліній з опорамі ПБ330-7



З графіків та таблиці бачимо, що за однакової послідовності розташування фаз на обох лініях (варіант 1) величина індукції МП під лініями є найменшою, але найповільніше згасає на віддаленні від них. За дзеркального розташування фаз (варіант 6) величина індукції МП під лініями є найбільшою, але на деякій відстані від ліній (наближаючись до межі охоронної зони) згасає найшвидше. Інші варіанти аналогічно призводять або до збільшення індукції МП під лініями та зменшення на відстані від них, або до зменшення під лініями, але збільшення на відстані від них.

З рис. 3б також бачимо, що за значення фазного струму 500 А та однакового напрямку струмів, індукція МП однієї лінії досягає безпечного рівня на відстані 54 м від центру лінії, що на 15 м далі за межу охоронної зони. Для двох ліній з однаковою послідовністю розташування фаз ця відстань є ще більшою: 65.5 м від центру лінії, 27 м від межі охоронної зони. Але якщо використати оптимальну послідовність розташування фаз для двох ліній, то дану відстань можна значно зменшити, навіть порівняно з результатами для однієї лінії: 43 м від центру лінії, 4.5 м від межі охоронної зони. Тож бачимо, що за струму 500 А та однакового напрямку струмів оптимальна послідовність розташування фаз майже дозволяє забезпечити відповідність значення індукції МП на межі охоронної зони допустимому значенню.

Як можна побачити з рис. 3в, дзеркальне розташування фаз дозволяє зменшити індукцію МП двох ліній на десятки відсотків, навіть порівняно з МП однієї лінії. А порівняно з випадком однакової послідовності фаз, ефект ще більший.

На рис. 3г показано графік, який відображає залежність відстані до межі зони з допустимим рівнем індукції магнітного поля 0.5 мкТл від величини фазного струму за однакового напрямку струмів.

З даних графіків бачимо, що для однієї лінії значення фазного струму, за якого індукція магнітного поля спадає до безпечного рівня в межах охоронної зони складає 258 А, що є досить малим значенням для лінії 330 кВ. За дії двох ліній з однаковим порядком підвісу фаз це значення складає 192 А, з дзеркальним – 386 А. Тобто бачимо, що у випадку двох ліній використання оптимального дзеркального порядку підвісу фаз дозволяє в 2 рази збільшити значення струму, за якого індукція МП не перевищує безпечного значення поза межею охоронної зони.

Дослідження показали, що ефективність різних комбінацій послідовності розташування фаз залежить від напрямків протікання струму двох ліній. Наведені вище результати були отримані за однакового напрямку струму обох ліній.

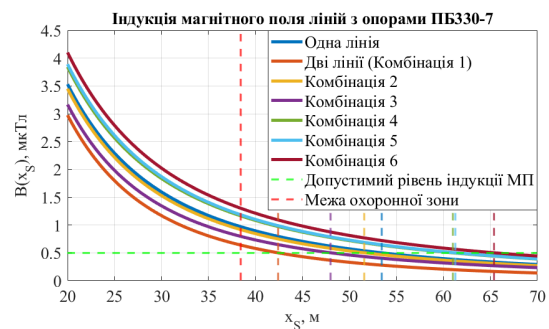
На рис. 4 наведено графіки залежності діючого значення індукції МП від горизонтальної координати точки спостереження S (рис. 4а) та різниці між індукцією МП в точці спостереження S за дії першої лінії та обох ліній (рис. 4б) при різних варіантах порядку

підвісу фаз та протилежно направлених струмах ліній.

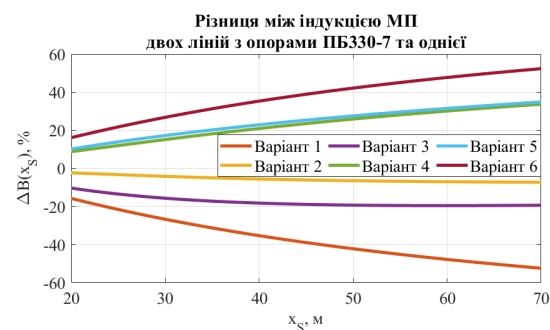
Як видно з графіків, за протилежного напрямку струмів ефективність різних варіантів порядку підвісу фаз змінюється навпаки: за однакового порядку підвісу фаз (варіант 1) спостерігається максимальне зменшення індукції МП, а за дзеркального підвісу фаз (варіант 6) – максимальне збільшення.

Тож можна зробити висновок, що розташування двох повітряних ЛЕП паралельно на невеликій відстані можна використовувати для зменшення індукції МП на межі охоронної зони та поза нею. Для цього лише необхідно розташовувати фази не у стандартному або випадковому порядку, а у певних комбінаціях, враховуючи переважні напрямки струмів. Такий метод не потребує великих фінансових затрат та дозволяє захистити населення, що проживає поблизу ЛЕП, від впливу МП без встановлення дорогих електромагнітних екранів.

Оптимальним будемо називати той варіант порядку підвісу фаз (табл. 2), за якого досягається максимальне зниження індукції МП двох паралельних ЛЕП на межі їх охоронної зони та поза нею. Якщо переважний напрямок струмів обох ліній однаковий, то оптимальним є дзеркальний порядок підвісу фаз (СВА-АВС, АВС-СВА і т.д.). Якщо переважний напрямок струмів ліній протилежний, то найкращим є однаковий порядок підвісу фаз (АВС-АВС і т.д.).



а)



б)

Рисунок 4 – Діюче значення індукції МП поблизу межі охоронної зони (а) та різниця між індукцією МП двох ліній та однієї (б) за різних варіантів порядку підвісу фаз та протилежного напрямку струмів ліній з опорамі ПБ330-7



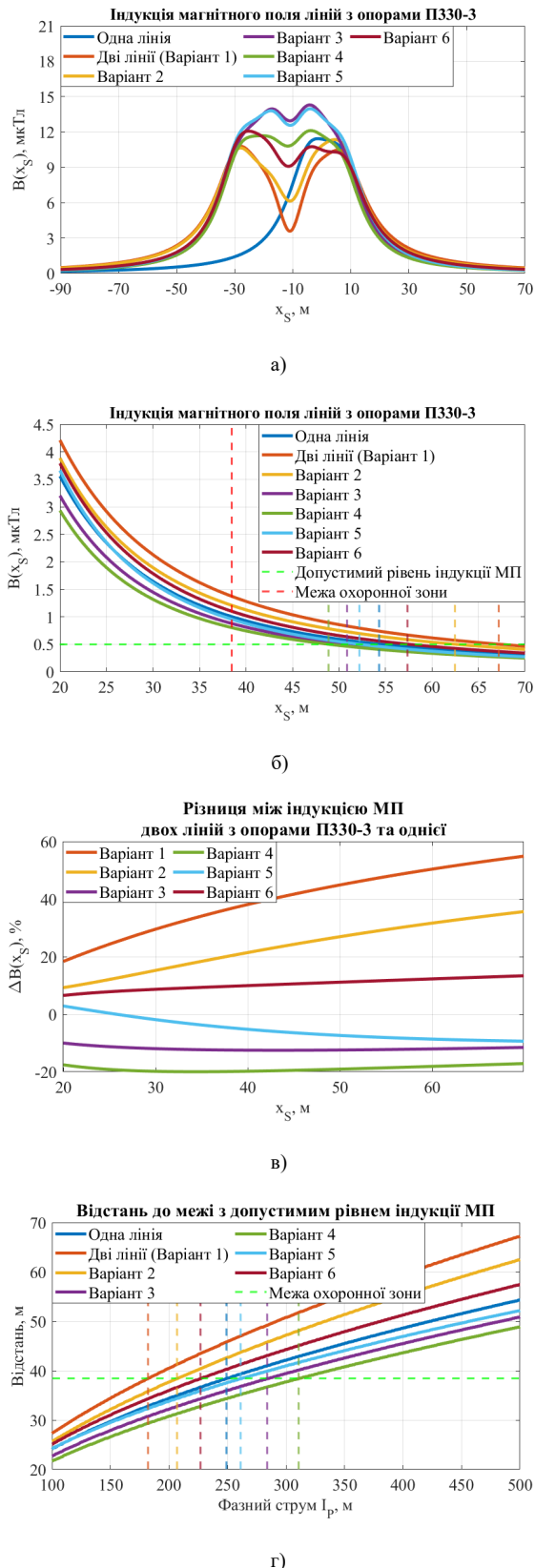


Рисунок 5 – Діюче значення індукції МП в широкій області (а), поблизу межі охоронної зони (б), різниця між індукцією МП двох ліній та однієї (в) та залежність відстані до межі з допустимим рівнем індукції МП від фазного струму (г) за різних варіантів порядку підвісу фаз та однакового напрямку струмів ліній з опорами П330-3

Якщо взаємний напрямок струмів часто змінюється, то оптимальними є варіанти 2 (АСВ-АВС), 4 (ВСА-АВС) та 5 (САВ-АВС). Вони не дають максимального зниження індукції МП, але за зміни напрямку струму за цих послідовностей не спостерігається максимального зростання індукції.

Також було досліджено, як зміна порядку підвісу фаз впливає на картину МП ліній з іншими опорами – П330-3. На рис. 5а-б зображено графіки зміни діючого значення індукції МП в просторі на висоті 1.8 м над землею за фіксованої відстані між лініями (10 м), фіксованого струму обох ліній (500 А), однакового напрямку протікання струмів та різних варіантах порядку фазних проводів.

З графіків бачимо, що як і в попередньому випадку однаковий порядок підвісу фаз (варіант 1) дає найбільше зниження індукції МП під лініями та зростання на відстані від ліній. Але для ліній з опорами П330-3 найбільше зниження індукції МП поблизу межі охоронної зони досягається вже не при дзеркальному розташуванні фаз, а при варіанті 4, адже опора вже не є симетричною. Також з рис. 5в бачимо, що на відміну від ліній з опорами ПБ330-7, зниження індукції МП від найефективнішого порядку підвісу фаз є значно меншим та не перевищує 20%. Але зменшення індукції все ж спостерігається. Однакова послідовність фаз, в той же час, призводить до значного збільшення індукції МП. При протилежному напрямку протікання струмів, як і для ліній з опорами ПБ330-7, ефективність варіантів порядку підвісу змінюється навпаки – найефективнішим стає однаковий порядок.

Також з рис. 5г можна побачити, що для однієї лінії з опорами П330-3, індукція магнітного поля однієї лінії досягає безпечного рівня майже на тій же відстані, що і для опор ПБ330-7 – 54,5 м від центру лінії, 15,5 м від межі охоронної зони. Для двох ліній з однаковим порядком підвісу фаз ця відстань складає 67 м від центру лінії та 29 м від межі охоронної зони. Але для оптимальної послідовності розташування фаз зменшення цієї відстані є не таким значним, порівняно з результатом для опор ПБ330-7: 49 м від центру лінії, 10,5 м від межі охоронної зони.

З рис. 5г видно, що для ліній з опорами П330-3, значення струмів, за яких індукція магнітного поля спадає до безпечного рівня в межах охоронної зони для випадків роботи однієї лінії (248 А) та двох ліній з однаковою послідовністю розташування фаз (180 А), приблизно рівні, але все ж трохи менші, порівняно з результатами для ліній з опорами ПБ330-7. За дії двох ліній з оптимальною послідовністю розташування фаз це значення значно менше та складає 310 А. Тобто бачимо, що у випадку двох ліній з опорами П330-3 використання оптимальної послідовності розташування фаз є менш ефективним, ніж у випадку ліній з опорами ПБ330-7, але воно все ж також дозволяє збільшити значення струму, за якого індукція магнітного поля поза межею охорон-



ної зони не перевищує безпечного значення, порівняно як з варіантом однакової послідовності розташування фаз, так і випадком роботи лише однієї лінії.

Для ліній виконаних опорами ПЗ30-3, якщо переважний напрямок струмів однаковий, найефективнішим є варіант 4 (BCA-ABC). Якщо переважний напрямок струмів протилежний, то як і для опор ПБ330-7, найефективнішим є однаковий порядок підвісу фаз (ABC-ABC). Якщо взаємний напрямок струму часто змінюється, то оптимальним є варіант 6 (CBA-ABC). Ця послідовність не дає зменшення індукції магнітного поля, але і не призводить до зростання індукції при зміні напрямку струму.

ВИСНОВКИ

Проведено дослідження МП двох ЛЕП 330 кВ, що проходять паралельно на невеликій відстані одна від одної.

Показано, що величина індукції МП двох ліній значно відрізняється від значення для однієї лінії як в зоні під лініями, так і за межами охоронної зони.

Визначено, що однаковий порядок підвісу фаз обох ліній (ABC-ABC) за однакового напрямку струмів дає найбільше зростання індукції МП на межі охоронної зони (більше 30%) та поза нею (більше 50%). Оптимальний порядок підвісу фаз (дає максимальне зниження індукції МП на межі охоронної зони та поза нею) залежить від типу опор, якими виконані лінії: для ліній з опорами ПБ330-7 оптимальним є дзеркальний порядок (CBA-ABC); для ліній з опорами ПЗ30-3 – несиметричний порядок (BCA-ABC). За протилежного напрямку струмів оптимальним стає однаковий порядок підвісу фаз (ABC-ABC) для обох типів опор.

Використання оптимального порядку підвісу фазних проводів дозволяє зменшити величину індукції МП на межі охоронної зони та поза нею (на десятки відсотків), зменшити відстань до межі зони з допустимим рівнем індукції МП (0,5 мкТл) (більше ніж на 10 м) та збільшити величину фазного струму ліній, за якого індукція МП досягає допустимого рівня в межах охоронної зони (більше ніж на 100 А).

ВНЕСОК АВТОРІВ

Димерець Андрій Віталійович — здійснював написання тексту статті, проводив математичне моделювання та обробку результатів моделювання.

Ревко Дмитро Анатолійович — виконував написання коду для математичного моделювання та проводив моделювання і обробку результатів моделювання.

Красножон Олексій Васильович — проводив математичне моделювання та обробку результатів моделювання.

Красножон Андрій Васильович — здійснював написання тексту статті та обробку результатів моделювання.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] A. Giorgi, R. Conti, R. Rendina, L. Sartore and E. Sena, "Technical Solutions To Reduce 50 Hz Magnetic Fields from Power Lines," in *Proceedings of Power Tech Conference IEEE'2003*, 23-26 June, 2003, Bologna (Italy), 2003. DOI: [10.1109/PTC.2003.1304685](https://doi.org/10.1109/PTC.2003.1304685)
- [2] M. Feychting, B. Floderus and A. Ahlbom, "Parental occupational exposure to magnetic fields and childhood," *Cancer Causes and Control*, vol. 11, no. 2, pp. 151-156, 2000. DOI: [10.1023/A:1008922016813](https://doi.org/10.1023/A:1008922016813)
- [3] V. Yu. Rozov, S. Yu. Reutskiy, D. Ye. Pelevin, O. Yu. Pyluginina, "Magnitnoe pole liniy elektroperedachi i metody ego snizheniya do bezopasnogo urovnya [The magnetic field of power transmission lines and the methods of its mitigation to a safe level]," *Tekhnichna elektrodynamika*, no. 2, pp. 3-9, 2013. URL: http://techned.org.ua/2012_2/st8.pdf
- [4] D.Ye. Pelevin, "Metody snizheniya magnitnogo polya vozdushnyh liniy elektroperedachi za predelami ohrannyh zon [The methods of reducing of the magnetic fields of overhead power lines outside security zones]," *Tekhnichna elektrodynamika*, no. 5, pp. 14-16, 2014. URL: http://previous.techned.org.ua/2014_5/st4.pdf
- [5] J. Burnett, P. Du Yaping, "Mitigation of extremely low frequency magnetic fields from electrical installations in high-rise buildings," *Building and Environment*, vol. 37, no 8-9, pp. 769-775, 2002. DOI: [10.1016/S0360-1323\(02\)00043-4](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(02)00043-4).
- [6] D. Bavastro, A. Canova, F. Freschi, L. Giaccone, M. Manca, "Magnetic field mitigation at power frequency: design principles and case studies," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 51, no 3, pp. 2009-2016, 2015. DOI: [10.1109/TIA.2014.2369813](https://doi.org/10.1109/TIA.2014.2369813)
- [7] A. O. Pavlushko, A. V. Dymerecs, A. V. Krasnozhan, "Matematychnе modeliuвання parametriv elektromagnitnoho polia diiuchoi PL 330 kV [Mathematical modeling of electromagnetic field parameters of the overhead power line 330 kV]," in *Vseukrainska naukovo-praktychna konferentsiia «Novitni Tekhnologii Suchasnoho Suspilstva» NTSS-2019*, Chernihiv, Ukraine, 2019.
- [8] M. Sh. Misrihanov, A. Yu. Tokarskiy, "Preimushstva i nedostatki prostykh kompaktnykh vozdushnyh liniy elektroperedachi [Advantages and disadvantages simple compact overhead power lines]," *Povyshenie effektivnosti raboty energosistem*, pp. 204-223, 2003.
- [9] M. Sh. Misrihanov, A. Yu. Tokarskiy, "Upravlyayemye kompaktnye linii elektroperedachi [Managed compact power lines]," *Trudy IGEU*, no. 6, pp. 238-248, 2003.
- [10] Ya. Wang, S. Meng, B. Tang, "Study on Type Design of Multicircuit Transmission Line Tower," *College of Electrical engineering & Renewable Energy*, pp. 900-903, 2012.
- [11] O. V. Lazareva, A. V. Krasnozhan, "Analiz prostorovyh skladovyh magnitnogo polia odnokolovoi linii elektroperedachi naprugoju 330 kV [Analysis of the magnetic field spatial components of a single-circuit power line with a voltage of 330 kV]," in *Vseukrainska naukovo-praktychna konferentsiia studentiv, aspirantiv ta molodyh vchenykh*, Chernihiv, Ukraine, 2016.
- [12] D. Ye. Pelevin, "Ekranirovanie magnitnogo polya promyshlennoj chastoty stenami zhilyh domov [Screening magnetic fields of the power frequency by the walls of houses]," *Elektrotehnika i Elektromekhanika*, no. 4, pp. 53-55, 2015. DOI: [10.20998/2074-272X.2015.4.10](https://doi.org/10.20998/2074-272X.2015.4.10)
- [13] S. Celozzi, F. Garzia, "Active shielding for power-frequency magnetic field reduction using genetic algorithms optimization," *IEE Proceedings – Science, Measurement and Technology*, vol. 151, no. 1, pp. 2-7, 2004.



DOI: [10.1049/ip-smt:20040002](https://doi.org/10.1049/ip-smt:20040002)

- [14] A. V. Dymerecs, A. V. Krasnozhan, O. V. Krasnozhan, "Modeliuvannia gratchastoho bahatosharovoho ekranu dlia znyzhennia mahnitnoho polia linii elektroperedachi [Simulation of a grid multi-layer shield to reduce the magnetic field of power lines]," *Mikrosystemy, Elektronika ta Akustyka*, vol. 25, no. 3, pp. 5-10, 2020.

DOI: [10.20535/2523-4455.me.208320](https://doi.org/10.20535/2523-4455.me.208320)

- [15] G. Filippopoulos, D.Tsanakas, "Analytical calculation of the magnetic field produced by electric power lines," *IEEE Transactions on power delivery*, vol. 20, no. 2, pp. 1474-1482, 2005. DOI: [10.1109/TPWRD.2004.839184](https://doi.org/10.1109/TPWRD.2004.839184)
- [16] Yu. Dumanskyi, A. Kvytsynskyi, I. Maistrenko, D. Pielievin, O. Pyliuhina, S. Reutskyi, V. Rozov, "Rozrakhunok elektrychnoho i mahnitnoho poliv linii elektroperedavannia. Metodyka [Calculation of electric and magnetic fields of power

transmission lines. Methodology]," *Minenerhovuhillia Ukrainy*, P. 52, 2015.

- [17] V.Yu. Rozov, S.Yu. Reutskiy, O.Yu. Pyliugina, "Metod raschyota magnitnogo polya tryohfaznyh linii elektroperedachi [Method for calculating the magnetic field of three-phase power lines]," *Tekhnichna elektrodynamika*, no. 5, pp. 11-13, 2014. URL: http://previous.techned.org.ua/2014_5/st3.pdf
- [18] "SOU-N EE 20.1179: Rozrakhunok elektrychnoho i mahnitnoho poliv linii elektroperedavannia. Metodyka [Calculation of electric and magnetic fields of power transmission lines. Methodology], " P. 33, 2008.
- [19] "Pravyła ulashtuvannia elektroustanovok [Rules of arrangement of electrical installations], " *Minenerhovuhillia Ukrainy*, P. 617, 2017.

Надійшла до редакції 10 березня 2021 р.

Прийнята до друку 26 березня 2021 р.



Reduction of Magnetic Flux Density of Parallel Overhead Power Lines by Optimization of Phase Wires Hanging Order

A. V. Dymerecs, ORCID [0000-0002-7617-5291](https://orcid.org/0000-0002-7617-5291)

D. A. Revko, ORCID [0000-0002-8913-9222](https://orcid.org/0000-0002-8913-9222)

Department of Electronics, Automation, Robotics and Mechatronics, inel.stu.cn.ua

O. V. Krasnozhon, PhD, ORCID [0000-0003-2500-254X](https://orcid.org/0000-0003-2500-254X)

Department of Radio Engineering and Embedded Systems, rtes.stu.cn.ua

A. V. Krasnozhon, PhD Assoc.Prof., ORCID [0000-0002-6215-7535](https://orcid.org/0000-0002-6215-7535)

Department of Electrical Engineering and Information and Measurement Technologies, esim.stu.cn.ua

National University “Chernihiv Polytechnic”, ROR [048mcz794](https://ror.org/048mcz794)

Chernihiv, Ukraine

Abstract—Overhead power lines are one of the largest sources of the low-frequency magnetic fields. Such magnetic fields occur the harmful effects on human health and other biological objects. The current size of the security zones doesn't provide a safe level of the magnetic flux density outside them. Therefore, the task of reducing the magnetic flux density value of the overhead power lines outside the security zone is urgent.

Some overhead power lines have sections where two lines pass parallel to each other at a short distance. For such lines the method of phase wires hanging order optimization can be applied.

For efficiency comparison of different hanging orders was chose two types of electricity pylons: portal (PB330-7) and triangular (P330-3). The cases both lines done by the same pylons were investigated. Analyze of different hanging orders efficiency was performed by mathematical simulation using MATLAB software. The magnetic flux density computation inside the security zone and outside it was done by a specialized simplified methodology of power lines electric and magnetic fields calculation.

It is shown that in case of identical phase wires hanging order and the same currents direction of two parallel lines there is a significant increasing of magnetic flux density value at the border of the security zone and outside it for both types of the electricity pylons. It is determined that with a certain hanging order it is possible to achieve a significant reduction of the magnetic flux density value.

For lines with electricity pylons of a portal type (PB330-7) the most efficient is the mirror order. It allows to obtain a decreasing of magnetic flux density more than 30 percent at the security zone border and more than 50 percent outside it. For pylons of a triangle type (P330-3) the most efficient is the nonsymmetrical order. It provides the decreasing of magnetic flux density up to 20 percent. In case of opposite currents direction, the most efficient is the same hanging order for both types of electricity pylons.

It is shown that optimal phase wires hanging order allows to decrease the magnetic flux density value outside the security zone border, to reduce the distance to border of the area with safe level of the magnetic flux density, to increase the phase current value at which the magnetic flux density value reaches the safe level within the security zone.

Keywords — power line; magnetic flux density; security zone; mathematical simulation; phase wires hanging order.

