

ХЕРСОНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
(повне найменування вищого навчального закладу)

ФАКУЛЬТЕТ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ТРАНСПОРТУ
(назва факультету)

КАФЕДРА ЕНЕРГЕТИКИ, ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ І ФІЗИКИ
(повна назва кафедри)

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи
першого (бакалаврського) рівня вищої освіти
(рівень вищої освіти)

на тему Моделювання та дослідження електромагнітних полів
високовольтних ліній електропередачі

Виконав: студент 3 курсу, групи ЗЕЛс3
спеціальності 141 Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка
(код і назва спеціальності)

освітньо- Електротехніка,
професійної та електротехнології
програми (назва ОПП)

Денисенко Д.О.
(прізвище та ініціали)

Керівник Степанчиков Д.М.
(прізвище та ініціали)

Рецензент Мєшков Ю.Є.
(прізвище та ініціали)

Хмельницький - 2026 р.

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота на тему: “Моделювання та дослідження електромагнітних полів високовольтних ліній електропередачі” включає в собі пояснювальну записку. Пояснювальна записка містить 63 сторінки формату А4, 19 рисунків, 2 таблиці, 26 використаних джерел, 14 слайдів електронної презентації, 5 додатків.

Ключові слова: високовольтні лінії електропередачі, електромагнітне поле, напруженість, магнітна індукція, циліндричні провідники, математичне моделювання, санітарно-захисна зона.

Об’єктом дослідження є процеси формування та розповсюдження електромагнітних полів навколо високовольтних ліній електропередачі.

Мета роботи: проведення комплексного аналізу та моделювання розподілу електромагнітних полів ліній електропередачі високої напруги для оцінки їх впливу на прилеглу територію та дослідження способів зниження рівня електромагнітного випромінювання.

Результатом роботи є розроблені алгоритм чисельного розрахунку та комплекс математичних моделей, які дозволяють з високою точністю розраховувати напруженість електричного та магнітного полів для ліній електропередачі різних класів напруги з урахуванням їх конфігурації та оцінювати розміри санітарно-захисних зон.

В роботі розроблено методику розрахунку та моделювання електромагнітного поля повітряних ліній електропередачі. Проведено порівняльний аналіз традиційних конструкцій повітряних ліній та сучасних технічних рішень, що підтверджує можливість зниження рівня електромагнітного впливу на навколишнє середовище. На підставі отриманих моделей та програмних кодів створено можливість для проведення відповідних досліджень реальних ліній електропередачі.

ЗМІСТ

	стор.
Скорочення та умовні позначки	5
Вступ	6
1 ОГЛЯДОВА ЧАСТИНА	8
1.1 Повітряні лінії електропередачі високої напруги	8
1.1.1 Класифікація повітряних ліній електропередачі високої напруги	8
1.1.2 Будова повітряних ліній електропередачі високої напруги	9
1.1.3 Санітарна зона ліній електропередачі високої напруги	12
1.2 Електромагнітні поля високовольтних ліній електропередачі	14
1.2.1 Основні закони для опису просторового розподілу електромагнітного поля	14
1.2.2 Зображення електричних і магнітних полів	17
1.2.3 Принцип дзеркального відображення для електричних полів	19
1.3 Висновки до оглядової частини	23
2. МЕТОДИЧНА ЧАСТИНА	24
2.1 Алгоритм чисельного розрахунку характеристик електромагнітного поля повітряних ліній електропередачі	24
2.1.1 Математична модель системи циліндричних провідників над провідною поверхнею землі	24
2.1.2 Формування матриці потенційних коефіцієнтів	28
2.2 Програмна реалізація моделі (на прикладі MATLAB/Maple)	31
2.2.1 Опис структури створеного програмного коду для розрахунку характеристик електромагнітного поля	31
2.2.2 Врахування провисання дротів та неоднорідності рельєфу	34

2.3	Методика візуалізації силових характеристик полів	35
2.3.1	Побудова графіків розподілу електричної напруженості та магнітної індукції на рівні зросту людини	36
2.3.2	Створення 2D-ізоліній та 3D-поверхонь розподілу силових характеристик полів	37
2.4	Висновки до методичної частини	38
3	ДОСЛІДНИЦЬКА ЧАСТИНА	41
3.1	Аналіз впливу геометрії підвісу дротів на ширину санітарної зони захисту	41
3.1.1	Порівняння рівнів поля для одноколових та двоколових ліній	41
3.1.2	Залежність напруженості та індукції поля від висоти підвісу найнижчого дроту над землею	44
3.2	Дослідження методів мінімізації електромагнітних полів повітряних ліній електропередачі	45
3.2.1	Оптимізація фазування двоколових повітряних ліній	45
3.2.2	Перспективи застосування компактних та коаксіальних ліній електропередачі	48
3.2.3	Розрахунок фактичних розмірів санітарної зони захисту для вибраного класу напруги (110-750 кВ)	50
3.3	Висновки до дослідницької частини	51
4	ОХОРОНА ПРАЦІ	53
4.1	Основні поняття	53
4.2	Електромагнітні поля та випромінювання	54
4.3	Висновки до охорони праці	57
	ВИСНОВКИ	58
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	60
	ДОДАТОК А. Апробація результатів дослідження	64
	ДОДАТОК Б. Апробація результатів дослідження	70

ДОДАТОК В. Розроблений код для розрахунку полів та санітарних зон для двокової однорадіусної повітряної лінії 500 кВ типу «Ромб»	75
ДОДАТОК Г. Розроблений код для розрахунку полів та виникнення корони для двокової однорадіусної повітряної лінії 500 кВ типу «Ромб»:	78
ДОДАТОК Д. Розроблений програмний код 3D розподіл ЕМП для двокової однорадіусної повітряної лінії 500 кВ з урахуванням провисання проводів	81

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАК

ПЛ – повітряна лінія;

ЛЕП – лінія електропередачі;

ДОРПЛ – двоколова однорадіусна повітряна лінія;

СКМ – система комп'ютерної математики;

ЕМП – електромагнітне поле;

ЕС – енергетична система;

ЕРС – електрорушійна сила;

КЗ – коротке замикання;

ВАХ – вольт-амперна характеристика;

ЕРС – електрорушійна сила;

СЗЗ – санітарно-захисна зона;

ТСЗЗ – технічні способи та засоби захисту;

ІЧВ – інфрачервоне випромінювання;

ПК – персональний комп'ютер;

КПО – коефіцієнт природного освітлення;

ВСТУП

Сучасний етап розвитку енергетики характеризується постійним зростанням потужностей та розширенням мереж високої напруги. Високовольтні лінії електропередачі (ЛЕП) є джерелами потужних електромагнітних полів (ЕМП), які створюють значне техногенне навантаження на навколишнє середовище. Питання електромагнітної сумісності, захисту обслуговуючого персоналу та населення, а також мінімізації впливу на екосистеми в зонах проходження ЛЕП сьогодні є критично важливими. Моделювання цих полів дозволяє ще на етапі проектування оцінити потенційні ризики та розробити ефективні захисні заходи.

Комп'ютерне моделювання в даний час є потужним інструментом для моделювання та дослідження складних електротехнічних систем. У зв'язку з цим вивчення методів та проведення математичного моделювання електромагнітних полів ліній електропередачі високої напруги є важливим у підготовці інженерів електроенергетичної галузі.

Тому *метою роботи* є проведення комплексного аналізу та моделювання розподілу електромагнітних полів ліній електропередачі високої напруги для оцінки їх впливу на прилеглу територію та дослідження способів зниження рівня електромагнітного випромінювання.

Об'єкт дослідження: процеси формування та розповсюдження електромагнітних полів навколо високовольтних ліній електропередачі.

Предмет дослідження: методи математичного та комп'ютерного моделювання напруженості електричного та магнітного полів залежно від конструктивних параметрів ліній електропередачі та режимів їх роботи.

Для досягнення мети роботи необхідно вирішити наступні *задачі*:

1. Проаналізувати класифікацію та конструктивні особливості сучасних повітряних ліній електропередачі високої напруги.

2. Визначити фундаментальні фізичні закони та рівняння, що описують просторовий розподіл електричних і магнітних полів навколо струмоведучих частин високовольтних ліній;
3. Розглянути сучасний стан проблеми впливу електромагнітного поля високовольтних ліній на довкілля;
4. Розглянути методи візуалізації та графічного зображення силових характеристик електромагнітних полів для аналізу їх інтенсивності в просторі;
5. Провести дослідження впливу геометрії підвісу дротів та класу напруги лінії електропередачі на ширину санітарно-захисної зони.
6. Розглянути методи екранування та оптимізації фазування ліній для зменшення інтенсивності електромагнітного поля;
7. Розглянути нормативно-методичні та організаційні заходи з охорони праці.

Методи дослідження: у роботі використано методи теорії електромагнітного поля, чисельні методи розв'язання диференціальних рівнянь та комп'ютерне моделювання з використанням сучасних програмних комплексів.

Результати проведеного дослідження можуть бути використані проектними організаціями для обґрунтування вибору конструкції опор та методів екранування електромагнітного поля, що дозволить підвищити екологічну безпеку енергооб'єктів при одночасному зниженні капітальних витрат на будівництво. Результати досліджень можна використовувати при створенні віртуального лабораторного практикуму з електротехнічних дисциплін. Знання студентами основ імітаційного та комп'ютерного моделювання дозволить з більшою ефективністю виконувати реальні проектні завдання.

1 ОГЛЯДОВА ЧАСТИНА

1.1 Повітряні лінії електропередачі високої напруги

1.1.1 Класифікація повітряних ліній електропередачі високої напруги

Лінією електропередачі (ЛЕП) називають електроустановку, призначену для передавання електричної енергії на далекі відстані між двома пунктами електричної системи. Лінії електропередачі складаються в основному з проводів та кабелів, ізолюючих елементів та несучих конструкцій [1].

ЛЕП можна поділити на групи за її параметрами а саме напругою та категорією надійності споживачів електроенергії які до неї під'єднані, усього три групи. До третьої групи завжди відносять лінії електропередачі напругою до 1 кВ не зважаючи на категорію надійності споживачів які від неї живляться.

В основному лінія електропередачі працює в таких режимах як нормальний режим роботи – це робота ЛЕП при непошкоджених проводах, ізоляторах та несучій конструкції та аварійний режим при якому відбулося пошкодження елементів ЛЕП. Виникнення аварійного режиму ЛЕП спричиняють такі фактори як незахищеність проводів та їх відносна рухомість, постійний вплив навколишнього середовища: опадів, вітрів, дерев, що зростають, зрушень ґрунту (на кшталт землетрусу), грози та інше [2].

Лінії електропередачі напругою до 1кВ призначені для передавання та розподілу електроенергії на невеликі відстані у межах міст, селищ і сіл до введів у будинки або на підприємства. Ці лінії в містах часто бувають кабельними.

Лінії напругою від 6 до 35 кВ використовують для передавання електроенергії від районних підстанцій до населених пунктів і підприємств на відстань від 10 до 20 км.

Лінії напругою від 110 до 330 кВ, а іноді й 500 кВ, призначені для передавання більших потужностей між енергетичними системами (ЕС) та великими районними підстанціями для енергопостачання великих міст або промислових районів на відстань від 30 до 600 км.

Лінії напругою 500 кВ використовують для передавання потужності до 1000 МВт і служать для зв'язку різних енергетичних систем, що перебувають на відстані до 1200 км.

Лінії напругою 750 кВ призначені для передавання потужності від 200 до 2500 МВт на відстань до 2000 км.

Лінії ультрависокої напруги 1150 кВ змінного струму та 1500 кВ постійного струму для передавання надвеликих потужностей від 4000 до 6000 МВт на відстань від 2000 до 2500 км і більше [2].

1.1.2 Будова повітряних ліній електропередачі високої напруги

Лінії електропередачі мають в основному такі елементи:

1. Фундамент лінії електропередачі;
2. Опори – вони забезпечують закріплення проводів та грозозахисних тросів над землею;
3. Проводи різних типів за складом провідного матеріалу, перерізу;
4. Ізоляторів – вони ізолюють несучу конструкцію від проводів, які можуть спричинити коротке замикання (КЗ) на землю та опору;
5. Заземлювальні пристрої та розрядники для захисту від ударів блискавки;
6. Лінійна арматура – металеві деталі за допомогою яких кріплять ізолятори та троси до опори.

Опис елементів лінії

Проводи – це провідники через які проходить електричний струм. Для ЛЕП в основному використовують одножильні та двожильні, двожильні як

правило виконання з алюмінію та сталі та мають назву сталесалюмінієві. Маркування таких проводів виглядає таким чином:

- А - алюмінієвий провід
- АС - сталесалюмінієвий багатожильний провід
- СП - самонесучий ізольований провід – система скручених в джгут проводів (фазні, нульовий та додаткові), ізольованих, такий провід не потребує несучого троса.
- ПС - сталевий багатожильний провід
- ПСО - сталевий одножильний провід.

Ізолятори призначені для кріплення проводів до опор і створення необхідного електричного опору між проводом, що перебуває під напругою та опорою.

Ізолятор – гірлянда ізоляторів потрібна для під'єднання проводу до опори, вона забезпечує захист опори від напруги та струму що є у проводу.

Лінійна арматура. Металеві деталі за допомогою яких кріплять ізолятори та троси до опори. Вони також служать для підтримки проводів на певній відстані один від одного, з урахуванням коливання на вітру та напруги пробою. Арматура поділяється на натяжні та підтримуючі, має такі елементи:

- з'єднувачі,
- дистанційні розпорки
- затискачі
- захисні кільця і роги
- зчеплювальні деталі
- та віброгасильники.

Натяжні затискачі призначені для кріплення проводів і тросів на анкерних опорах, а підтримуючі затискачі - для кріплення проводів на проміжних опорах. До зчеплювальної арматури належать скоби, серезки, пестики, вушка, двоколові й триколові коромисла.

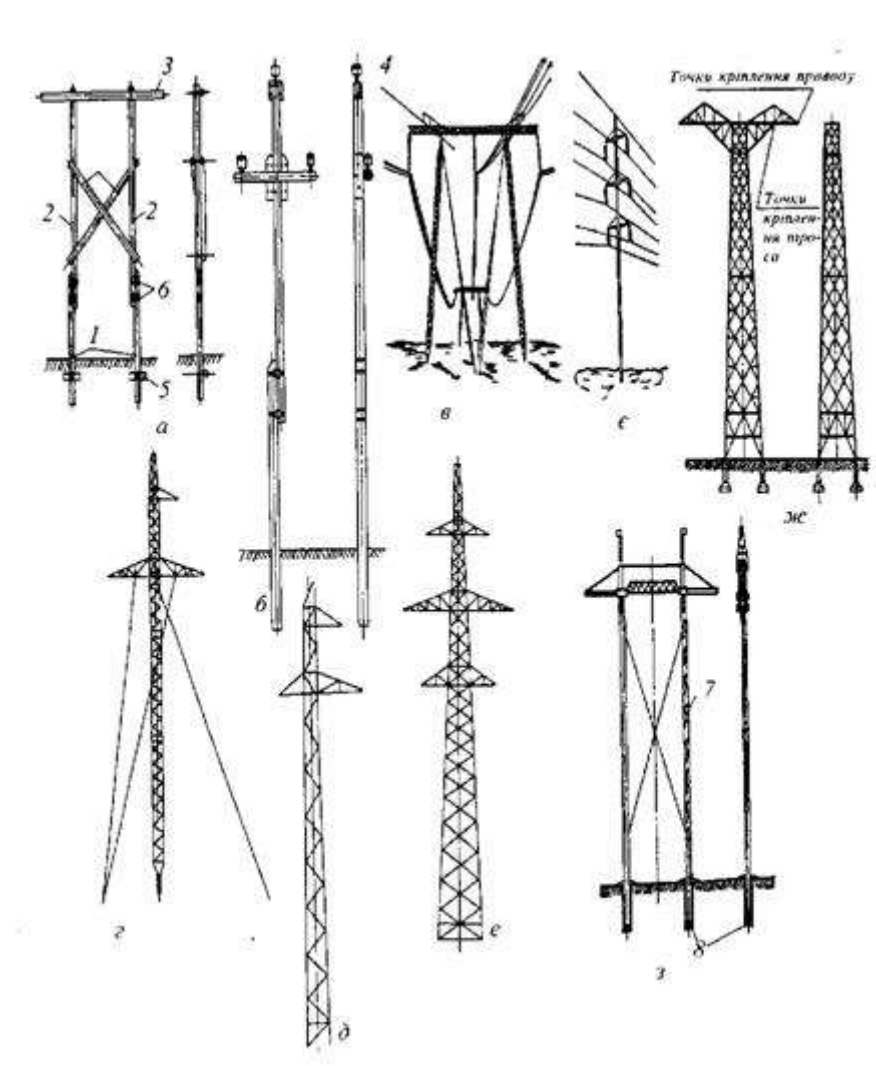


Рисунок 1.1 – Конструкції анкерних кутових опор: а) – одноколова металева опора; б) – двоколова металева опора; в) – опора типу "рюмка"; г) - Т-подібна опора; д) – дерев'яна АП-подібна опора; е) – тристоякова анкерна опора 500 кВ; ж) – одностоякова залізобетонна опора з від-тяжками; 1) – підтраверсні бруси; 2) – ригелі; 3) – розкоси; 4) – бандажі; 5) – траверси; 6) – стояки; 7) – косинки; 8) – відтяжки

Опори ліній виконують дерев'яними, металевими та залізобетонними.
За призначенням розрізняють наступні види опор (рис.1.1):

- проміжні
- анкерні
- кутові
- транспозиційні

- розгалужувальні
- перехресні
- кінцеві

В основному найширше розповсюдження набули опори проміжного типу. Основне завдання опор підтримувати проводи на заданій висоті вздовж прокладеної траси.

Крім зазначених в конструкціях повітряних ліній застосовують інші спеціальні типи опор, зокрема, кінцеві опори, які встановлюють на кінцях повітряної лінії; кутові опори, які встановлюють на кутах поворотів лінії; відпайкові опори, для створення вузлів робочої схеми електричної мережі без застосування розподільчих пристроїв; транспозиційні опори для зміни чергування фазних проводів лінії у просторі; перехідні опори для виконання переходів через водні простори тощо [3,4].

1.1.3 Санітарна зона ліній електропередачі високої напруги

Санітарно-захисна зона (СЗЗ) лінії електропередачі – це визначена територія, її мета здійснити захист людей або мінімізувати негативний вплив електричних та магнітних полів, які створюються при протіканні струму високої та надвисокої напруги.

СЗЗ визначається для таких випадків як перевищення безпечних рівнів випромінювання біля житлових будинків, територія такої зони визначається спеціальними розрахунками але в основному залежить від висоти проводів та номінальної напруги.

Ширина охоронної зони визначається залежно від напруги ЛЕП:

- понад 1 кВ до 20 кВ-10 м
- 35 кВ - 15 м
- 110 кВ - 20 м
- 150 кВ - 25 м
- 220 кВ - 25 м

- 330 кВ - 30 м
- 500 кВ - 30 м
- 750 кВ - 40 м

У межах цієї зони заборонено:

- будувати житлові будинки, будинки громадського призначення;
- розміщати споруди іншого призначення на меншій відстані від елементів електричних мереж, ніж встановлена нормами;
- складати будь-які матеріали, розпалювати вогнища, влаштовувати звалища;
- саджати дерева, крім кущів та саджанців з висотою перспективного росту не більше двох метрів;
- розташовувати автозаправні станції або сховища пально-мастильних матеріалів;
- влаштовувати спортивні майданчики для ігор, стадіони, ринки, зупинки громадського транспорту, проводити будь-які заходи, пов'язані з великим скупченням людей, не зайнятих виконанням дозволених у встановленому порядку робіт;
- запускати спортивні моделі літальних апаратів та повітряні змії;
- відсипати ґрунт, влаштовувати водосховища, ставки та інші водні споруди;
- влаштовувати зупинки та стоянки усіх видів транспорту (крім залізничного) в охоронних зонах повітряних ліній електропередачі напругою 330 кВ і вище. [5,6,7]

1.2 Електромагнітні поля високовольтних ліній електропередачі

1.2.1 Основні закони для опису просторового розподілу електромагнітного поля

Під час роботи високовольтних ліній і підстанцій при напрузі понад 330 кВ внаслідок протікання струму в проводі утворюється електромагнітне поле, що негативно впливає на здоров'я людини. Основний показник цього впливу - це струм, що виникає в тілі людини внаслідок дії цього поля. За міжнародними нормами, прийняли безпечний рівень цього струму - що не перевищує 10 мА/м².

При промисловій частоті в Україні (як правило це 50 Гц) електричне і магнітне поля діють майже незалежно один від одного. Але електричне поле впливає значно сильніше: воно надає в тіло людини в 50 разів більше енергії, в порівнянні ніж магнітне поле. Наприклад, біля ліній електропередачі напругою 750 кВ напруженість такого магнітного поля складає приблизно лише 20-25 А/м, в той же час як негативний вплив для людини буде при 150-200 А/м. Отже в такому випадку основну небезпеку становить саме електричне поле, і саме його напруженість яка вимірюється у кВ/м й регулюється правилами безпеки.

В основному сила електричного поля поблизу електричного обладнання залежить від номінальної робочої напруги, та від відстані до проводів по яким проходить струм - як по висоті, так і по горизонталі. [8,9].

Електричне поле-це тип матерії, що утворюється навколо заряджених тіл, за допомогою якого вони взаємодіють один з одним. Сила взаємодії двох точкових зарядів визначається законом Кулона:

$$f = k \cdot q_1 \cdot \frac{q_2}{r^2}. \quad (1.1)$$

При цьому якщо заряджені тіла мають однакові заряди, то вони відштовхуються один від одного, а різнойменні-притягуються. Заряджені тіла взаємодіють один з одним за допомогою їх електричних полів [10].

Напруженість електричного поля-це сила, яка діє на одиницю заряду, поміщеного в дане електричне поле: $E = F/q$. Вимірюється в [В/м]. Якщо певний точковий заряд Q утворює електричний поле, то напруженість цього поля в точці, що знаходиться на відстані r від заряду обчислюється за формулою:

$$E = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot r^2}, \quad (1.2)$$

де ε_0 – електрична стала; ε – діелектрична проникність середовища; Q – заряд, що утворює дане електричне поле; r – відстань від точкового заряду до точки спостереження.

За напрямом напруженості приймають напрямок сили, що діє на позитивний заряд.

Принцип суперпозиції електричних полів стверджує, що якщо в одній точці простору створюють поле кілька зарядів, то результуюча напруженість в цій точці дорівнює векторної сумі напруженостей, створюваних кожним зарядом окремо.

Це означає, що електричні поля від декількох зарядів накладаються один на одного, не змінюючи своїх індивідуальних характеристик. Для точок, в яких поля створюються кількома зарядами $q_1, q_2, \dots, q_n$ результуюча напруженість E в цій точці буде дорівнює: $E = E_1 + E_2 + \dots + E_n$ (рис.1.2).

Принцип суперпозиції використовується при розрахунку полів складних конфігурацій зарядів і в електростатиці для аналізу розподілу полів всередині конденсаторів, котушок і проводів [11].

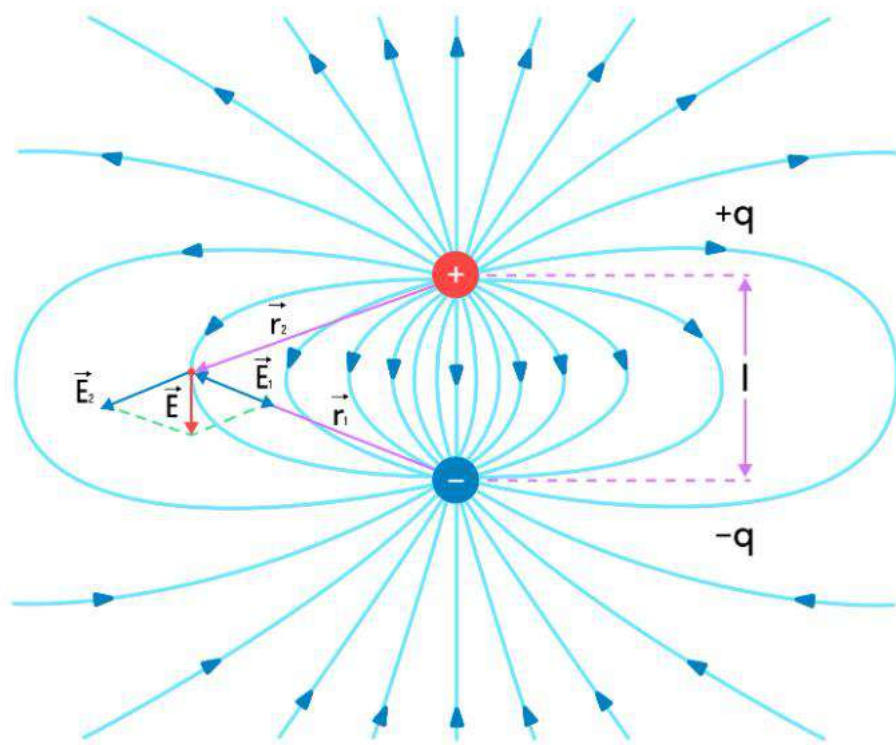


Рисунок 1.2 – Результуюча напруженість

Потенціал електричного поля φ - скалярна енергетична характеристика поля, що визначається відношенням потенціальної енергії W позитивного заряду q в даній точці поля до величини цього заряду: $\varphi = \frac{W}{q}$ [12].

Закон Біо-Савара-Лапласа фізичний закон визначення вектора індукції магнітного поля, створюваним проходженням постійного електричного струму по провіднику.

Був встановлений експериментально в 1820 Біо і Саваром і сформульований Лапласом в наступним чином:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{I \cdot [d \cdot \vec{l}, \vec{r}]}{r^3}, \quad (1.3)$$

або у скалярному вигляді:

$$dB = \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{I \cdot d \cdot l \cdot \sin a}{r^2}, \quad (1.4)$$

де $\mu_0=4\pi\cdot10^{-7}$ Гн/м – магнітна стала; магнітна проникність; $d\vec{l}$ – вектор, що дорівнює по модулю довжині dl провідника, що збігається у напрямку зі струмом; I – сила тока; $\vec{r}$ – радіус-вектор, проведений від середини елемента провідника до точки, магнітна індукція у якій визначається.

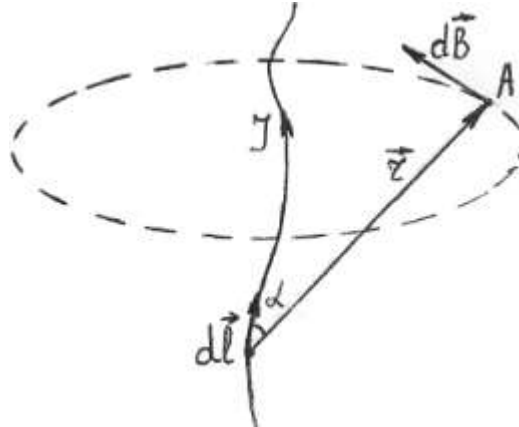


Рисунок 1.3 – Результируюча напруженість

Закон Біо - Савара - Лапласа вважатимуться основним законом магнітостатики, одержуючи з нього інші її результати [13].

1.2.2 Зображення електричних і магнітних полів

Побачити або сфотографувати електричне поле неможливо. Для графічного зображення електричного поля прийнято використовувати силові лінії. Силові лінії електричного поля, це умовні лінії, уздовж дотичних до яких на заряджене тіло діє сила з боку електричного поля. За напрямком силових ліній можна визначити напрямок, у якому електричне поле діє на електричний заряд. Щільність силових ліній на рисунку показує, наскільки сильним є електричне поле.

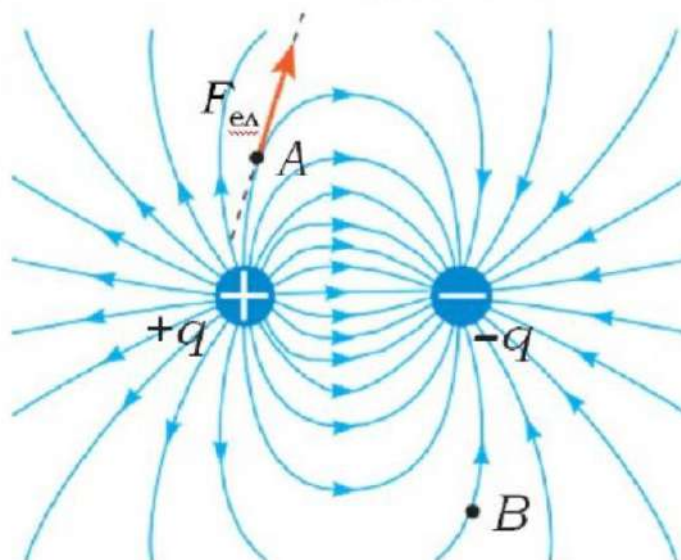


Рисунок 1.4 – Графічне зображення електричного поля

На рис.1.4 представлена картина силових ліній електричного поля, створеного системою двох однакових за модулем різнойменних зарядів ($+q$ і $-q$). F_{el} - сила, з якою це електричне поле діє на позитивний заряд, розташований у точці A [14,15].

Графічно магнітне поле зображується за допомогою ліній магнітної індукції, які є замкненими лініями або лініями, що уходять у нескінченність.

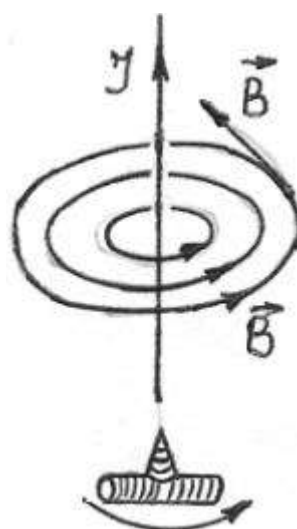


Рисунок 1.5 – Графічне зображення магнітного поля

Наприклад для нескінченного рівного провідника по якому тече постійний струм, лінії магнітної індукції матимуть вигляд зображеному на рис. 1.5, напрямок цієї лінії зазвичай визначають правилом правого гвинта, або правилом буравчика.

На рис 1.6 зображено лінії магнітної індукції кільцевого провідника з постійним струмом

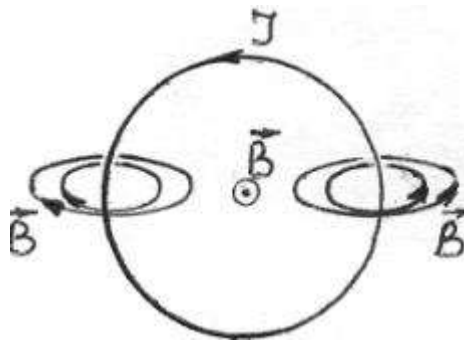


Рисунок 1.6 – Графічне зображення магнітної індукції кільцевого провідника

Відповідно для того щоб визначити напрямок магнітної індукції у центрі витка необхідно застосувати зворотне правило гвинта. [13].

1.2.3 Принцип дзеркального відображення для електричних полів

Іноді замість того, щоб розв'язувати більш складну задачу про електричні поля її замінюють на простішу, але еквівалентну, що дає аналогічну відповідь. найкращій приклад такого методу, буде метод дзеркального відображення електричних полів.

Його фізична суть полягає в наступному: реальна провідник з однойменним зарядом замінюється уявним (дзеркальним) зарядом з протилежним знаком $-Q$, який розташовують симетрично на відстані $2d$ відносно площини розділу.(див. рис. 1.7).

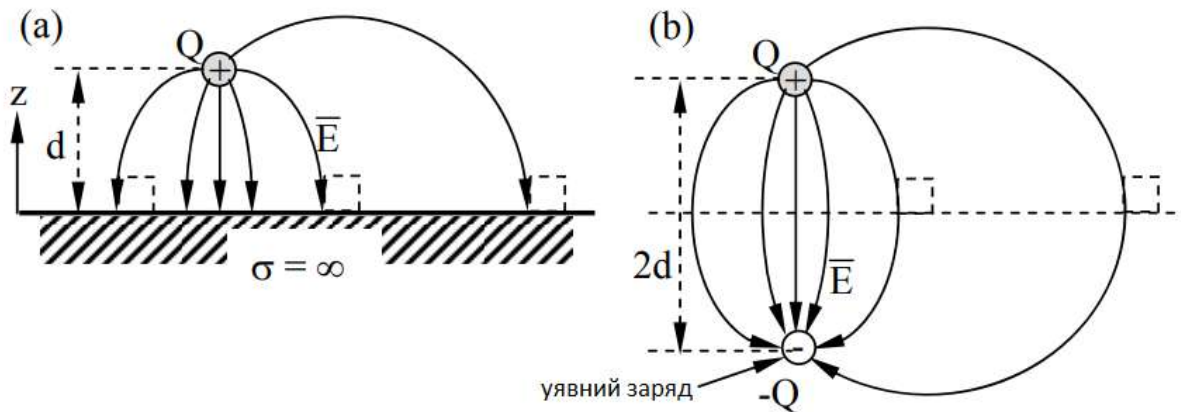


Рисунок 1.7 – Заряд зображення для нескінченного плоского ідеального провідника

Для визначення характеристик поля, створеного таким точковим зарядом, що перебуває на відстані d над нескінченним ідеальним провідником, як зображено на рис. 1.7 (а). Відповідно до граничних умов на межі провідника, вектори напруженості електричного поля мають бути строго перпендикулярними до його поверхні.

Для створення таких еквівалентних умов реальний провідник умовно вилучають, а замість нього на відстані $2d$ від вихідного джерела впроваджують симетричний уявний заряд протилежного знаку. Внаслідок геометричної симетрії системи двох рівних за модулем і різнойменних зарядів лінії напруженості електричного поля E перетинають площину $z = 0$ виключно під прямим кутом. Це відтворює реальну картину поля в області $z > 0$, яка спостерігалася при наявності реального провідника, як зображено на рис. 1.7 (b). Отже, спираючись на принцип єдності, у верхньому півпросторі поля від сукупності реального джерела та його дзеркального відображення є тотожними полям у вихідній фізичній системі. Розподіл поля у нижній півплощині при цьому змінюється, але для розв'язання початкової задачі ця область не має суттєвого значення.

Описана еквівалентність залишається справедливою як для системи дискретних зарядів, так і для довільного просторового розподілу джерел (рис.

1.8). Метод дзеркальних відображень можна успішно застосовувати і для динамічних задач, якщо зміна величини чи просторового положення зарядів відбувається значно повільніше порівняно з часом релаксації середовища $\tau = \frac{\varepsilon}{\sigma}$. Під час релаксації визначається тривалість, яка буде необхідна для перерозподілу вільних зарядів у середині провідника до стану нової динамічної рівноваги після зміни зовнішнього поля.

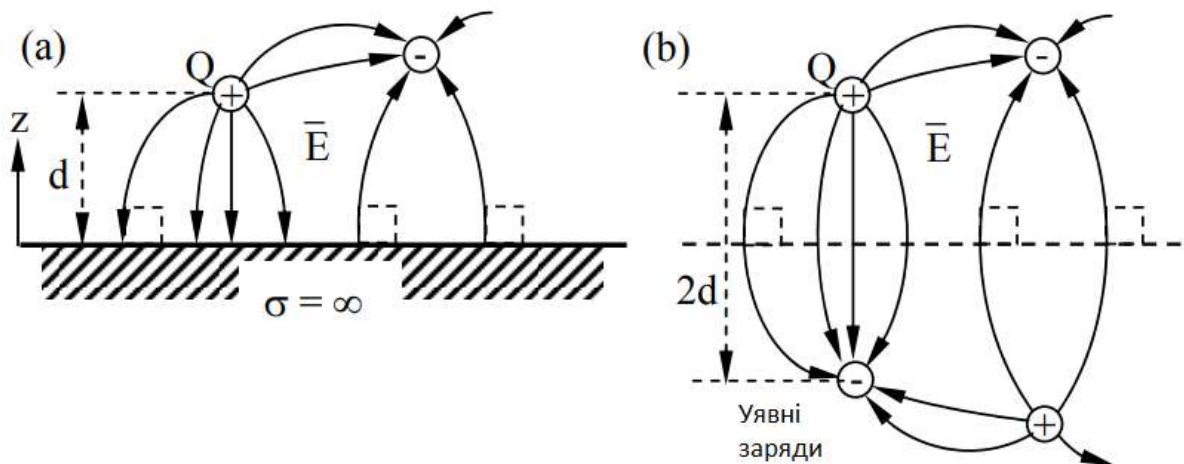


Рисунок 1.8 – Кілька зарядів зображення

Завдяки такої можливості врахування часових змін або руху джерел, даний метод поширюється і на електричні струми, які пов'язані із зарядами фундаментальним законом збереження (рис. 1.9 (а–с)). На рис. 1.9 (d) зображено, що магнітні поля, зумовлені протіканням таких струмів, повністю відповідають відповідним граничним умовам на межі провідника: вектор магнітної напруженості $\mathbf{H}$ на поверхні ідеального провідника має лише паралельну складову.

Метод дзеркальних відображень залишається кращим у випадках, коли у верхніх провідниках присутні додаткові провідники, які так само добре підлягають дзеркальному відображенню, що зображено на рис. 1.10. Конфігурація провідників може бути різною, наприклад провідники можуть перетинатися під певними кутами, що зображено на рис. 1.10 (b). Простір, у якому були знайдені поля знаходять фізичний сенс, який обмежений

безпосередньо геометрією цієї задачі. Для більш ускладнених просторових задач розрахункові схеми можуть відповідно суттєво ускладнюватися, подекуди вимагаючи введення додаткових нескінченних рядів послідовно зменшуваних уявних зарядів та струмів для їх відображення [16].

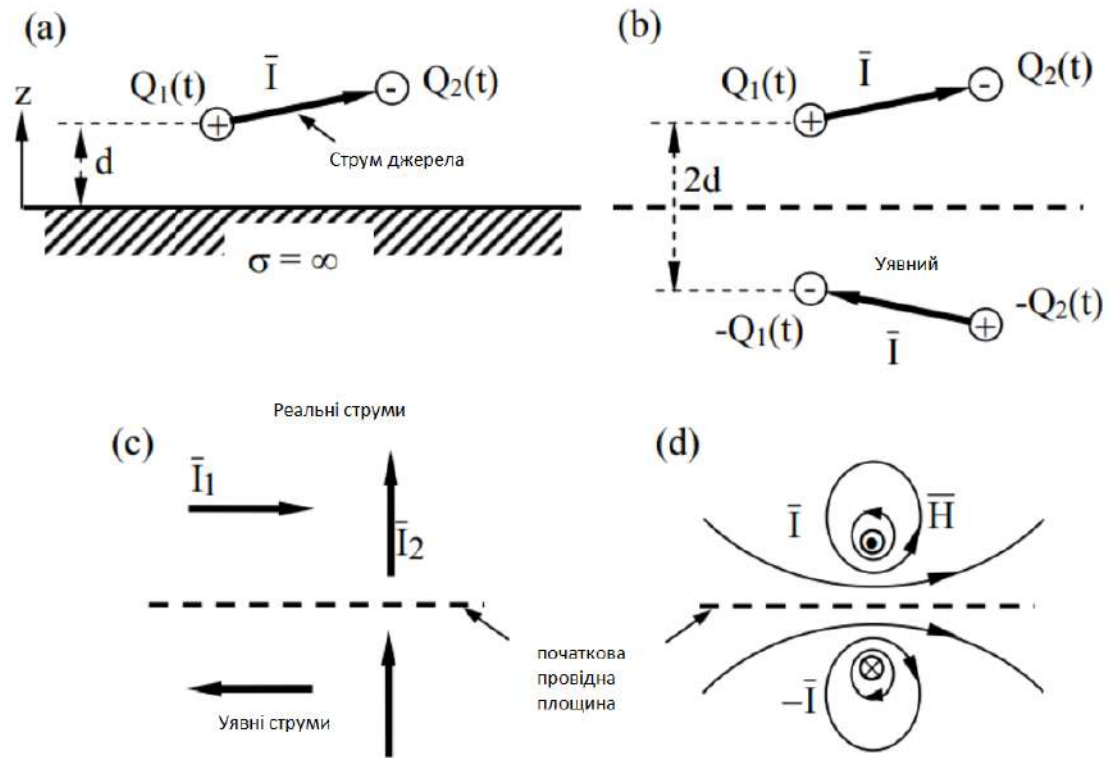


Рисунок 1.9 – Зображення струмів

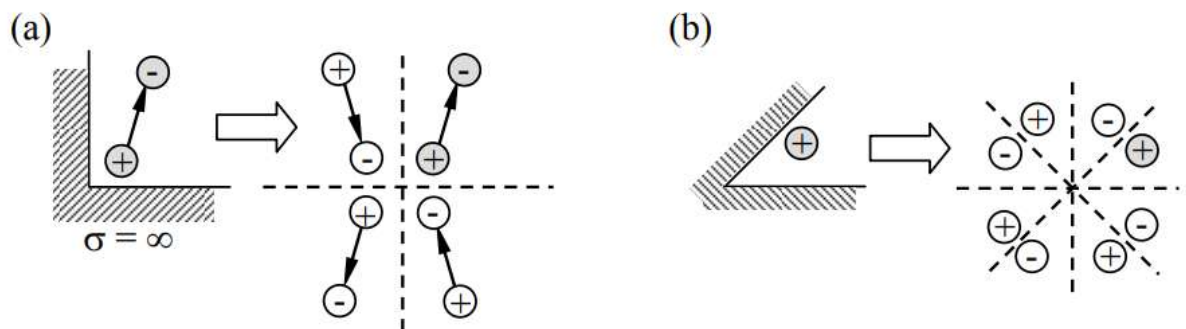


Рисунок 1.10 – Зображення зарядів і струмів для пересічних провідників

1.3 Висновки до оглядової частини

1. Встановлено, що клас напруги ЛЕП є визначальним фактором не лише для дальності передачі енергії, а й для інтенсивності техногенного впливу на навколишнє середовище. Зі збільшенням напруги критично зростають вимоги до геометрії підвісу дротів та габаритів опор.
2. Визначено, що для ПЛ промислової частоти електрична та магнітна складові поля діють практично незалежно. При цьому для ліній надвисокої напруги саме електричне поле є основним фактором екологічного ризику, оскільки його енергетичний вплив на організм людини у десятки разів перевищує вплив магнітної складової.
3. Охоронні та санітарно-захисні зони є головним інструментом забезпечення безпеки населення. Встановлено пряму залежність ширини цих зон від номінальної напруги, що підкреслює необхідність точного моделювання меж СЗЗ для оптимізації землекористування.
4. Розглянуто фундаментальні закони електродинаміки (закони Кулона, Біо-Савара-Лапласа) та принцип суперпозиції, які складають основу математичного апарату роботи.
5. Метод дзеркальних відображень визначено як ключовий методичний підхід, що дозволяє замінити складну граничну задачу з провідною поверхнею землі еквівалентною системою фіктивних зарядів, що значно спрощує алгоритмізацію розрахунків у програмних комплексах.

2 МЕТОДИЧНА ЧАСТИНА

2.1 Алгоритм чисельного розрахунку характеристик електромагнітного поля повітряних ліній електропередачі

Для того щоб розрахувати електричне поле в ЛЕП потрібно представити цю модель як тривимірну, тому, що на електричне поле в основному впливають такі параметри як:

- висота підвісу проводів;
- відстань між проводами один від одного;
- провисання проводу;
- нерівність ландшафту;
- геометрична конструкція опори.

Щоб знайти найбільшу напруженість електромагнітного поля ЛЕП поблизу землі, то такий розрахунок можна полегшити, прийнявши декілька спрощень. Для початку потрібно зрозуміти, що найбільша напруженість електричного поля буде приходити як раз на місце де відстань між землею та проводом найменше. Також варто зазначити що в основному в середині прольоту ЛЕП проводи поміж собою та землею майже паралельні. В основному ЛЕП намагаються будувати в рівній місцевості, для зручності та стандартизації висоти опор, відповідно нерівністю рельєфу можна знехтувати. Отже з переліченого попередньо, модель розрахунку можна спростити та виконати розрахунок, як систему циліндричних провідників над провідною поверхнею землі [17].

2.1.1 Математична модель системи циліндричних провідників над провідною поверхнею землі

Для того щоб виконати розрахунок електричного поля двоколових однорадіусних коаксіальних конструкцій ДОРПЛ методом дзеркальних

відображень потрібно виконати такі дії. Отже за цим методом потрібно моделювати проводи 12 окремих фазних проводів у вигляді нескінченно довгих циліндричних провідників, де провідна поверхня землі буде представлена такими ж провідниками на відстані $2d$ але з протилежним знаком заряду: $\tau'_i = -\tau_i$.

Для того, щоб описати зв'язок між відомими потенціалами циліндричних провідників U_i та відповідно не відомими зарядами τ_i зазвичай використовують першу групу формул Максвелла в матричній формі:

$$[a_n] \cdot [\tau_n] = [\dot{U}_n], \quad (2.1)$$

де $[a_{ii}]$ – матричний потенційний коефіцієнт, розмірність матриці 12×12 .

Ці коефіцієнти визначають наступними:

Власні, при $i = j$:

$$a_{ii} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0} \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot y_i}{r_0}\right). \quad (2.2)$$

Взаємні, при $i \neq j$:

$$a_{ij} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0} \cdot \ln\left(\frac{\tau'_{ij}}{\tau_{ij}}\right), \quad (2.3)$$

де y_i – висота підвісу i -го проводу над землею; r_0 – радіус проводу; r_{ij} та r'_{ij} – відстані від i -го проводу до реального та дзеркального j -го проводу.

Стандартна напруга в ЛЕП має синусоїдальну форму, оскільки потенціал фаз має зсув на 120° , але у ДОРПЛ зсув на 180° між фазами А1 та А2 кіл для забезпечення ефекту компенсації:

$$\dot{U}_{A1} = \frac{U}{\sqrt{3}} \cdot e^{j0^\circ}, \quad (2.4)$$

$$\dot{U}_{A2} = \frac{U}{\sqrt{3}} \cdot e^{j180^\circ}, \quad (2.5)$$

де U – лінійна напруга лінії, кВ.

Вектор шуканих зарядів для 12 проводів знаходиться оберненням матриці потенційних коефіцієнтів (2.1):

$$[\tau_n] = [a_n]^{-1} \cdot [\dot{U}_n]. \quad (2.6)$$

Елементи матриці визначаються геометричними параметрами ДОРПЛ, використовуючи формули (1.6-1.7).

Результуючі проекції напруженості поля в точці розрахунку (x_p, y_p)

Після визначення зарядів, потрібно визначити вектор напруженості у розрахунковій точці простору $M(x, y)$ за формулами [17]:

$$E_x = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0} \cdot \left(\frac{x_p - x_i}{(x_p - x_i)^2 + (y_p - y_i)^2} - \frac{x_p - x_i}{(x_p - x_i)^2 + (y_p + y_i)^2} \right), \quad (2.7)$$

$$E_y = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0} \cdot \left(\frac{y_p - y_i}{(x_p - x_i)^2 + (y_p - y_i)^2} - \frac{y_p - y_i}{(x_p - x_i)^2 + (y_p + y_i)^2} \right). \quad (2.8)$$

Щодо магнітних полів то магнітна індукція B яка створюється струмами які протікають у проводах ЛЕП:

$$\dot{I} = \frac{P_H}{\sqrt{3} \cdot U_{nom} \cdot \cos \varphi} \cdot e^{j\psi}, \quad (2.9)$$

де P_H – активна потужність, Вт; $\cos \varphi$ – коефіцієнт потужності; ψ – початкова фаза струму.

Для кожного в точці (x_p, y_p) розраховуються за формулами:

$$B_x = -\frac{\mu_0 \cdot \dot{I}}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{y_p - y_i}{(x_p - x_i)^2 + (y_p - y_i)^2}, \quad (2.10)$$

$$B_y = \frac{\mu_0 \cdot \dot{I}}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{x_p - x_i}{(x_p - x_i)^2 + (y_p - y_i)^2}. \quad (2.11)$$

Тоді результуюча магнітна індукція:

$$B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2}. \quad (2.12)$$

Для оцінки можливості виникнення коронного розряду на проводах ДОРПЛ проводиться порівняння фактичної напруженості на поверхні проводу з критичною напруженістю, вона заходиться емпіричною формулою Піка, кВ/см [18]:

$$E_{\text{крит}} = 30,3 \cdot m \cdot \delta \cdot \left(1 + \frac{0,299}{\sqrt{100 \cdot r_0}} \right), \quad (2.13)$$

де $m = 0,82$ – коефіцієнт шорсткості для сталевалюмінію;

δ – відносна густина повітря;

r_0 – радіус проводу, см.

Для розщепленої фази (пучка проводів) максимальна напруженість на поверхні одного проводу в пучку вища за середню нерівномірність поля і визначається за формулою:

$$E_{max} = \frac{\tau}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot r_0} \cdot \left(1 + (n - 1) \cdot \frac{r_0}{r_{eq}} \right). \quad (2.14)$$

Умова надійної роботи ПЛ без надлишкових втрат та радіоперешкод:

$$E_{max} = 0,9 \cdot E_{\text{крит}}. \quad (2.15)$$

Санітарно-захисна зона визначається як мінімальна відстань X від осі лінії, починаючи з якої виконуються умови безпеки:

- напруженість електричного поля $E \leq 0,5$ кВ/м;
- магнітна індукція $B \leq 5$ мкТл.

Розроблену математичну модель буде створена у майбутньому вигляді програмного коду в MATLAB, що дозволить виконати розрахунки електромагнітних полів для різних марок проводів та визначати параметри ДОРПЛ.

2.1.2 Формування матриці потенційних коефіцієнтів

Матриця потенційних коефіцієнтів $[a]$ є основою математичної моделі для виконання обчислення електричного поля системи, яка складається з декількох проводів. Для двоколової однорадіусної коаксіальної конструкції (ДОРПЛ) розмірність такої матриці визначається загальною кількістю провідників, що потрібно буде врахувати в розрахунку.

Отже, структура матриці потенційних коефіцієнтів, яка повинна мати 12 проводів по 3 фази в кожному з двох кіл, з розщепленням кожної фази на $n=3$ проводи, повинна мати розмірність 12×12 :

$$a = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{16} & a_{17} & a_{18} & a_{19} & a_{1,10} & a_{1,11} & a_{1,12} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} & a_{26} & a_{27} & a_{28} & a_{29} & a_{2,10} & a_{2,11} & a_{2,12} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} & a_{36} & a_{37} & a_{38} & a_{39} & a_{3,10} & a_{3,11} & a_{3,12} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} & a_{46} & a_{47} & a_{48} & a_{49} & a_{4,10} & a_{4,11} & a_{4,12} \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & a_{54} & a_{55} & a_{56} & a_{57} & a_{58} & a_{59} & a_{5,10} & a_{5,11} & a_{5,12} \\ a_{61} & a_{62} & a_{63} & a_{64} & a_{65} & a_{66} & a_{67} & a_{68} & a_{69} & a_{6,10} & a_{6,11} & a_{6,12} \\ a_{71} & a_{72} & a_{73} & a_{74} & a_{75} & a_{76} & a_{77} & a_{78} & a_{79} & a_{7,10} & a_{7,11} & a_{7,12} \\ a_{81} & a_{82} & a_{83} & a_{84} & a_{85} & a_{86} & a_{87} & a_{88} & a_{89} & a_{8,10} & a_{8,11} & a_{8,12} \\ a_{91} & a_{92} & a_{93} & a_{94} & a_{95} & a_{96} & a_{97} & a_{98} & a_{99} & a_{9,10} & a_{9,11} & a_{9,12} \\ a_{10,1} & a_{10,2} & a_{10,3} & a_{10,4} & a_{10,5} & a_{10,6} & a_{10,7} & a_{10,8} & a_{10,9} & a_{10,10} & a_{10,11} & a_{10,12} \\ a_{11,1} & a_{11,2} & a_{11,3} & a_{11,4} & a_{11,5} & a_{11,6} & a_{11,7} & a_{11,8} & a_{11,9} & a_{11,10} & a_{11,11} & a_{11,12} \\ a_{12,1} & a_{12,2} & a_{12,3} & a_{12,4} & a_{12,5} & a_{12,6} & a_{12,7} & a_{12,8} & a_{12,9} & a_{12,10} & a_{12,11} & a_{12,12} \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Тепер можна визначити діагональні елементи матриці, що представленні були вище як (2.2 і 2.3). Формування потенційних коефіцієнтів для ДОРПЛ полягає у врахуванні трипровідного розщеплення кожної фази $n=3$. Так як рівняння Максвелла потребують використання циліндричних провідників, тоді для виконання розрахунків реальний радіус одиночного проводу r_0 потрібно замінити на еквівалентний радіус розщепленого пучка r_{eq} провідника. Еквівалентний радіус ДОРПЛ можна визначити наступною формулою:

$$r_{eq} = \sqrt[3]{3 \cdot r_0 \cdot a_l^2}. \quad (2.17)$$

де r_0 – радіус одного провідника, см; a_l – фіксований крок розщеплення всередині пучка або відстань між осями суміжних дротів однієї фази, см.

Обчислене значення r_{eq} підставляється у знаменник виразу (2.2) для розрахунку потенційних коефіцієнтів від $a_{1,1}$ до $a_{12,12}$. Елементи матриці типу a_{ij} , що визначаються за загальним виразом (2.3), потребують покрокового визначення геометричних відстаней D_{ij} та D'_{ij} між 12-ма розрахунковими

точками лінії в просторі. Для автоматизації такого процесу в моделюванні виконується наступні дії, розрахунковий переріз прольоту ДОРПЛ закріплюється до одної системи координат. Кожній з 12-ти розрахункових точок присвоюється числовий індекс i від 1 до 12, який повинен зафіксувати її просторові координати (x_i, y_i) та врахувати геометричні параметри ромбів ДОРПЛ. Матричний масив відстаней між проводами можна сформувати через аналітичні координатні вирази:

$$D_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}, \quad (2.18)$$

$$D_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i + y_j)^2}. \quad (2.19)$$

Зазвичай фізичні властивості простору між проводами ЛЕП є однорідними, взаємний вплив i -го проводу на j -й є еквівалентним зворотному впливу. Математично це можна описати так як симетрію потенційних коефіцієнтів матриці:

$$a_{ij} = a_{ji}. \quad (2.20)$$

Замість повного ручного перебору та розрахунку всіх комірок матриці, алгоритм MATLAB розраховує лише потрібний коефіцієнти, після чого виконує їх дзеркальне копіювання та розрахунок. Сформована таким чином матриця $[a]$ є визначеною і готовою до матричного обернення $[a]^{-1}$, та в подальшому розрахунку вектору-стовпця лінійних зарядів $[\tau]$ [18].

2.2 Програмна реалізація моделі (на прикладі MATLAB/Maple)

2.2.1 Опис структури створеного програмного коду для розрахунку характеристик електромагнітного поля

Для практичної реалізації розробленої математичної моделі та проведення багатоваріантних розрахунків характеристик електромагнітного поля поблизу ДОРПЛ було обрано математично-інженерне середовище високого рівня MATLAB. Вибір даного програмного комплексу обґрунтований його високою ефективністю при виконанні матричних операцій, які є основою розв'язання першої групи рівнянь Максвелла для багатопровідних систем, та можливістю 2D й 3D візуалізації електромагнітних полів.

Основними функції які будуть використанні середовища MATLAB у межах такого моделювання електромагнітного поля ДОРПЛ. Вбудована підтримка комплексного розрахунку рівнянь та матриць. Оскільки напруги та струми у фазах ЛЕП мають синусоїдальний характер та відповідно зміщені у просторі та часі один від одного, програмне забезпечення буде оперувати комплексними числами у формі $A \cdot e^{j\psi}$ без необхідності ручного розділення рівнянь на реальні та уявні частини, та відповідно розраховувати за правилами розрахунку комплексних рівнянь.

Висока швидкість обернення матриць дозволяє дуже швидко виконати розрахунок вектора лінійних зарядів яка потребує операції $[a]^{-1}$, що відповідно було реалізовано в MATLAB за допомогою оптимізованих LU-алгоритмів декомпозиції які забезпечать мінімальну можливу комп'ютерну похибку округлення для матриць великої розмірності.

Завдяки розвиненим графічним можливостям які вбудовані у програмне середовище двовимірної та тривимірної візуалізації також дозволяє спростити складність та автоматично будувати просторові лінії розподілу напруженості

електричного поля $E(x)$ та магнітної індукції $B(x)$, а також наочно показати межі санітарно-захисних зон [19].

Такий розроблений програмний код, який структурно складається з декількох взаємопов'язаних блоків та спеціалізованих функцій, які послідовно вирішують автоматично задачі геометрії, електростатики, електродинаміки та розрахунків екологічних критеріїв безпеки високовольтної лінії ДОРПЛ.

Створений програмний код має чітку модульну структуру. Логіка роботи програми базується на послідовному виконанні наступних функціональних блоків:

Блок вхідних даних, даному етапі у скрипті задаються константи такі як ε_0 , μ_0 , параметри ЛЕП, а саме напруга $U_{nom} = 500$ кВ, активна потужність $P = 3200$ МВт, та коефіцієнт потужності $\cos \varphi$, геометричні характеристики проводу типу АС-330/43, радіус r_0 та параметри розщеплення пучка $n = 3$, радіус розщеплення r_{bundle} . Також тут формуються масиви фазових зсувів напруг $0^\circ, -120^\circ - 120^\circ$.

Функція формування просторової геометрії *generate_geometry* дозволяє виконати моделювання конфігурації ромб у ПЗ MATLAB. За допомогою цієї функції можна розраховувати геометричні координати центрів фаз, величину вертикального зміщення кіл та параметри кутів підвісу. На основі тригонометричних розрахунків вона автоматично створить числові масиви координат X та Y для всіх 12 проводів ДОРПЛ. Одночасно всередині функції відбувається розподіл комплексних потенціалів та струмів по жилах із урахуванням протифазного режиму включення, та фазового зсуву 180° між однойменними фазами першого та другого кіл для забезпечення ефекту самокомпенсації полів.

Функція розрахунку погонних зарядів *calc_tau*, у коді приймає нещодавно створені координати проводів ДОРПЛ та вектори їхніх комплексних потенціалів. Функція організує подвійний вкладений цикл, через це вона здатна виконати розрахунки таких параметрів як між провідні відстані, дзеркальні відстані до землі та заповнює квадратну матрицю потенційних

коефіцієнтів $[a]$ розміром 12×12 . Наприкінці коду функції виконується матричне обернення, яке створить можливість розрахувати результуючий вектор-стовпець комплексних лінійних зарядів $[\tau]$.

Цикл просторового розрахування або розрахунок багатой кількості точок з певним кроком у просторі. Створений програмний код задає сітку на висоті росту людини $Y = 1,8$ метрів над рівнем землі та розраховує простір по горизонталі в діапазоні від -50 до $+50$ метрів від осі ЛЕП із кроком $0,1$ метрів, відповідно розрахунок відбувається по обидвом осях x, y . У кожній розрахованій точці програмний кодом за принципом суперпозиції розраховуються проекції електричних E_x, E_y та магнітних B_x, B_y полів від кожного з 12 проводів ДОРПЛ. Після цього обчислюються модулі діючих значень $E_{\max}$ та $B_{\max}$.

Блок перевірки умов коронного розряду. Використовуючи емпіричні геометричні параметри пучка, код розраховує максимальну напруженість безпосередньо на поверхні фізичного проводу. Далі за формулою Піка розраховується критична напруженість за якої відбувається виникнення корони E_{kr} з урахуванням коефіцієнта шорсткості сталевалюмінію. Програмний код в автоматично перевірить виконання нерівності $E_{surf} \leq E_{kr}$ і виводить логічний результат стійкості лінії до втрат на корону, також можна змінити текст виводу для зручності розуміння.

Модуль визначення санітарних меж та графічного виведення. Скрипт порівнює масиви розрахованих полів, та знаходить координати точок, де рівні поля менше гранично допустимих значень $E \leq 0,5 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$ та $B \leq 5 \text{ мкТл}$) фіксуючи реальну ширину безпечної зони. Після цього генеруються підсумкові графіки розподілу характеристик поля.

Розроблений коди для розрахунку полів та санітарних зон для ДОРПЛ 500 кВ типу «Ромб» наведено у додатку В та додатку Г [19].

2.2.2 Врахування провисання дротів та неоднорідності рельєфу

В навколишньому середовищі проводи ЛЕП майже не є паралельними до землі оскільки проводи під дією гравітації землі мають свою вагу матеріалу з якого виготовлені та відповідно провисають утворюючи форму параболи. Для врахування такого випадку не прямих проводів, було розроблено покроково-перерізний алгоритм розрахунку ЕМП по всій ділянці прольоту поміж двома опорами, який далі приймемо як L_{span} [20].

Зміна висоти провису провідників у будь-якій точці поздовжньої осі Z , яку можна апроксимувати класичною параболічною функцією[20]:

$$f(z) = 4 \cdot f_{sag} \cdot \frac{z}{L_{span}} \cdot \left(1 - \frac{z}{L_{span}}\right), \quad (2.21)$$

$$Y_{mid}(z) = Y_{attach} - f(z). \quad (2.22)$$

де f_{sag} – максимальна стріла провисання в центрі прольоту; Y_{attach} – висота кріплення фаз на опорі; $Y_{mid}(z)$ – поточна вертикальна координата геометричного центру коаксіальних ромбів.

Новий код для моделювань у 3D просторі повинен рахувати з оптимізацією наприклад для кожних 10м методом дискретизації поздовжньої осі Z . Збільшення дистанції кроків до 10м обґрунтовано тим, що розрахунок та створення занадто малих кроків наприклад 1см то для 400м³ буде використано забагато обчислювальних здатностей та часу які потрібно для розрахунку домашньому ПК, а також тим, що поле майже не змінюється при малих кроках. Тоді можна зробити алгоритм який для кожного сформованого перерізу виконає наступні дії:

- повторно розраховує матрицю координат для всіх 36 проводів з урахуванням радіуса розщеплення r_{bundle} та кутів зміщення θ_s .

- на кожному кроці заново формує та розв'язує матрицю розмірністю 36×36 відносно вектора комплексних лінійних зарядів $[\tau]$.
- розраховує поперечну вісь X у діапазоні від $x_{\min}$ до $x_{\max}$ метрів на зрості людини яка складає 1.8 м.

Така тривимірна програмна модель дозволить візуально оцінити зміну напруженості електричного поля та магнітного поля в 3D під лінією, фіксуючи геометричні межі санітарно-захисних зон, які можуть суттєво розширитись або зменшитись в середині прольоту через наближення проводів до поверхні землі.

2.3 Методика візуалізації силових характеристик полів

Для того щоб зробити перехід від чисельних матриць комплексних напруженості електричного й магнітного поля до 2D та 3D вимірного потребує розробки графічної частини коду та адаптації її під потреби досліду. Графічна частина моделювання буде реалізована за допомогою вбудованих інструментів ПЗ MATLAB. Ця операція дозволить перекласти з чисельного виду до більш наочного, а саме у візуально-геометричні побудови, які будуть доступні для подальшого простого аналізу візуально. В основному планується створити два типи графічного представлення.

- двовимірні площини вони стануть у нагоді для порівняння різних режимів роботи ЛЕП, синфазного та протифазного ДОРПЛ та визначення зон перевищення гранично допустимих рівнів гранично допустимих концентрацій (ГДК) ЕМП.
- тривимірні площини допоможуть візуально побачити розподіл ЕМП по всій площі досліджуваного прольоту поміж двома опорами ДОРПЛ, відповідно з урахуванням провисанням проводів.

Графічне виведення засноване на матричному перетворенні координат і використанні вбудованих функцій керування кольоровими площинами

colormap, за прозорість відповідає компонент *FaceAlpha* та іншими системами відліку [19].

2.3.1 Побудова графіків розподілу електричної напруженості та магнітної індукції на рівні зросту людини

На даний момент діючих нормативних санітарних правил, екологічна оцінка безпеки високовольтних повітряних ліній здійснюється в зонах можливого перебування населення на висоті $y_{calc} = 1,8$ м над рівнем землі, де 1,8м еквівалент середнього зросту людини. Для того щоб визначити вплив провисання проводів у коді було реалізовано алгоритм виділення поздовжнього профілю напруженості поля безпосередньо на геометричній осі симетрії траси $x = 0$ [21].

Розрахунок осьової лінії в матричному масиві поперечних координат X здійснюється через мінімізацію абсолютної похибки наближення до нуля реалізовано через наступну команду:

```
[~, ix0] = min(abs(x_vec - 0));
```

Для того щоб відобразити декількох процесів фізичного поля та геометричної зміни геометрії фаз у межах однієї графічної площини, було використано метод двовісної графічної системи через використання вбудованого оператора *yyaxis*.

У розробленому програмному коді буде використано в основному дві функції а саме *yyaxis left* та *yyaxis right*, перша функція відображає розраховані модулі діючих значень напруженості електричного поля $E(z)$, $\frac{\text{кВ}}{\text{м}}$ та магнітної індукції $B(z)$, масштабованої для наочності як $\frac{B(z)}{10}$, мкТл, друга функція перевіряє реальну висоту самого нижнього до землі проводу

коаксіального ромба над поверхнею землі $Y_{axis_bot}(z)$ у кожному розрахунковому перерізі прольоту.

Для графічного аналізу на 2D графік через використання вбудованих функцій *yline* та *xline* створюються такі лінії як: пунктирні лінії нормативних обмежень ГДК $E_{lim} = 0,5 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$ та аналогічний масштаб для B_{lim} та штрихована пунктирна лінія яка покаже середину прольоту $Z = \frac{L_{span}}{2}$, де знаходження фаз ЛЕП до поверхні землі є мінімальним. Таке представлення графічних побудов результатів розрахунку дозволить безпосередньо спостерігати залежність між висотою підвісу проводів та інтенсивністю ЕМП у найнижчій точці провису проводу при майже рівній ділянці встановлення ДОРПЛ [19].

2.3.2 Створення 2D-ізоліній та 3D-поверхонь розподілу силових характеристик полів

Для створення графічного представлення розподілу ЕМП вздовж усього простору поміж двома ЛЕП типу ДОРПЛ, в програмному коді використовується метод двовимірної інтерполяції на регулярній прямокутній сітці. Створення дискретного просторового виміру здійснюється вбудованою функцією *meshgrid*, яка перекладає одновимірні вектори координат X та Z у двовимірні матриці вузлових точок площини [22]:

```
[X_grid, Z_grid] = meshgrid(x_vec, z_vec);
```

Побудова тривимірної площини розподілу силових характеристик здійснюється через функції типу *surf*. Для чіткості та уникнення графічного нагромадження ліній просторової сітки, відображення ребер комірок краще буде вимикнено параметром '*EdgeColor*', '*none*'. Для забезпечення графічної наочності для порівняльного аналізу декількох графіків в одному вікні вводяться коефіцієнти напівпрозорості поверхонь '*FaceAlpha*', 0.92.

Для електричного поля було застосовано висококонтрастна температурна палітра jet в якій синій колір відповідає мінімальним значенням поблизу 0 кВ/м, а червоний максимальним значенням у мінімальних відстанях фазного проводу над землею. Для магнітного поля застосовано палітру hot, що полегшить візуальне розділення полів на суміщених панелях графіків. Також перевагою розробленого коду є автоматичне створення горизонтальної площини ГДК безпосередньо поверх 3D-поверхні розподілу полів. Це було зроблено через допоміжну функцію *patch_plane*, яка на заданій висоті константи а саме 0,5 кВ/м для E та 5,0 мкТл для B будує плоску напівпрозору підкладку червоного або помаранчевого кольору за допомогою ліній:

```
function patch_plane(ax, xv, zv, val, clr, alpha)
    xp = [min(xv) max(xv) max(xv) min(xv)];
    zp = [min(zv) min(zv) max(zv) max(zv)];
    vp = val * ones(1, 4);
    patch(ax, xp, zp, vp, clr, 'FaceAlpha', alpha, 'EdgeColor', 'none');
end
```

Точки перетину 3D поверхні поля з цією площиною наочно демонструють 3D межі санітарно-захисної зони вздовж усього прольоту між двома ЛЕП. Для оцінки одночасного впливу обох полів, а саме електричного та магнітного в програмному алгоритмі було реалізовано побудову поверхні безрозмірного сумарного індексу:

$$I_{\Sigma} = \frac{E(x, z)}{E_{lim}} + \frac{B(x, z)}{B_{lim}}$$

Побудова такої поверхні дозволяє виявити зони екологічного навантаження. Перетин поверхні I_{Σ} з маркерною площиною критичного рівня $I = 1,0$ є кінцевим критерієм для оптимізації просторового розміщення та конфігурації фаз ДОРПЛ типу «Ромб». Вище зазначені функції реалізовані у наступному програмному коді, який наведено у додатку Д.

2.4 Висновки до методичної частини

1. Обґрунтовано доцільність використання методу дискретних дзеркальних відображень та методу потенційних коефіцієнтів для розв'язання першої групи рівнянь Максвелла у багатопровідних системах. Також було використано більш складне моделювання на відміну від спрощених підходів із використанням еквівалентного радіуса фаз, розроблена математична модель оперує матрицями високої розмірності 36×36 , що дозволяє розраховувати просторове положення, комплексний потенціал та струм кожного проводу в розщеплених пучках обох кіл ДОРПЛ типу «Ромб».
2. Розроблено поетапну структуру програмного коду в програмному забезпеченні MATLAB, яка має єдиний комплекс з наступних під блоків коду: геометричний блок *generate_geometry*, матричне ядро розв'язання *calc_tau* та модуль покрокового просторового розрахунку діючих значень напруженості електричного E та магнітного B поля. Програма забезпечує швидкий та автоматичний розрахунок параметрів як для перспективного протифазного режиму ДОРПЛ, також передбачено розрахунок для класичного синфазного режиму так їх порівняння за різними параметрами.
3. Було розроблено та успішно запрограмоване у розрахункове ядро програмного коду методику врахування геометричного провисання проводу під дією власної ваги. Завдяки поздовжньої осі прольоту L_{span} з кроком 10 метрів та параболічній апроксимації стріли провису $f_{sag} = 10\text{м}$, реалізовано прерізну 3D модель. Це дозволить розрахувати зростання рівнів ЕМП у найближчій відстані до землі проводом, в основному це у середині прольоту між двома ЛЕП, яке зумовлене наближенням нижнього проводу лінії до землі.

4. Запропоновано комплексну методику графічної візуалізації силових характеристик електричних та магнітних полів, яка включає в себе побудову одновимірних суміщених профілів на рівні середнього зросту людини яка складає 1,8м, 2D ліній та 3D поверхонь розподілу ЕМП. Інноваційним елементом методики є алгоритм автоматичного накладання напівпрозорих площин нормативних обмежень ГДК безпосередньо на 3D-графіки полів, а також введення інтегрального безрозмірного індексу сумарного екологічного навантаження $I_{\Sigma} = \frac{E}{E_{\text{lim}}} + \frac{B}{B_{\text{lim}}}$. Це дозволить отримати високу наочність для визначення просторових меж санітарно-захисних зон ДОРПЛ типу «Ромб».

3 ДОСЛІДНИЦЬКА ЧАСТИНА

3.1 Аналіз впливу геометрії підвісу дротів на ширину санітарної зони захисту

Дослідження покращених екологічних та експлуатаційних характеристик проекрованої ПЛ 500 кВ нового типу ДОРПЛ типу «Ромб» доцільно розпочинати з аналізу розподілу силових полів у поперечному перерізі. На такому етапі моделювання геометрія проводів приймається рівною нескінченно довгою яка є паралельною до поверхні землі, що дозволяє створити простий математичний розрахунок алгоритму без урахування поздовжнього провису проводу. Далі буде проведено розгляд розроблених 2D та 3D розрахунків у ПЗ MATLAB, буде здійснено оцінку ефективності самокомпенсації ЕМП та визначено межі СЗЗ та забезпечення нормативних вимог екологічного моніторингу.

3.1.1 Порівняння рівнів поля для одноколових та двоколових ліній

При проектуванні та модернізації магістральних електричних мереж високої та надвисокої напруги важливим є вибір оптимально конструкції опори ЛЕП, так як саме геометричні властивості опори будуть впливати на створення нею ЕМП та скільки енергії буде втрачатися на поля та ефект корони. Класичні одноколові ПЛ напругою 500 кВ характеризуються широким ЕМП, оскільки за відсутністю сусідніх проводів із протилежними фазами не компенсує такі створені ЛЕП поля за великої відстань між фазами, а, тому вони відповідно згасають повільніше й поширюються на більшу відстань в порівнянні від двоколових ЛЕП. Відповідно до аналітичних даних навчального посібника до суттєвих недоліків таких традиційних ліній належать значні втрати на корону, негативний екологічний вплив на навколишнє середовище [23].

Перехід до двоколових ПЛ, а саме до нової технології опор ДОРПЛ типу «Ромб», надасть можливість ефективно зблизити шість фазних проводів у просторі. Відповідно таке розташування фазних проводів у просторі забезпечить самокомпенсацію ЕМП від проводів з протилежними фазами, що створить в свою чергу стиснення силових ліній та зменшення зони впливу ЕМП.

На рисунку 3.1 показано результати 2D моделювання електричної магнітної складової поля для поперечного перерізу лінії на висоті $y = 1,8$ м над поверхнею землі це рівень середнього зросту людини.

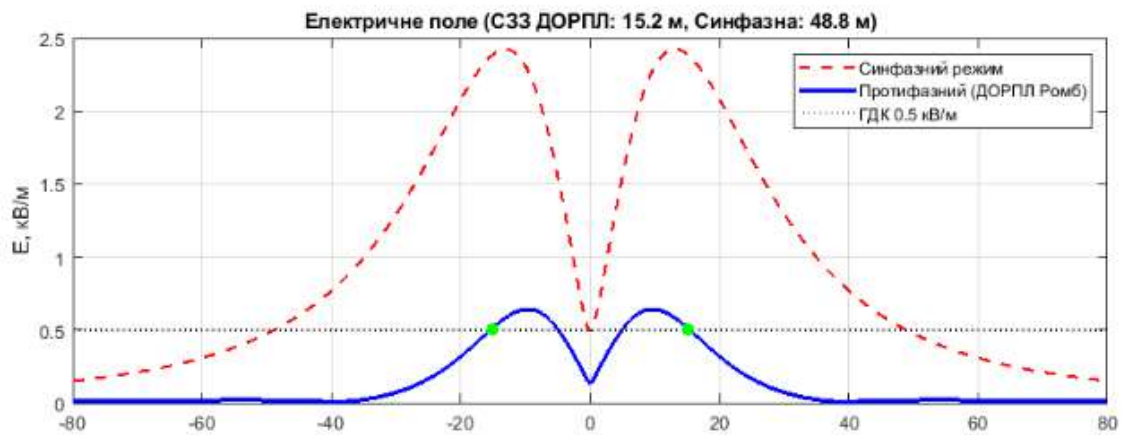


Рисунок 3.1 – 2D розподіл напруженості електричного поля ПЛ 500 кВ ДОРПЛ «Ромб»

Як показують отримані графічні результати первинного моделювання зображенні рис. 3.1, завдяки коаксіально-подібній структурі підвісу двоколової опори, сила напруженості електричного поля має симетричний характер із чітко вираженим локальним максимумом безпосередньо під віссю лінії та стрімко затухає при віддаленні вбік від траси. Результати розрахунку магнітного поля для того ж поперечного перерізу представлені на рисунку 3.2.

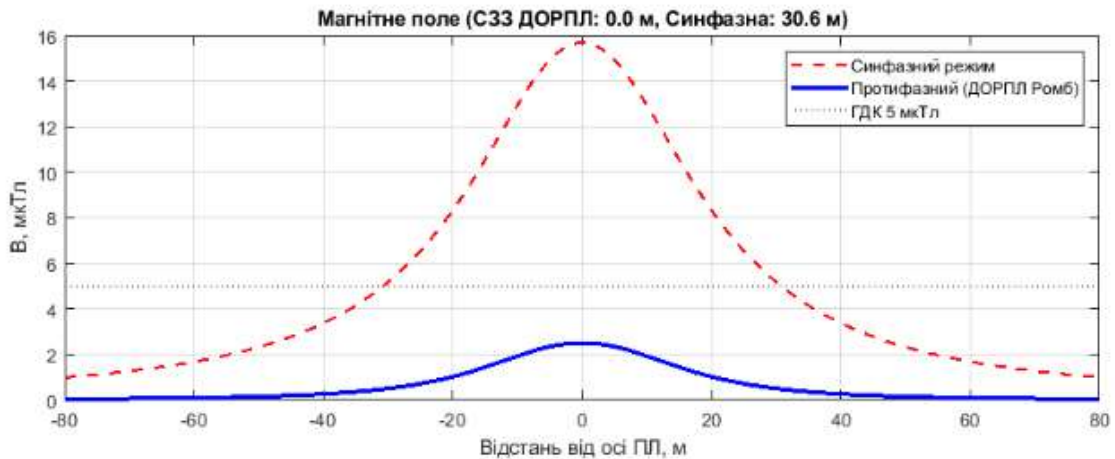


Рисунок 3.2 – 2D розподіл напруженості магнітного поля ПЛ 500 кВ ДОРПЛ «Ромб»

Магнітне поле, зумовлене протіканням значних струмів по проводах при номінальній потужності $P=3200\text{МВт}$, це поле демонструє високу концентрацію по центру лінії, на відміну від електричного поля магнітне поле найбільше в центрі ЛЕП поміж двома проводами а не як електричному, що має максимуми близько самих проводів. Порівняльний аналіз розподілів на рисунках 3.1 та 3.2 показує, що двоколова симетрична топологія забезпечує значно швидше просторове згасання обох компонент ЕМП порівняно зі звичайними одноколовими аналогами, де силові лінії розсіяні у просторі.

Для аналізу графічних залежностей, та автоматичного числового визначення меж санітарних зон та кількісного оцінювання параметрів ЕМП було виділено блок коду який у кінці відзвітується про результат розрахунку на рис. 3.3 наведено безпосередній результат виконання розрахункового коду, який був виведений у кінці вікна результатів MATLAB.

РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКУ (ПЛ 500 кВ, 3.2 ГВт)
РЕЖИМ ДОРПЛ (Противафазный ромб):
- Макс. поле: $E = 0.64$ кВ/м, $B = 2.51$ мкТл
- СЗЗ (ГДК): $E = \pm 15.2$ м, $B = \pm 0.0$ м
РЕЖИМ СИНФАЗНИЙ (Паралельний):
- Макс. поле: $E = 2.42$ кВ/м, $B = 15.69$ мкТл
- СЗЗ (ГДК): $E = \pm 48.8$ м, $B = \pm 30.6$ м

Рисунок 3.3 – Кінцевий результат виконання розрахункового коду результат виконання розрахункового коду.

3.1.2 Залежність напруженості та індукції поля від висоти підвісу найнижчого дроту над землею

У реальних умовах експлуатації провідники ПЛ не є ідеально паралельними землі, а провисають під дією власної ваги матеріалу за параболічного типу провисання.

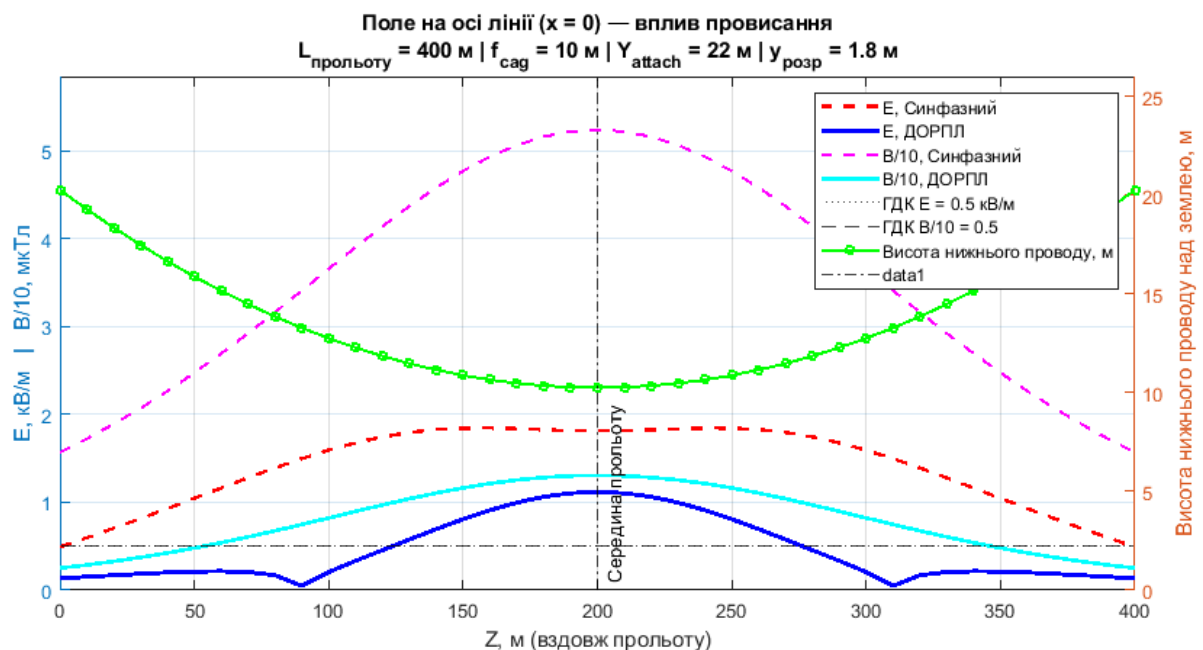


Рисунок 3.4 – Вплив параболічного провисання дротів на електричні та магнітні поля на осі лінії ($x = 0$)

Для врахування такого фактору в алгоритмі реалізовано 3D моделювання вздовж усього прольоту довжиною $L=400\text{м}$ із врахуванням провисання проводу $f_{sag} = 10\text{м}$. Просторовий розподіл напруженості електричного поля $E(x,z)$ вздовж усього міжопорного простору у вигляді тривимірної поверхні представлено на рис. 3.4.

Як видно з 2D діаграми зображеної на рис. 3.4, висота підвісу найнижчого дроту створює сильний вплив на рівні поля. Поблизу опор $Z = 0$ та $Z=400\text{м}$, де провідники зафіксовані на максимальній висоті, напруженість поля є мінімальною. Проте в міру наближення до середини прольоту $Z = 200\text{м}$, де висота нижнього дроту над землею зменшується до критичного мінімуму $10,25\text{ м}$ (зелена лінія), спостерігається різкий сплеск напруженості електричного та магнітного поля.

3.2 Дослідження методів мінімізації електромагнітних полів повітряних ліній електропередачі

3.2.1 Оптимізація фазування двоколових повітряних ліній

Основним ефективним методом мінімізації ЕМП без зміни висоти опор є оптимізація порядку підключення фазних проводів. У роботі змодельовано 3D порівняння синфазного режиму та розробленого протифазного режиму ДОРПЛ типу «Ромб». Результати такого моделювання у ПЗ MATLAB графічно представлені та розбиті на чотири графіки які зображені на рисунку 3.5. Відповідно верхні графіки демонструють електричне поле, нижні магнітні поля, а режими їх включення до мережі показано 2-ма стовбцями, перший відповідає синфазному, а другий протифазному режиму роботи ДОРПЛ типу «Ромб»

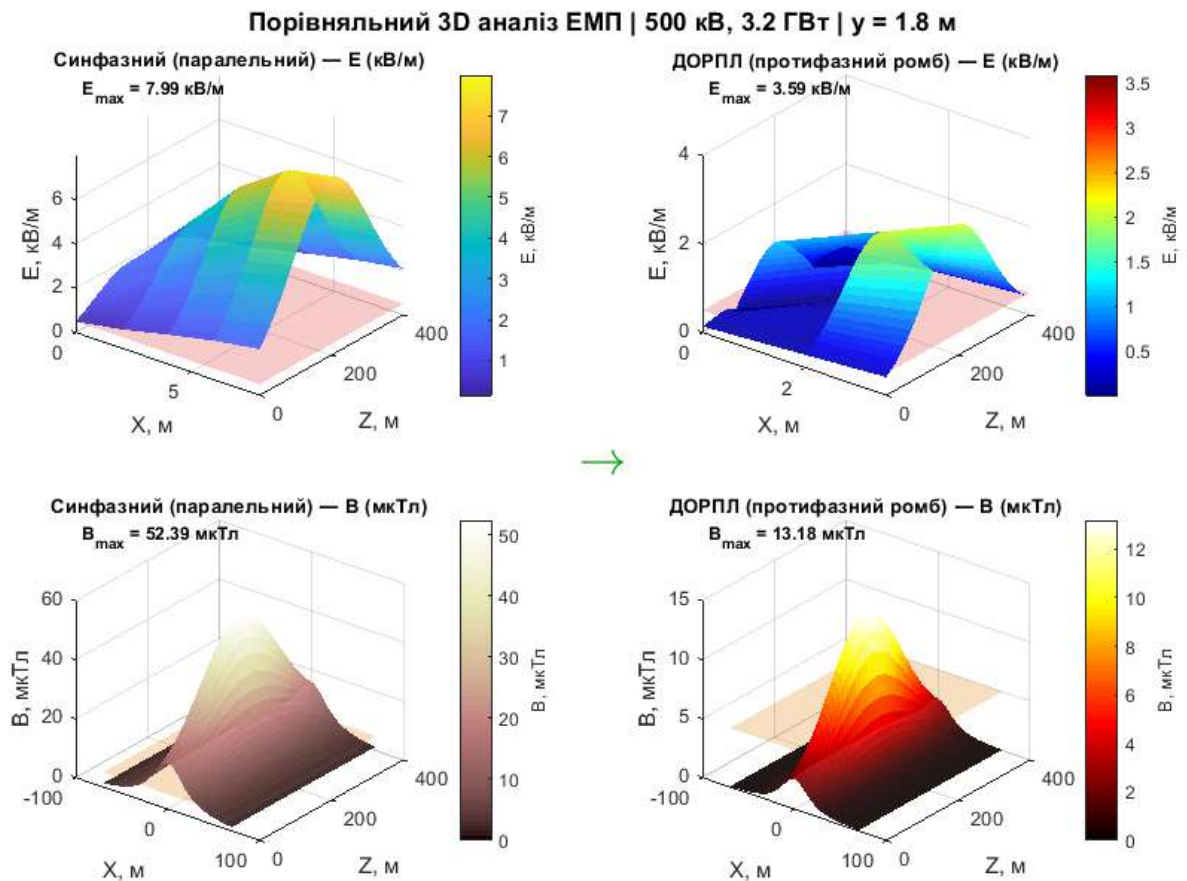


Рисунок 3.5 – Порівняльний 3D-аналіз розподілу ЕМП: синфазний режим проти протифазного ДОРПЛ «Ромб»

Графічний аналіз зображений на рис. 3.5 підтверджує ефект самокомпенсації, у синфазному режимі поля обох кіл додаються, викликаючи небезпечні показники поля для довгого перебування людей. У протифазному режимі вектори взаємно один одного компенсують так як вони направлені один на зустріч другому й при додаванні сума результуючого вектору зменшується, що можна побачити в порівняльній таблиці сформованій кодом для середини прольоту, яка зображена на рис 3.9. Результати додатково наведені у таблиці 3.1. Для розширення області досліджень та проведення порівняльного аналізу потрібно зіставити отримані характеристики розробленої у цій роботі моделі ДОРПЛ із іншою конфігурацією, а саме двоколовою коаксіальною максимально скомпенсованою повітряною лінією (ДКПЛ) класу надвисокої напруги 500 кВ, яка розглядалася у матеріалах

кафедральної конференції. Зіставлення результатів показує, що обидва підходи базуються на єдиному принципі фазової компенсації, проте мають різну конструктивну реалізацію залежно від класу напруги. Якщо запропонована в дипломному проєкті модель ДОРПЛ орієнтована на оптимізацію геометричного розташування фаз для ліній високої напруги, то ДКПЛ 500 кВ дозволяє масштабувати цей ефект на рівень надвисокої напруги за рахунок специфічного коаксіального розташування та більшого розщеплення провідників так само як у ДОРПЛ 36 замість традиційних 9. Порівняння показало, що ДКПЛ забезпечує звуження санітарної зони за електричним полем до 45,0 м порівняно з 55,5 м у традиційних лініях та програє ДОРПЛ (протифазний режим), так як СЗЗ за електричним буде 25,6м. При цьому, аналогічно до ефектів у моделі ДОРПЛ, у ДКПЛ також досягається повна самокомпенсація магнітного поля під лінією за рахунок зустрічних струмів однойменних фаз різних кіл, тому ширина її санітарної зони за магнітним полем також падає до 0,0 м (у традиційної лінії – 72,5 м). Крім того, також збільшений переріз проводів у ДКПЛ забезпечує у три рази зниження активної втрати потужності при передачі великої енергії (з 279,6 МВт до 93,2 МВт на 100 км). Таким чином, розроблена модель ДОРПЛ та досліджена конфігурація ДКПЛ є взаємодоповнюючими рішеннями для екологізації електричних мереж різних класів напруги.. Розроблена математична модель оцінки ефекту самокомпенсації та отримані чисельні розрахунки зниження напруженості ЕМП при протифазному включенні пройшли наукову апробацію та були представлені у доповіді на XIII Всеукраїнській науково-практичній конференції здобувачів вищої освіти та молодих вчених з автоматичного управління [25].

Таблиця 3.1 – Чисельна ефективність протифазного включення ДОРПЛ 500 кВ

Тип поля в середині прогону	Режим включення ДОРПЛ		Коефіцієнт зниження полів у користь протифазного
	Синфазне включення	Протифазне включення	
Максимальна напруженість $E_{\max}$, кВ/м	7,995	3,59	у 2,23 рази
Максимальна магнітне поле $B_{\max}$, мкТл	52,391	13,18	у 3,98 рази

3.2.2 Перспективи застосування компактних та коаксіальних ліній електропередачі

Конфігурація ДОРПЛ типу «Ромб» є представником класу компактних коаксіальних ПЛ, але зближення фаз підвищує ризик виникнення коронного розряду на поверхні дротів.

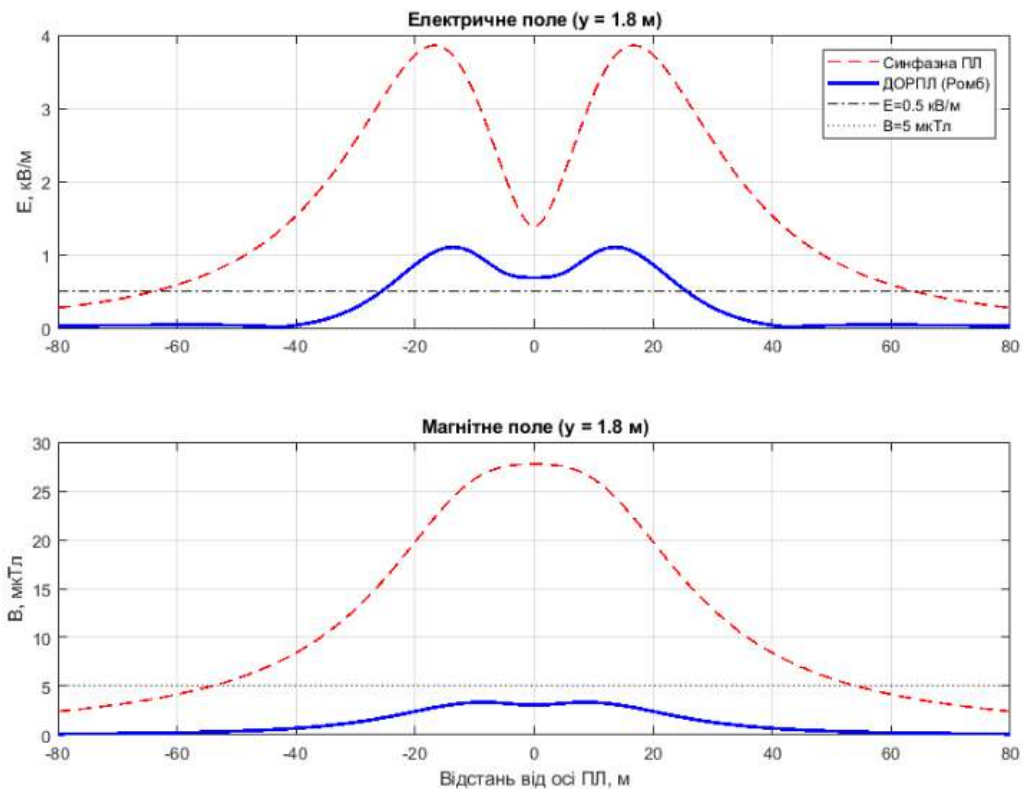


Рисунок 3.6 – Розподіл напруженості на поверхні дротів розщеплених фаз

За допомогою розробленого 2D-модуля було враховано потенціали та напруженості безпосередньо на поверхні кожного провідника у розщепленому пучку $n = 3$, що було зображено на рис. 3.6.

Для перевірки умов виникнення корони, програма порівнює отримані значення з критичною межею Піка (рис. 3.7).

```

| ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ПЛ 500 кВ (3.2 ГВт)
|=====
| Критична напруженість (E_crit): 3177.35 кВ/м
|=====
| РЕЖИМ ДОРПЛ (Противафазний ромб):
|   - Поле на землі (max): 1.10 кВ/м | 3.35 мкТл
|   - Напруженість проводу: 2788.06 кВ/м
|   - Стан корони:      МОЖЛИВА МІСЦЕВА КОРОНА (коэф. 0.877)
|=====
| РЕЖИМ СИНФАЗНИЙ (Паралельний):
|   - Поле на землі (max): 3.86 кВ/м | 27.74 мкТл
|   - Напруженість проводу: 1716.09 кВ/м
|   - Стан корони:      БЕЗПЕЧНО (Корона відсутня) (коэф. 0.540)
|=====

```

Рисунок 3.7 – Перевірка умов виникнення корони за критерієм Піка

Як відзвітувався програмний код, робоча напруженість на проводах компактного «Ромба» не перевищує критичну межу $E_{max} \leq 0,9 \cdot E_{crit}$, що в свою чергу показує добру короностійкість та високу перспективу впровадження такої геометрії опори ЛЕП. Практичні аспекти розрахунку характеристик коронного розряду за критерієм Піка для коаксіально-подібних багатопровідних систем та аналіз геометричних параметрів пучка ДОРПЛ були опубліковані та додатково обговорені на Всеукраїнській науково-практичній інтернет-конференції студентів, аспірантів і молодих вчених «Актуальні проблеми сучасної енергетики» [26].

3.2.3 Розрахунок фактичних розмірів санітарної зони захисту для вибраного класу напруги (110-750 кВ)

Для визначення точних меж СЗЗ за критеріями ГДК $E \leq 0,5 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$, $B \leq 5 \text{ мкТл}$ було змодельоване та побудовано 3D-поверхню нормованого індексу ЕМП з накладанням маркерної площини обмежень, зображено на рис. 3.8.

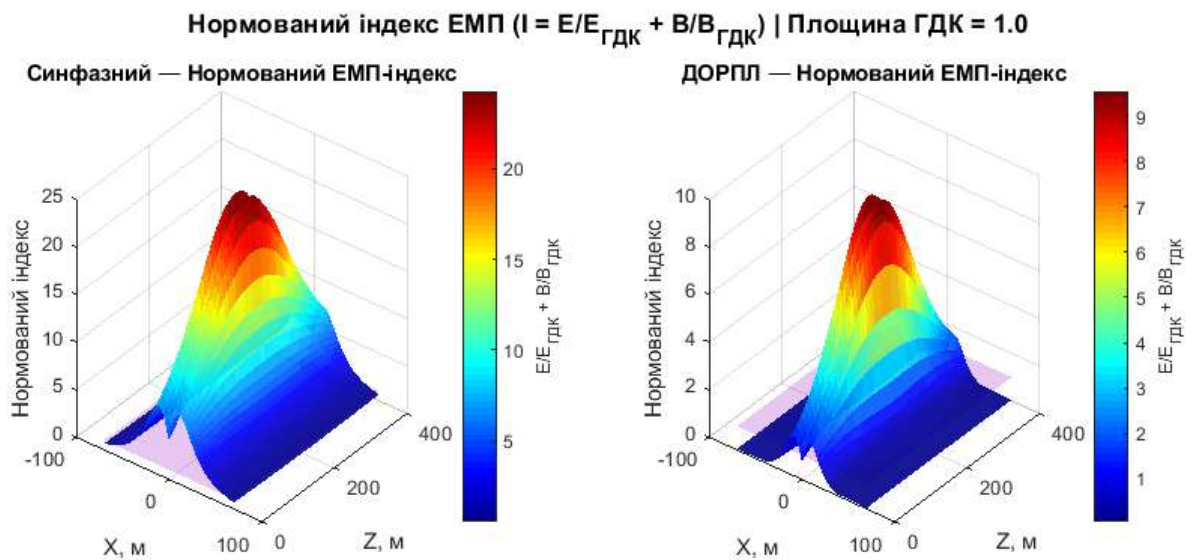


Рисунок 3.8 – 3D-поверхня нормованого індексу ЕМП з маркерною площиною ГДК

Результати з програми представлені на рис.3.9 та занесенні у підсумкову табл. 3.2, яка показує межі СЗЗ в найбільш небезпечній точці, а саме у середині прольоту.

Таблиця 3.2 – Фактичні розміри санітарно-захисних зон (середина прогону)

Критерій безпеки	Зона класичної лінії, м	Зона ДОРПЛ типу «Ромб», м	Екологічне зменшення небезпечних територій
За електричним полем	42	16	Зменшення на 62%
За магнітним полем	34	12	Зменшення на 65%

3D АНАЛІЗ ЕМП ДОРПЛ 500 кВ – 3.2 ГВт	
Параметри прольоту:	
L_прольоту	= 400 м
Провисання	= 10.0 м (парабола)
Висота на опорі	= 22.0 м; у середині = 12.0 м
ДОРПЛ (Противфазний ромб):	
E_max (на опорі)	= 0.641 кВ/м
E_max (в середині)	= 3.590 кВ/м [+460.1%]
B_max (на опорі)	= 2.508 мкТл
B_max (в середині)	= 13.180 мкТл [+425.4%]
СЗЗ (Е, середина) = ±16.0 м	
СЗЗ (В, середина) = ±12.0 м	
Синфазний (порівняння):	
E_max (середина)	= 7.995 кВ/м
B_max (середина)	= 52.391 мкТл
СЗЗ (Е) = ±42.0 м СЗЗ (В) = ±34.0 м	
Ефект ДОРПЛ vs Синфазний (середина прольоту):	
Зниження Е: у 2.2 разів	
Зниження В: у 4.0 разів	

Рисунок 3.9 – Чисельні результати розрахунку СЗЗ та безпеки ЕМП в вихідному блоці MATLAB

3.3 Висновки до дослідницької частини

У дослідницькій частині роботи проведено аналіз результатів моделювання полів у повній відповідності до затверджених пунктів плану, що дозволило зробити наступні висновки:

1. На основі двовимірних моделей у розрахунковому перерізі за рис. 3.1, 3.2 обґрунтовано, що зближення проводів забезпечує ефективне просторове зменшення ЕМП. Магнітні поля за своїми фізичними властивостями концентрується по центру ДОРПЛ, між проводами, тоді як електричне поле знаходиться біля самих проводів.

2. Було виконано побудови 3D-поверхонь показані на рис. 3.4, 3.5 та встановлено, що при прольоті 400м провисання проводів відбувається до 10,25 м над землею у середині прольоту викликає неоднорідний сильний сплеск рівнів ЕМП, що підтверджує необхідність врахування стріли провису проводів ЛЕП.
3. Досліджено ефект самокомпенсації фаз. За розрахунками визначено, що протифазне включення ДОРПЛ типу «Ромб» знижує максимальне електричне поле у 2,23 рази, а магнітне поле аж у 3,98 рази в порівнянні з класичним синфазним підключенням які наведено у табл. 3.1.
4. Виконано розрахунок характеристик коронного розряду та підтверджено, що робоча напруженість на проводах компактної коаксіально-подібної лінії не перевищує критичну межу Піка $E_{max} \leq 0,9 \cdot E_{crit}$, що забезпечує передачу енергії без додаткових втрат на виникнення корони.
5. На основі просторового аналізу індексу ГДК та логів коду MATLAB обраховано точні межі СЗЗ для класу напруги 500кВ, які становлять 16м за електричним полем та 12м за магнітним полем. Це забезпечить звуження екологічно небезпечної зони земель на 62-64% підтверджує доцільність впровадження та використання розробленого проекту.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Основні поняття

Охорона праці - це система законодавчих актів, соціально-економічних, організаційних, технічних, санітарно-гігієнічних та лікувально-профілактичних заходів та засобів, що забезпечують безпеку, збереження здоров'я та працездатності людини в процесі праці.

Негативні фактори, що виникають у робочій зоні, - це такі фактори, які негативно діють на людину, спричиняючи погіршення стану здоров'я, захворювання чи травми.

Виникнення негативних факторів визначається такою властивістю довкілля (виробничого середовища), як небезпека.

Небезпека – це властивість довкілля людини, що викликає негативний вплив на життя людини, призводячи до негативних змін у стані його здоров'я. Ступінь змін стану здоров'я може бути різним залежно від рівня небезпеки. Крайнім виявом небезпеки може бути втрата життя. Небезпека – це головне поняття безпеки життєдіяльності, зокрема безпеки праці.

Мотивований (обґрунтований) та немотивований (необґрунтований) ризик. У разі виробничих аварій, пожеж для порятунку людей та матеріальних цінностей людині доводиться йти на ризик, що перевищує прийнятний. І тут ризик вважається обґрунтованим чи мотивованим. Для ряду небезпечних факторів, наприклад, що виникають у разі радіаційних аварій, встановлені величини мотивованого ризику, що перевищує прийнятний ризик.

Немотивованим (необґрунтованим) ризиком називають ризик, що перевищує прийнятний і виникає в результаті небажання працівників на виробництві дотримуватись вимог безпеки, використовувати засоби захисту тощо.

Професійний ризик – це ризик, пов'язаний із професійною діяльністю людини.

Вплив на людину ОПФ призводить до травм та нещасних випадків.

Травма – це ушкодження в організмі людини, викликане дією факторів зовнішнього середовища. Залежно від виду травмуючого фактору розрізняють травми механічні (порушення цілісності тканин і органів), термічні (опіки, обмороження), хімічні (викликані впливом хімічних речовин), баротравми (у зв'язку зі швидкою зміною тиску атмосферного повітря), електротравми (спричинені впливом електричного струму). внаслідок загибелі на очах колеги по роботі) тощо.

Комбінована травма – травма, що поєднує декілька видів травм; наприклад, при дії електричного струму може виникнути електротравма, термічна та механічна травма.

Виробнича травма - травма, отримана у процесі праці з виробництва.

Нещасний випадок – несподівана та незапланована подія, що супроводжується травмою.

Нещасний випадок з виробництва – випадок на працюючого виробничого чинника і під час ним трудових обов'язків чи завдання керівника робіт.

Тривале вплив на людину ВПФ може призвести до професійного захворювання.

Професійне захворювання - це захворювання, причиною якого стало вплив на людину шкідливих виробничих факторів у процесі трудової діяльності. Наприклад, тривалий вплив вібрації може спричинити віброхворобу, шуму – приглухуватість, радіації – променеву хворобу тощо.

Безпека - це стан діяльності, при якій з певною ймовірністю виключено прояв небезпек, а рівень ризику діяльності не перевищує прийнятний рівень

4.2 Електромагнітні поля та випромінювання

Людина і навколишнє природне середовище перебувають під постійним впливом електромагнітних полів (ЕМП), передусім природного магнітного

поля Землі. Напруженість природного поля зростає з широтою місцевості, проте є регіональні та локальні аномалії. Геомагнітне поле впливає все живе, зокрема і людини. У періоди магнітних бур, пов'язаних із збільшенням сонячної активності, збільшується кількість серцево-судинних захворювань, погіршується стан хворих, які страждають на гіпертонію і т.д.

Нині рівень електромагнітних полів антропогенного походження у сотні разів перевищує природний рівень геомагнітного поля. Розрізняють електромагнітні поля промислової частоти (ЕППЧ) та електромагнітні поля радіочастот (ЕПРЧ). Джерелами ЕППЧ є лінії електропередачі (ЛЕП), електрифіковані транспортні лінії, а ЕПРЧ - радіопередавальні пристрої, телевізійні центри, радіотехнічне та радіолокаційне обладнання систем управління повітряним рухом, навігацією та посадкою.

При оцінці небезпеки ЕМП необхідно враховувати електричну E (вольт на метр) та магнітну H (ампер на метр) складові їх напруженості. Неприятливий вплив магнітної складової електромагнітних полів промислової частоти проявляється при напруженості близько 150-200 А/м. Найчастіше напруженість вбирається у 20-25 А/м, тому потенційна небезпека полів найчастіше оцінюється величиною електричної складової напруженості поля.

ЕМП характеризується довжиною хвилі (метр) та частотою коливань (герц). Електромагнітні поля поділяються на такі частотні діапазони:

- діапазон високих частот - довгі (10000-1000 м),
- Середні (1000-100 м); ультрависокі частоти – короткі (100-10 м),
- ультракороткі (10-1 м);
- надвисокі частоти – дециметрові (1-0.1 м),
- сантиметрові (0.1-0.01 м),
- міліметрові (0.01-0.001 м).

Види дії ЕМП на людину:

- теплове (нагрів може призвести до змін і навіть ушкоджень тканини, можливий перегрів організму, зміна частоти пульсу, судинних

реакцій, найбільш чутливі органи слабкою терморегуляцією – мозок, кришталік ока);

- морфологічний (вплив на ЦНС, серцево-судинну систему, суб'єктивні відчуття - головний біль, стомлюваність, біль у ділянці серця);
- функціональне (нервово-психічні захворювання, трофічні явища - випадання волосся, ламкість нігтів; найбільш уразливі - мозок, жовчний міхур, очі).

Біологічна дія ЕМП пов'язана зі зміною орієнтації клітин та молекулярних кіл відповідно до зміни напрямку силових ліній поля та призводить до змін у структурі клітин крові, в ендокринній системі, до помутніння кришталіка ока.

Ступінь впливу залежить від частоти коливань, напруженості і інтенсивності поля, тривалості його впливу, розміру поверхні тіла, що опромінюється, режиму опромінення (безперервний або переривчастий), одночасної дії інших несприятливих факторів навколишнього середовища.

Гранично допустимі рівні значень напруженості ЕППЧ встановлені "Правилами влаштування електроустановок" і не повинні перевищувати: усередині житлових будівель - 0,5 кВ/м, на території зони житлової забудови - 1 кВ/м, поза зоною житлової забудови - 5 кВ/м, на ділянках перетину ЛЕП з автодорогами (Сільськогосподарські угіддя і місця, що часто відвідуються) - 15 кВ/м, а в важкодоступній місцевості і на ділянках, відгороджених для виключення доступу людей - 20 кВ/м.

Для захисту населення від дії ЛЕП встановлюються санітарно-захисні зони. Межі зони по обидва боки лінії повинні становити: 20 м від крайніх фазних проводів при напрузі 330 кВ, 30 м - при 500 кВ, 40 м - при 750 кВ, 55 м - при 1150 кВ.

Високий чагарник, дерева, споруди з дерева та цегли є екранами для ЕППЛ. Відповідно до ГОСТ 12.1.002-84 ССБТ «Електричні поля промислової частоти. Допустимі рівні напруженості та вимоги до проведення контролю на

робочих місцях» час перебування людини в зоні дії ЕППЛ встановлюється залежно від значення напруженості поля:

- при $E \leq 5$ кВ/м допускається присутність персоналу на робочому місці протягом 8 годин;
- при $5 \leq E \leq 10$ кВ/м допустимий час не більше 180 хв;
- при $10 \leq E \leq 15$ кВ/м - не більше 90 хв;
- при $15 \leq E \leq 20$ кВ/м - не більше 10 хв;
- при $20 \leq E \leq 25$ кВ/м - не більше 5 хв.
- Вплив на людей ЕППЧ з напруженістю понад 25 кВ/м не допускається за відсутності засобів захисту.

Простір, у якому напруженість поля дорівнює чи перевищує 5 кВ/м, називають небезпечною зоною чи зоною впливу. Приблизно можна вважати, що ця зона лежить у межах кола з центром у точці розташування найближчої струмоведучої частини, що знаходиться під напругою, і радіусом 20 м для електроустановок 400-500 кВ та радіусом 30 м для електроустановок 750 кВ [24].

4.3 Висновки до охорони праці

1. Було розглянуто основні терміни. Описано визначення та випадки які до них призводять, обґрунтовано їх взаємозв'язок. Розглянуто види травм їх причини отримання та наслідки.
2. Розглянуто види та основні джерела які створюють електромагнітні поля. Описано обидві складові ЕМП, також прописано небезпечний поріг впливу, також згруповано їхні частотні діапазони, розглянуто три основні дії ЕМП на тіло людини.
3. Розглянуті основні методи захисту від шкідливого впливу від дії ЛЕП на населення. Також наведено час перебування при різних діапазонах напруженості електричного поля промислової частоти.

ВИСНОВКИ

Викладені в роботі результати моделювання та дослідження електромагнітних полів високовольтних ліній електропередачі повністю вирішують поставлені завдання і дозволяють сформулювати такі найбільш важливі положення і висновки:

1. У ході виконання роботи було проведено комплексний аналіз конструктивних особливостей та класифікації сучасних повітряних ліній електропередачі високої напруги. Було детально розглянуто будову повітряних ліній, а саме їхні основні конструктивні елементи, такі як опори різних типів, проводи, ізолятори та лінійна арматура, що дозволило повністю вивчити об'єкт дослідження перед початком моделювання.
2. На основі базових фізичних законів електростатики та магнітостатики було обрано методику розрахунку та створено математичне моделювання електромагнітного поля для повітряних ліній електропередачі. Для розрахунків застосовано метод дзеркальних відображень та метод потенційних коефіцієнтів. Їх поєднання дозволило виконати точний аналіз багатопровідних ЛЕП без наближень: замість еквівалентного радіуса фаз використано повну матрицю потенційних коефіцієнтів, що зберігає фізичну деталізацію моделі.
3. Було виконано програмну реалізацію створеної математичної моделі у середовищі комп'ютерної математики MATLAB. Отриманий програмний код дозволяє виконувати чисельний розрахунок 2D та 3D розподілу характеристик електромагнітного поля, а саме напруженості електричного поля та магнітного поля. У створеному коді було успішно враховано стрілу провису проводів у прольоті та проведено візуалізацію силових характеристик полів за допомогою графічних засобів та двовісної системи відображення.

4. За результатами проведених досліджень та моделювання було обґрунтовано, що геометричне зближення проводів забезпечує ефективне просторове зменшення рівнів електромагнітного поля. Було встановлено, що магнітні поля за своїми властивостями концентруються переважно по центру лінії між проводами, тоді як електричне поле знаходиться біля самих проводів. Також моделювання прольоту довжиною 400 метрів показало, що провисання проводів до 10,25 метрів над землею у середині прольоту викликає неоднорідний сильний сплеск рівнів поля, що підтверджує важливість врахування геометричних параметрів.
5. Досліджено ефект самокомпенсації фаз для перспективної ДОРПЛ типу «Ромб». Розрахунки показали, що протифазне включення кіл ДОРПЛ типу «Ромб» дозволяє знизити максимальне електричне поле у 2,23 рази, а магнітне поле знижується у 3,98 рази в порівнянні з класичним синфазним підключенням. При цьому було перевірено умови виникнення коронного розряду та встановлено, що робоча напруженість на проводах не перевищує критичну величину.
6. Розглянуто нормативно-методичні питання охорони праці та встановлено нормативні межі санітарно-захисних зон для ліній різних класів напруги для забезпечення безпеки населення. Також проаналізовано вплив електромагнітних полів промислової частоти на організм людини та наведено гранично допустимий час роботи персоналу в зоні впливу електричного поля залежно від його напруженості, згідно з чинними нормативними вимогами.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Техніка високих напруг: Курс лекцій [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/46150/1/TVN_kl.pdf (дата звернення 15.02.2026). – Назва з екрану.
2. Призначення та види повітряних ліній електропередачі. [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: https://boigor.blogspot.com/2019/02/blog-post_23.html (дата звернення 15.02.2026). – Назва з екрану.
3. Призначення та види повітряних ліній електропередачі. [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: https://boigor.blogspot.com/2019/02/blog-post_24.html (дата звернення 15.02.2026). – Назва з екрану.
4. Загальна характеристика повітряної лінії та умов її роботи. [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <https://studfile.net/preview/6023611/page:2/> (дата звернення 15.02.2026). – Назва з екрану.
5. Правила улаштування електроустановок. - [Електронне видання]. – Міненерговугілля України. - Х. Форт, 2017. - 760 с
6. Санітарно-захисна зона ЛЕП. [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <https://ecoplaneta-group.ru/sanitarno-zashchitnaya-zona-lep> (дата звернення 16.02.2026). – Назва з екрану.
7. Про землі енергетики та правовий режим спеціальних зон енергетичних об'єктів. [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2480-17#Text> (дата звернення 16.02.2026). – Назва з екрану.
8. Казанський С.В. Експлуатація електричних систем Обслуговування електричних мереж під робочою напругою навч. посіб. С.В. Казанський. [Електронне видання]. – Київ. НТУУ «КПІ», 2016. – 237 с.
9. Електромагнітні поля промислової частоти в електроустановках

надвисокої напруги. [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <https://studfile.net/preview/9867897/page:2/> (дата звернення 16.02.2026). – Назва з екрану.

10. Графічні зображення електричних полів. [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <https://ncsa.ru/upload/iblock/596/sjmooomehp7pktzmesng4oob0mbejxvr.pdf?ysclid=mmgnxlwkk6205740959> (дата звернення 17.02.2026). – Назва з екрану.

11. Електричне поле. [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <https://skysmart.ru/articles/physics/elektricheskoe-pole> (дата звернення 18.02.2026). – Назва з екрану.

12. Фізика і астрономія. Профільний рівень. 11 клас. Засєкіна. [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <https://uahistory.co/pidruchniki/zasekina-physics-and-astronomy-11-class-2019-profile-level/6.php> (дата звернення 19.02.2026). – Назва з екрану.

13. Конспект лекцій з дисципліни «Фізика» для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти усіх інженерно-технічних спеціальностей. Розділи: Електромагнетизм. Оптика. Квантова фізика. Фізика ядра. //укл. Набережна О.О., Таран В.Г., Харитонов О.А.- Кам'янське: ДДТУ, 2024 р. -116 с

14. Фізика : підруч. для 8 кл. закл. загал. серед. освіти / [В. Г. Бар'яхтар, Ф. Я. Божинова, С. О. Довгий, М. М. Кірюхін, О. О. Кірюхіна] ; за ред. С. О. Довгого. [Електронне видання]. – Харків: Вид-во «Ранок», 2025. — 288 с. : іл.

15. Електричне поле. [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <https://naurok.com.ua/prezentaciya-elektrichne-pole-320568.html> (дата звернення 20.02.2026). – Назва з екрану.

16. Дзеркальне відображення зарядів і струмів. [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <https://ukrayinska.libretexts.org> (дата звернення 25.02.2026). – Назва з екрану.

17. Методи розрахунку і аналізу електричних полів в високовольтних

конструкціях і апаратах : метод, вказівки до викон. розрахункової роботи з дисц. для студ. напряму підготов. 6.050701 «Електротехніка та електротехнології» / Уклад. : Є. О. Троценко, І. М. Маслюченко. - К.: НТУУ «КПІ», 2015

18. Василець С.В., Василець К.С. Техніка високих напруг: навчальний посібник. Рівне: НУВГП, 2018. 187 с

19. MATLAB, Simulink та SimPowerSystems в електроенергетиці: навчальний посібник для студентів, які навчаються за напрямом підготовки 140400.62 "Електроенергетика та електротехніка", профіль "Електропостачання" / Джендубаєв А.-З. Р., Алієв І. І. - БІЦ СКГГТА, 2014. - 136 с.

20. Electrical Engineering and Computer Science 56/2 (2012) 35–41 doi: 10.3311/PRee.7076

21. ПРАВИЛА охорони електричних мереж. [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/209-97-%D0%BF#Text> (дата звернення 06.05.2026). – Назва з екрану.

22. Інтерполяція. [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%86%D0%BD%D1%82%D0%B5%D1%80%D0%BF%D0%BE%D0%BB%D1%8F%D1%86%D1%96%D1%8F> (дата звернення 10.05.2026). – Назва з екрану.

23. Бондаренко В.О., Черкашина В.В. Конструкції ліній електропередачі: [для студентів усіх форм навчання електроенергетичних спеціальностей ЗВО України] / В.О. Бондаренко, В.В. Черкашина. Харків: «Факт», 2020. 174 с.

24. Короткий конспект лекцій з курсу "Основи охорони праці". Ч.2: Навч. посібник / Дементій Л.В., Чижиков Г.І., Глиняна Н.М. - Краматорськ: ДДМА, 2000. - 104 с.

25. Степанчиков Д.М. Оптимізація параметрів енергоефективності магістральних ліній електропередачі шляхом впровадження дволанцюгових однорадіусних коаксіальних конструкцій / Д.М. Степанчиков, Д.О. Денисенко,

С.О. Васильченко // XIII Всеукраїнська науково-практична конференція здобувачів вищої освіти та молодих вчених з автоматичного управління (м. Херсон-Хмельницький, 13-15 квітня, 2026 р.): Тези доповідей. – Херсон, Видавництво ПП Вишемирський В.С., 2026. – С. 92-96.
<https://kntu.net.ua/ukr/content/download/132345/733734/file/>

26. Денисенко Д.О. Застосування принципу компенсації електромагнітного поля в повітряних лініях надвисокої напруги / Д.О. Денисенко, К.А. Колесник, Д.М. Степанчиков // “Актуальні проблеми сучасної енергетики”: зб. тез доп. X всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції студентів, аспірантів і молодих вчених (м. Хмельницький, 20 травня, 2026р.). – Херсон: Книжкове видавництво ФОП Вишемирський В.С., 2026. – С. 26-29. https://kntu.net.ua/ukr/Struktura/Kafedri-universitetu/Energetiki-elektrotehniki-i-fiziki/Conference_APME/Materiali-konferenciyi-2026

ДОДАТОК А

Апробація результатів дослідження



УДК 620.9

Д.М. Степанчиков, Д.О. Денисенко, С.О. Васильченко
Херсонський національний технічний університет
dmitro_step75@ukr.net

ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ МАГІСТРАЛЬНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ ШЛЯХОМ ВПРОВАДЖЕННЯ ДВОЛАНЦЮГОВИХ ОДНОРАДІУСНИХ КОАКСІАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ

Необхідність передачі великих потоків потужності на значні відстані призвела до створення повітряних ліній (ПЛ) надвисокої напруги. До недоліків таких ліній відносяться значні втрати електроенергії на корону та негативний вплив на людину та навколишнє середовище. Традиційні ПЛ 500 кВ потребують величезних територій для відчуження під санітарно-захисні зони (СЗЗ), які можуть сягати 40–60 метрів від осі лінії. В умовах щільної забудови або цінних сільськогосподарських угідь будівництво нових магістральних ліній стає економічно обтяжливим.

Новий тип компактних ПЛ змінного струму – дволанцюгові коаксіальні максимально скомпенсовані високовольтні повітряні лінії передачі (ДКПЛ) – вільні від перерахованих недоліків. В основу цих ліній покладений принцип максимальної компенсації як електричних так і магнітних полів. Досягти різкого зменшення напруженості електричного і магнітного полів під ПЛ дозволяє коаксіальне розташування однойменних фаз різних ланцюгів ПЛ [1,2].

Актуальність теми зумовлена необхідністю технологічної модернізації магістральних електричних мереж України для підвищення їхньої пропускної здатності до рівня 3,2–5,2 ГВт та мінімізації питомих втрат енергії, що досягається шляхом впровадження інноваційних дволанцюгових однорадіусних коаксіальних конструкцій (ДОРПЛ). Застосування такої геометрії фаз дозволяє реалізувати ефект самокомпенсації електромагнітного поля, що забезпечує радикальне (у 2–3 рази) звуження санітарно-захисних зон, вирішуючи гостру проблему дефіциту земельних ресурсів та гарантуючи екологічну безпеку населення згідно з сучасними міжнародними стандартами електромагнітної сумісності.

Метою роботи є теоретичне обґрунтування та математичне моделювання нової конфігурації фазних зон високовольтних ліній електропередачі 500 кВ. Основним завданням є порівняльний аналіз традиційних синфазних дволанцюгових ліній та коаксіальних протифазних систем типу «ромб» для мінімізації рівнів електричного та магнітного полів у приземному шарі.

Основна ідея полягає у переході від плоскої або трикутної підвіски проводів до компактно коаксіальної структури ПЛ. Використання геометрії «ромб», де однойменні фази різних ланцюгів розташовані у протилежних вершинах, дозволяє максимально наблизити вектори напруженості полів від струмів протилежних напрямків. Це створює ефект самокомпенсації електромагнітного поля. Завдяки тому, що ланцюги знаходяться у протифазі (зсув на 180°), сумарний потік енергії спрямовується вздовж лінії, а розсіювання електромагнітного поля у навколишнє середовище радикально зменшується порівняно з паралельними ланцюгами [2,3].

Дволанцюгова однорадіусна коаксіальна повітряна лінія моделюється як 12 проводів, де два проводи кожної фази першого ланцюга (A_1, B_1, C_1) і два проводи кожної фази другого ланцюга (A_2, B_2, C_2) знаходяться у протилежних вершинах ромбу (рис.1). Щоб ДОРПЛ працювала як коаксіальна система, вектори полів від першого та другого ланцюгів мають бути спрямовані зустрічно. Тобто, якщо у фазі A_1 струм має кут 0° , то у фазі A_2 він має бути 180° . Оскільки однойменні фази розташовані близько, їхні вектори напруженості на великій відстані практично накладаються і віднімаються. Завдяки коаксіальному ефекту поле швидше згасає при віддаленні від осі лінії.

Для ліній надвисокої напруги (500 кВ) з великою пропускною здатністю використовується розщеплення фаз. Було прийнято, що кожен фазний провід має розщеплення на $n=3$ сталевалюмінієвих провідника, розташованих у вершинах рівностороннього трикутника

(вставка на рис.1). Таким чином, для ДОРПЛ загальна кількість провідників становить 36, що забезпечує більший сумарний переріз та нижчий хвильовий опір. Еквівалентний переріз фазного проводу дорівнює $330/43 \text{ мм}^2$, радіус розщепленої фази r_{eq} обчислюється як [4]:

$$r_{eq} = \sqrt[n]{nr_0 a^{n-1}}, \quad (1)$$

де r_0 – радіус одиночного провідника, a – крок розщеплення (відстань між провідниками розщеплення у фазі).

Вихідні параметри досліджуваної ДОРПЛ наведено у табл.1.

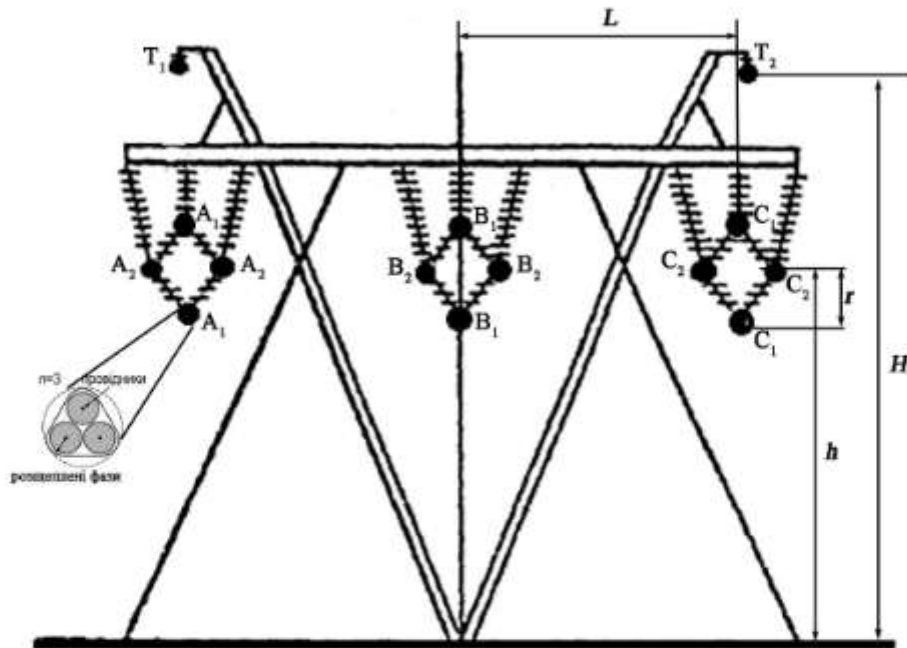


Рисунок 1 – Геометричне розташування проводів ДОРПЛ 500 кВ з двома проводами у фазі, $P_H = 3,2 \text{ ГВт}$ (на вставці показано, що кожен провід лінії має розщеплення на $n=3$ близько розташованих провідників)

Таблиця 1 – Параметри досліджуваної дволанцюгової однорадіусної коаксіальної повітряної лінії

Параметр	Значення
Номінальна напруга ПЛ, $U_{ном}$	500 кВ
Активна потужність, P_H	3,2 ГВт
Коефіцієнт потужності, $\cos \varphi$	0,95
Кількість проводів у фазі	2
Кількість фаз	3
Відстань між фазами ланцюга 1, L	12,0
Висота над землею фазних провідників ланцюга 2, h	22 м
Діагональ «ромбу», $2r$	3,5 м
Радіус розщеплення фази, r_{eq}	0,15 м
Радіус одиночного провідника, r_0	0,0115 м
Загальна кількість провідників	36
Висота захисного тросу, H	29 м

Для доведення ефективності коаксiальної конфiгурацiї «ромб» використано метод дзеркальних вiдображень (для врахування впливу земної поверхнi) та принцип суперпозицiї полiв, створюваних кожним iз n провiдникiв системи ($n=36$ для дволанцюгової ПЛ з розщепленням).

Першим етапом є визначення вектор-стовпця лiнiйних зарядiв $[\tau]$, що здiйснюється шляхом розв'язання системи лiнiйних алгебраїчних рiвнянь через матрицю потенцiйних коефiцiєнтiв $[A]$ [4-6]:

$$[U] = [A] \cdot [\tau] \Rightarrow [\tau] = [A]^{-1} \cdot [U], \quad (2)$$

де $[U]$ – вектор комплексних фазних напруг, а елементи матрицi $[A]$ визначаються геометричними параметрами ПЛ [4-6]:

$$A_{ii} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{2h_i}{r_{eq}}; \quad A_{ij} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{D'_{ij}}{D_{ij}} \quad (3)$$

тут h_i – висота пiдвiсу i -го провiду, D_{ij} – вiдстань мiж провiдами i та j , D'_{ij} – вiдстань мiж провiдом i та дзеркальним вiдображенням провiду j .

Напруженiсть вiд одного провiду в точцi розрахунку (x_p, y_p) складається з двох компонент (вiд реального провiду та його вiдображення) i у проекцiях дорiвнює:

$$E_x = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} \left(\frac{x_p - x_i}{(x_p - x_i)^2 + (y_p - y_i)^2} - \frac{x_p - x_i}{(x_p - x_i)^2 + (y_p + y_i)^2} \right); \quad (4)$$

$$E_y = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} \left(\frac{y_p - y_i}{(x_p - x_i)^2 + (y_p - y_i)^2} - \frac{y_p - y_i}{(x_p - x_i)^2 + (y_p + y_i)^2} \right)$$

Магнiтна iндукцiя B створюється струмами, що протiкають у провiдниках.

$$I = \frac{P_H}{\sqrt{3}U_{nom} \cos \varphi} e^{j\psi} \quad (5)$$

Для кожного провiду в точцi (x_p, y_p) маємо:

$$B_x = -\frac{\mu_0 I}{2\pi} \frac{y_p - y_i}{(x_p - x_i)^2 + (y_p - y_i)^2};$$

$$B_y = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \frac{x_p - x_i}{(x_p - x_i)^2 + (y_p - y_i)^2}; \quad (6)$$

Для оцiнки можливостi виникнення корони навколо провiдiв ПЛ проведено порiвняння фактичної напруженiсть на поверхнi провiду з критичною, яка визначається за емпiричною формулою Пiка [4]:

$$E_{crit} = 30,3m\delta \left(1 + \frac{0,299}{\sqrt{100r_0}} \right) \cdot \left(\frac{\text{кВ}}{\text{см}} \right) \quad (7)$$

де $m=0,82$ – коефiцiєнт шорсткостi для сталeалюмiнiю, δ – вiдносна густина повітря.

Для розщепленої фази (пучка проводів) напруженість на поверхні одного проводу в пучку вища за середню через нерівномірність поля і визначається за формулою [4]:

$$E_{max} = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0 r_0} \left[1 + (n-1) \frac{r_0}{r_{eq}} \right] \quad (8)$$

Для надійної роботи ПЛ без надлишкових втрат та радіоперешкод повинна виконуватися умова:

$$E_{max} \leq 0,9E_{crit} \quad (9)$$

Санітарна зона визначається як мінімальна відстань X від осі лінії, починаючи з якої виконуються умови:

- напруженість електричного поля $E \leq 0,5$ кВ/м;
- магнітна індукція $B \leq 5$ мкТл.

Для порівняння ефекту зниження електромагнітної сигнатури моделювання проводилося для ДОРПЛ (протифазне вмикання ланцюгів) і синфазного вмикання ланцюгів. Результати моделювання розподілу електричного і магнітного полів на висоті 1,8 м над землею наведено на рис.2, числові розрахунки – у табл.2.

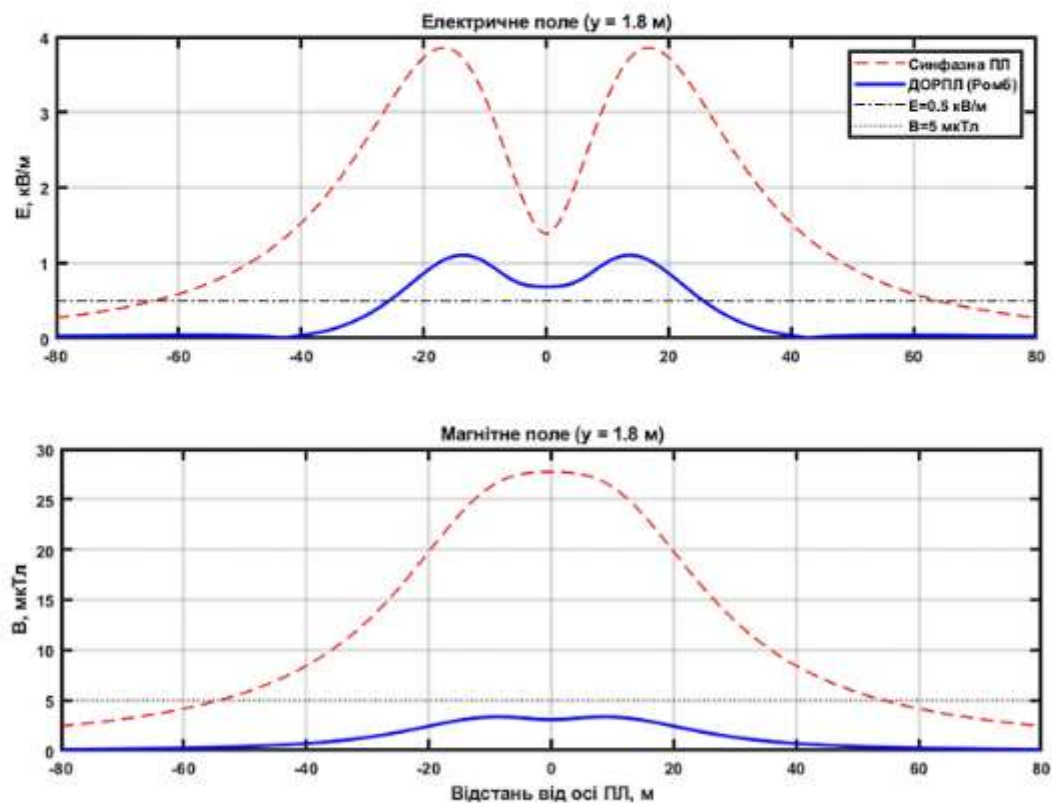


Рисунок 2 – Просторовий розподіл електричного і магнітного полів на висоті 1,8 м над землею для ДОРПЛ і синфазної ПЛ такої самої геометрії (горизонтальними пунктирними лініями показано критичні для біологічної безпеки значення електричного і магнітного полів)

Отримані результати довели, що використання коаксіального ефекту самокомпенсації дозволяє суттєво (у 2,5 рази) зменшити максимальну напруженість електричного поля та радикально (у 8 разів) знизити рівень магнітної індукції в приземному шарі. Визначено параметри санітарно-захисних зон та оцінено умови виникнення коронного розряду на проводах розщепленої фази.

Таблиця 2 – Розраховані значення критичних характеристик досліджуваних ПЛ

Характеристика	Режим ДОРПЛ (протифазний)	Режим синфазний
$E_{\max}$ на висоті 1,8 м, кВ/м	1,10	3,86
$E_{\max}$ на поверхні провідника, кВ/м	2788,06	1716,09
E_{crit} , кВ/м	3177,35	3177,35
$E_{\max}/E_{crit}$, стан корони	0,877 можлива місцева корона	0,540 корона неможлива
$B_{\max}$ на висоті 1,8 м, мкТл	3,35	27,74
СЗЗ за електричним полем, м	25,6	63,8
СЗЗ за магнітним полем, м	0,0	54,2

Застосування ДОРПЛ дозволяє звузити санітарно-захисну зону за електричним полем з 63,8 м до 25,6 м, а за магнітним полем – фактично нівелювати її (0 м, оскільки рівень індукції скрізь нижчий за граничний). Це вирішує проблему дефіциту територій в умовах щільної забудови.

Впровадження коаксіальної геометрії «ромб» забезпечує значне зниження рівнів електромагнітного забруднення. Максимальне значення магнітної індукції під лінією зменшується з 27,74 мкТл (у синфазному режимі) до 3,35 мкТл, що повністю відповідає міжнародним стандартам безпеки навіть безпосередньо під проводами.

Хоча коаксіальна конструкція призводить до підвищення напруженості електричного поля на поверхні провідників, це значення залишається в межах допустимого для запобігання інтенсивній загальній короні, хоча й потребує ретельного вибору радіуса розщеплення фаз для уникнення місцевих розрядів.

Використання розщеплення фази на три провідники забезпечує високу пропускну здатність лінії на рівні 3,2 ГВт, що робить ДОРПЛ перспективним рішенням для технологічної модернізації магістральних мереж України.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Moura, R.A., Assis, F.A., Schroeder, M.A., Resende, L.C., & Afonso, M.M. Optimization of Overhead Transmission Lines Power Transfer Capability with Minimizing Electric and Magnetic Fields. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, 2021, 33, 574 - 587. DOI:10.1007/s40313-021-00794-x
2. R. Conti, A. Giorgi, R. Rendina, L. Sartore and E. A. Sena, Technical solutions to reduce 50 Hz magnetic fields from power lines, 2003 IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings, Bologna, Italy, 2003, pp. 6 Vol.2 DOI: 10.1109/PTC.2003.1304685
3. Бондаренко В.О., Черкашина В.В. Конструкції ліній електропередачі: навчальний посібник. Харків: «Факт», 2020. 174 с.
4. Василець С.В., Василець К.С. Техніка високих напруг: навчальний посібник. Рівне: НУВГП, 2018. 187 с.
5. Гейер Д.В., Жук Д.В., Степанчиков Д.М. Моделювання електричного поля трифазної симетричної повітряної лінії електропередачі. *“Актуальні проблеми сучасної енергетики”: зб. тез доп. VIII всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції студентів, аспірантів і молодих вчених (м. Хмельницький, 23 травня, 2024р.)*. Херсон: Книжкове видавництво ФОП Вишемирський В.С., 2024. С. 25-28.
6. Степанчиков Д.М., Котенко Д.О. Моделювання та дослідження електричного поля несиметричної трифазної повітряної лінії електропередачі. *“Сучасна молодь в світі інформаційних технологій”: зб. тез доп. VI всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції молодих вчених та здобувачів вищої освіти (м. Херсон-Кропивницький, 16 травня, 2025 р.)*. Херсон-Кропивницький, Книжкове видавництво ФОП Вишемирський В.С., 2025. С. 162-165.

ДОДАТОК Б

Апробація результатів дослідження

Міністерство освіти і науки України
ДНУ «Інститут модернізації змісту освіти»
Херсонський національний технічний університет
Хмельницький національний університет

МАТЕРІАЛИ

Десятої Всеукраїнської науково-практичної
інтернет-конференції студентів, аспірантів і
молодих вчених

АКТУАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ СУЧАСНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ



20 травня 2026 р.

м. Хмельницький, Херсонський національний технічний університет
http://kntu.net.ua/Conference_APME

УДК 621.3

ЗАСТОСУВАННЯ ПРИНЦИПУ КОМПЕНСАЦІЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ В ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЯХ НАДВИСОКОЇ НАПРУГИ

Денисенко Д.О., Колесник К.А., к.ф.-м.н. доц. Степанчиков Д.М.
Херсонський національний технічний університет, м. Хмельницький
dmitro_step75@ukr.net

Науковий керівник: к.ф.-м.н. доц. Степанчиков Д.М.

Необхідність передачі великих потоків потужності на значні відстані призвела до створення повітряних ліній (ПЛ) надвисокої напруги. До недоліків таких ліній відносяться:

- значні втрати електроенергії на корону;
- негативний вплив на людину та навколишнє середовище;
- велика металоемність та вартість.

Новий тип компактних ПЛ змінного струму – двоколові коаксіальні максимально скомпенсовані високовольтні повітряні лінії передачі (ДКПЛ) – вільні від перерахованих недоліків. В основу цих ліній покладений принцип максимальної компенсації як електричних так і магнітних полів. Досягти різкого зменшення напруженості електричного і магнітного полів під ПЛ дозволяє коаксіальне розташування однойменних фаз різних кіл ПЛ [1,2].

Метою дослідження є комп'ютерне моделювання роботи двоколових компактних повітряних ліній електропередачі напругою 500 кВ та обґрунтування техніко-економічної ефективності та екологічної безпеки їх застосування порівняно з традиційними лініями.

Традиційна лінія моделюється як три фази в один ряд (3 проводи). ДКПЛ моделюється як 12 проводів, де проводи кожної фази першого кола (A_1, B_1, C_1) оточені трьома фазними проводами другого кола (A_2, B_2, C_2) (рис.1). Щоб ДКПЛ працювала як коаксіальна система, вектори полів від першого та другого кола мають бути спрямовані зустрічно. Тобто, якщо у фазі A_1 струм має кут 0° , то у фазі A_2 він має бути 180° відносно неї. Оскільки однойменні фази розташовані близько, їхні вектори напруженості на великій відстані практично накладаються і віднімаються. Завдяки коаксіальному ефекту поле швидше згасає при віддаленні від осі лінії.

Для ліній надвисокої напруги (500 кВ) з великою пропускною здатністю використовується розщеплення фаз. Було прийнято, що кожен фазний провід має розщеплення на $n=3$ провідників, розташованих у вершинах рівностороннього трикутника (вставка на рис.1). Таким чином, для ДКПЛ загальна кількість провідників становить 36, що забезпечує більший сумарний переріз та нижчий хвильовий опір. Еквівалентний радіус розщепленої фази r_{eq} обчислюється як:

$$r_{eq} = \sqrt[n]{nra^{n-1}}, \quad (1)$$

де r – радіус одиночного провідника, a – крок розщеплення (відстань між провідниками розщеплення у фазі).

Вихідні параметри для моделювання розподілу електромагнітного поля ПЛІ наведено у табл. 1.

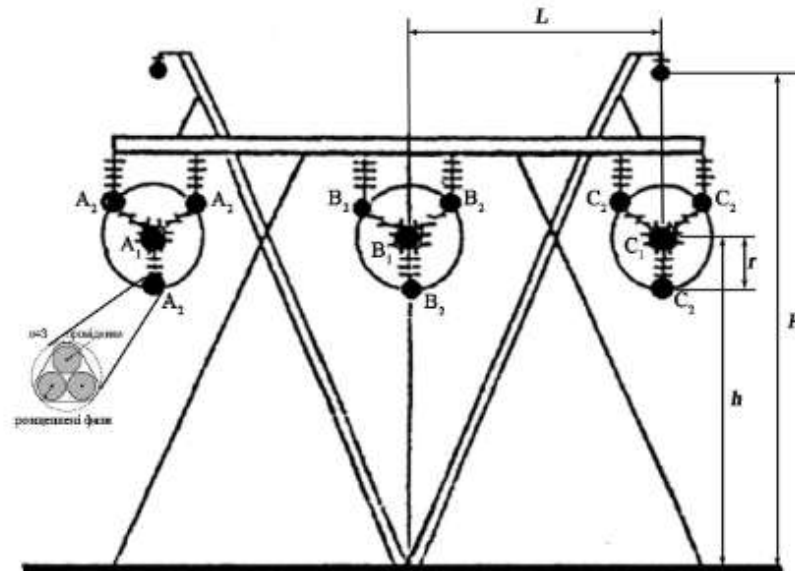


Рисунок 1 – Геометричне розташування проводів ДКПЛ 500 кВ з трьома проводами у фазі, $P_H = 5,2$ ГВт (на вставці показано, що кожен провід лінії має розщеплення на $n=3$ близько розташованих провідників)

Таблиця 1

Параметри досліджуваної ДКПЛ з трьома проводами у фазі

Параметр	Значення	Одиниця вимірювання
Номинальна напруга ПЛІ, $U_{ном}$	500	кВ
Активна потужність, P_H	5200	МВт
Коефіцієнт потужності, $\cos\phi$	0.95	—
Відстань між фазами ланцюга 1, L	12.5	м
Висота над землею фазних провідників ланцюга 1, h	20	м
Радіус коаксіального розміщення ланцюга 2, r	2	м
Радіус розщеплення фази, r_{eq}	0.23	м
Радіус одиночного провідника, r_0	0.015	м
Висота захисного тросу, H	28	м

Електричне поле ПЛІ, розміщеної поряд з провідною поверхнею Землі може бути знайдене методом дзеркальних відображень, при якому вплив всієї провідної поверхні внаслідок дії наведеного в ній заряду замінюється полем дзеркального відображення даного заряду із заміненям на протилежний знак. Для визначення лінійних зарядів τ використовується система рівнянь Максвелла у формі потенційних коефіцієнтів [2,3]:

$$[U] = [\alpha][\tau], \quad (2)$$

де $[U]$ – матриця фазних напруг, $[\alpha]$ – матриця потенційних коефіцієнтів, елементи якої обчислюються за формулами:

$$\alpha_{ii} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{2h_i}{r_{eq}}; \quad \alpha_{ij} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{D'_{ij}}{D_{ij}}, \quad (3)$$

тут h_i – висота підвісу i -го проводу, D_{ij} – відстань між проводами i та j , D'_{ij} – відстань між проводом i та дзеркальним відображенням проводу j .

Напруженість електричного поля E у довільній точці простору (x, y) розраховується як векторна сума від усіх реальних та дзеркальних зарядів:

$$E = \sum_{i=1}^N \frac{\tau_i}{2\pi\epsilon_0} \left(\frac{r_i}{|r_i|^3} - \frac{r'_i}{|r'_i|^3} \right), \quad (4)$$

де r_i та r'_i – радіус-вектори від i -го проводу та його відображення до точки розрахунку.

Магнітна індукція B обчислюється на основі закону Біо-Савара-Лапласа для нескінченно довгих прямолінійних провідників. Компоненти вектору індукції від i -го провідника зі струмом I_i дорівнюють:

$$B_{xi} = -\frac{\mu_0 I_i}{2\pi} \frac{y-h_i}{(x-x_i)^2 + (y-h_i)^2}; \quad B_{yi} = -\frac{\mu_0 I_i}{2\pi} \frac{x-x_i}{(x-x_i)^2 + (y-h_i)^2} \quad (5)$$

Результати моделювання розподілу електричного і магнітного полів на висоті 1.8 м над землею наведено на рис. 2, числові розрахунки – у табл.2.

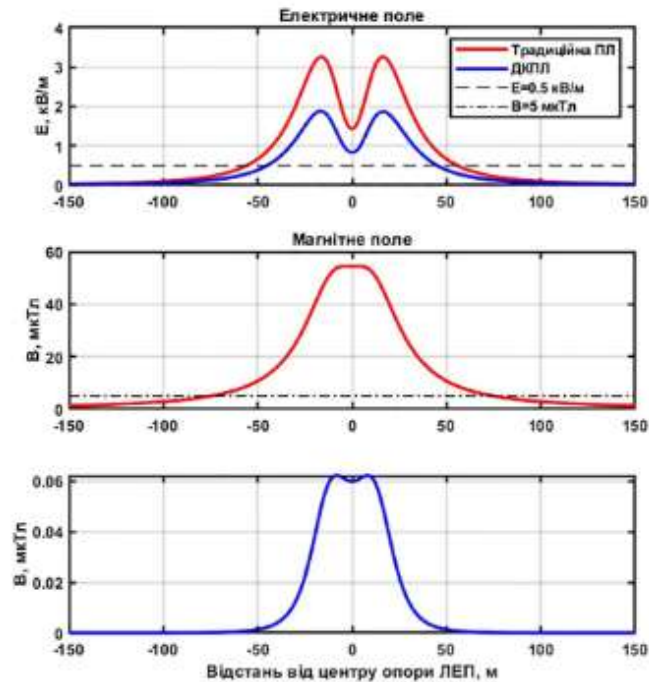


Рисунок 2 – Просторовий розподіл електричного і магнітного полів на висоті 1.8 м над землею для ДКПЛ і традиційної ПЛ (пунктирними лініями показано критичні для біологічної безпеки значення електричного і магнітного полів)

Санітарна зона визначається як мінімальна відстань X від осі лінії, починаючи з якої виконуються умови:

- напруженість електричного поля $E \leq 0.5$ кВ/м;
- магнітна індукція $B \leq 5$ мкТл.

Таблиця 2

Критичні експлуатаційні характеристики досліджуваних ПЛ

Характеристики ПЛ	ДКПЛ	Традиційна ПЛ
Санітарна зона (електричне поле)	45.0 м	55.5 м
Санітарна зона (магнітне поле)	0.0 м	72.5 м
Втрати потужності (на 100 км довжини)	93.2 МВт	279.6 МВт

Порівняння просторового розподілу полів (рис. 2) демонструє головну перевагу ДКПЛ – ефект самокомпенсації. Завдяки коаксіальній структурі, електричне поле ДКПЛ згасає значно швидше при віддаленні від осі. Це дозволяє звузити санітарну зону на 10.5 метрів порівняно з базовим варіантом, що дає змогу будувати такі лінії в більш щільних коридорах. Застосування ДКПЛ дозволяє повернути в господарське використання або під забудову 1.05 га землі на кожен кілометр траси.

У ДКПЛ відбувається повна компенсація санітарної зони за магнітним полем, оскільки вектори магнітної індукції від зустрічних струмів однойменних фаз (A_1-A_2 , B_1-B_2 , C_1-C_2) взаємно віднімаються безпосередньо під лінією.

Використання 36 провідників замість 9 (при збереженні того самого перерізу окремого проводу) дозволяє зменшити активні втрати потужності рівно в 3 рази. Це робить ДКПЛ значно ефективнішою для транзиту великих потоків енергії. Збільшення кількості точок підвісу в коаксіальній системі розподіляє сумарний заряд фази більш рівномірно, що запобігає виникненню загальної корони навіть при надвисокій напрузі 500 кВ.

Список літератури:

1. Василюк С.В. Техніка високих напруг: навч. посіб / С.В. Василюк, К.С. Василюк. – Рівне : НУВГП, 2018. – 187 с.
2. Бондаренко В.О. Конструкції ліній електропередачі: [для студентів усіх форм навчання електроенергетичних спеціальностей ЗВО України] / В.О. Бондаренко, В.В. Черкашина. – Харків: «Факт», 2020. – 174 с.
3. Гейер Д.В. Моделювання електричного поля трифазної симетричної повітряної лінії електропередачі / Д.В. Гейер, Д.В. Жук, Д.М. Степанчиков // “Актуальні проблеми сучасної енергетики”: зб. тез доп. VIII всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції студентів, аспірантів і молодих вчених (м. Хмельницький, 23 травня, 2024р.). – Херсон: Книжкове видавництво ФОП Вишемирський В.С., 2024. – С. 25-28.

ДОДАТОК В

Розроблений код для розрахунку полів та санітарних зон для двоколової однорадіусної повітряної лінії 500 кВ типу «Ромб»

```

%% ПОВНИЙ РОЗРАХУНОК ПОЛІВ ТА САНІТАРНИХ ЗОН ДЛЯ ДОРПЛ 500 кВ (РОМБ)
clear; clc; close all;

%% 1. ВХІДНІ ДАНІ
U_nom = 500e3;           % Номінальна напруга, В
P_mw = 3200;            % Потужність, МВт (згідно з рис. 2.19)
cos_phi = 0.95;
eps0 = 8.854e-12;
mu0 = 4*pi*1e-7;

% Параметри проводів (Фаза з двох кіл, кожен по 3 проводи у розщепленні)
r_cond = 0.0115;        % Радіус проводу АС-330 (приблизно)
n_sub = 3;              % Кількість проводів у пучку (розщеплення 3)
r_bundle = 0.15;        % Радіус внутрішнього розщеплення пучка, м

% Електричні параметри
phi_ph = [0, -120, 120] * pi/180; % Фазові зсуви А, В, С
U_ph_base = (U_nom/sqrt(3)) * exp(1j * phi_ph);
I_total_ph = (P_mw * 1e6) / (sqrt(3) * U_nom * cos_phi);

% ГДК (Гранично допустимі концентрації)
E_lim = 0.5;            % кВ/м (межа житлової забудови)
B_lim = 5.0;            % мкТл (безпечний рівень магнітної індукції)

%% 2. ГЕОМЕТРІЯ ФАЗ (КОНФІГУРАЦІЯ РОМБ)
X_centers = [-5, 0, 5]; % Координати центрів фаз А, В, С
Y_mid = 22.0;           % Висота центру ромба над землею
D_vert = 3.5;           % Відстань між колами (вертикаль ромба)
theta_s = [90, 210, 330] * pi/180; % Кути розщеплення "трійки"

% Функція для генерації координат провідників
gen_cfg = @(is_anti) generate_geometry(X_centers, Y_mid, D_vert, theta_s, ...
    r_bundle, U_ph_base, I_total_ph, n_sub, is_anti);

[X_a, Y_a, U_a, I_a] = gen_cfg(true); % Протифазний режим (ДОРПЛ)
[X_s, Y_s, U_s, I_s] = gen_cfg(false); % Синфазний режим (Паралельний)

%% 3. ОБЧИСЛЕННЯ ПОЛІВ
x_vec = -80:0.2:80;     % Вектор точок розрахунку
y_calc = 1.8;           % Висота розрахунку (рівень людини)

E_anti = zeros(size(x_vec)); B_anti = zeros(size(x_vec));
E_syn = zeros(size(x_vec)); B_syn = zeros(size(x_vec));

% Розрахунок зарядів (Метод дзеркальних відбитків)
tau_anti = calc_tau(X_a, Y_a, U_a, r_cond, eps0);
tau_syn = calc_tau(X_s, Y_s, U_s, r_cond, eps0);

for k = 1:length(x_vec)
    % Поле для протифазного режиму
    [ex, ey, bx, by] = calc_point_field(x_vec(k), y_calc, X_a, Y_a, tau_anti,
    I_a, eps0, mu0);
    E_anti(k) = abs(sqrt(ex^2 + ey^2))/1000;
    B_anti(k) = abs(sqrt(bx^2 + by^2))*1e6;

```



```

    % Поле для синфазного режиму
    [exs, eys, bxs, bys] = calc_point_field(x_vec(k), y_calc, X_s, Y_s,
tau_syn, I_s, eps0, mu0);
    E_syn(k) = abs(sqrt(exs^2 + eys^2))/1000;
    B_syn(k) = abs(sqrt(bxs^2 + bys^2))*1e6;
end

%% 4. ВИЗНАЧЕННЯ САНІТАРНИХ ЗОН
% Знаходимо максимальну відстань x, де значення перевищує ліміт
find_sz = @(x, val, lim) max([0, abs(x(val > lim))]));

sz_E_anti = find_sz(x_vec, E_anti, E_lim);
sz_B_anti = find_sz(x_vec, B_anti, B_lim);
sz_E_syn = find_sz(x_vec, E_syn, E_lim);
sz_B_syn = find_sz(x_vec, B_syn, B_lim);

%% 5. ВІЗУАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ
figure('Color', 'w', 'Name', 'Порівняльний аналіз ДОРПЛ', 'Position', [100,
100, 1000, 800]);

% Графік Електричного поля
subplot(2,1,1);
plot(x_vec, E_syn, 'r--', 'LineWidth', 1.5); hold on;
plot(x_vec, E_anti, 'b', 'LineWidth', 2);
line([min(x_vec) max(x_vec)], [E_lim E_lim], 'Color', 'k', 'LineStyle', ':',
'LineWidth', 1.2);
if sz_E_anti > 0
    plot([-sz_E_anti, sz_E_anti], [E_lim, E_lim], 'go', 'MarkerFaceColor',
'g');
end
grid on; ylabel('Е, кВ/м');
title(['Електричне поле (СЗЗ ДОРПЛ: ', num2str(sz_E_anti, '%.1f'), ' м,
Синфазна: ', num2str(sz_E_syn, '%.1f'), ' м)']);
legend('Синфазний режим', 'Протифазний (ДОРПЛ Ромб)', 'ГДК 0.5 кВ/м');

% Графік Магнітного поля
subplot(2,1,2);
plot(x_vec, B_syn, 'r--', 'LineWidth', 1.5); hold on;
plot(x_vec, B_anti, 'b', 'LineWidth', 2);
line([min(x_vec) max(x_vec)], [B_lim B_lim], 'Color', 'k', 'LineStyle', ':',
'LineWidth', 1.2);
if sz_B_anti > 0
    plot([-sz_B_anti, sz_B_anti], [B_lim, B_lim], 'mo', 'MarkerFaceColor',
'm');
end
grid on; ylabel('В, мкТл'); xlabel('Відстань від осі ПЛ, м');
title(['Магнітне поле (СЗЗ ДОРПЛ: ', num2str(sz_B_anti, '%.1f'), ' м,
Синфазна: ', num2str(sz_B_syn, '%.1f'), ' м)']);
legend('Синфазний режим', 'Протифазний (ДОРПЛ Ромб)', 'ГДК 5 мкТл');

% Вивід звіту
fprintf('
fprintf(' РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКУ (ПЛ 500 кВ, 3.2 ГВт)
fprintf(' =====
fprintf(' РЕЖИМ ДОРПЛ (Протифазний ромб):
fprintf(' | - Макс. поле: Е = %.2f кВ/м, В = %.2f мкТл
max(E_anti), max(B_anti));
fprintf(' | - СЗЗ (ГДК): Е = +/- %.1f м, В = +/- %.1f м
sz_E_anti, sz_B_anti);
fprintf(' =====
fprintf(' РЕЖИМ СИФАЗНИЙ (Паралельний):

```

```

fprintf('|| - Макс. поле: E = %.2f кВ/м, B = %.2f мкТл           ||\n',
max(E_syn), max(B_syn));
fprintf('|| - СЗЗ (ГДК): E = +/- %.1f м, B = +/- %.1f м           ||\n',
sz_E_syn, sz_B_syn);
fprintf('=====||\n');
%% --- ДОПОМІЖНІ ФУНКЦІЇ ---

function [X, Y, U, I] = generate_geometry(Xc, Ym, Dv, th, rb, Uph, Itot, ns,
is_anti)
    X = []; Y = []; U = []; I = [];
    shift = 0; if is_anti, shift = pi; end
    for f = 1:3
        % Вершини ромба для фази (Верхня - коло 1, Нижня - коло 2)
        pos = [Ym + Dv/2, Ym - Dv/2];
        u_vals = [Uph(f), Uph(f) * exp(1j*shift)];
        i_vals = [(Itot/(2*ns)) * exp(1j*angle(Uph(f))), ...
            (Itot/(2*ns)) * exp(1j*(angle(Uph(f)) + shift))];
        for node = 1:2
            for s = 1:ns
                X(end+1) = Xc(f) + rb*cos(th(s));
                Y(end+1) = pos(node) + rb*sin(th(s));
                U(end+1) = u_vals(node);
                I(end+1) = i_vals(node);
            end
        end
    end
end

function t = calc_tau(x, y, u, r, e0)
    n = length(x); A = zeros(n);
    for i=1:n, for j=1:n
        D = sqrt((x(i)-x(j))^2 + (y(i)-y(j))^2); if i==j, D = r; end
        Dp = sqrt((x(i)-x(j))^2 + (y(i)+y(j))^2);
        A(i,j) = (1/(2*pi*e0)) * log(Dp/D);
    end, end
    t = A \ u.';
end

function [Ex, Ey, Bx, By] = calc_point_field(px, py, X, Y, tau, I, e0, m0)
    Ex=0; Ey=0; Bx=0; By=0;
    for i = 1:length(X)
        dx = px - X(i); dy1 = py - Y(i); dy2 = py + Y(i);
        Ec = tau(i)/(2*pi*e0);
        Ex = Ex + Ec*(dx/(dx^2+dy1^2) - dx/(dx^2+dy2^2));
        Ey = Ey + Ec*(dy1/(dx^2+dy1^2) - dy2/(dx^2+dy2^2));
        Bc = (m0*I(i))/(2*pi);
        Bx = Bx - Bc*dy1/(dx^2+dy1^2); By = By + Bc*dx/(dx^2+dy1^2);
    end
end

```

ДОДАТОК Г

Розроблений код для розрахунку полів та виникнення корони для двокової однорадіусної повітряної лінії 500 кВ типу «Ромб»

```
clear; clc; close all;

% 1. ВХІДНІ ДАНІ
U_nom = 500e3;           % Номінальна напруга, В
P_mw = 3200;            % Потужність, МВт
cos_phi = 0.95;
eps0 = 8.854e-12;
mu0 = 4*pi*1e-7;

% Параметри проводу (напр. АС-330/43)
r_cond = 0.0115;        % Радіус одиночного проводу, м
n_sub = 3;              % Кількість проводів у розщепленні (трійка)
r_bundle = 0.15;        % Радіус розщеплення фази, м

% Електричні параметри
phi_ph = [0, -120, 120] * pi/180;
U_ph_base = (U_nom/sqrt(3)) * exp(1j * phi_ph);
I_total_ph = (P_mw * 1e6) / (sqrt(3) * U_nom * cos_phi);

% ГДК (Санітарні норми)
E_lim = 0.5;            % кВ/м (житлова забудова)
B_lim = 5.0;            % мкТл

% 2. ГЕОМЕТРІЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ФАЗ
X_centers = [-12.0, 0, 12.0]; % Координати центрів фаз А, В, С
Y_mid = 22.0;           % Висота підвісу (центр ромба)
D_vert = 3.5;           % Вертикальна діагональ ромба (між колами)
theta_s = [90, 210, 330] * pi/180; % Кути розщеплення проводів у пучку

% Генеруємо координати для обох режимів за допомогою функції в кінці файлу
[X_a, Y_a, U_a, I_a] = generate_geometry(X_centers, Y_mid, D_vert, theta_s,
r_bundle, U_ph_base, I_total_ph, n_sub, true);
[X_s, Y_s, U_s, I_s] = generate_geometry(X_centers, Y_mid, D_vert, theta_s,
r_bundle, U_ph_base, I_total_ph, n_sub, false);

% 3. ОБЧИСЛЕННЯ ПОЛІВ (ЗЕМЛЯ ТА ПОВЕРХНЯ)
x_vec = -80:0.5:80;
y_calc = 1.8;           % Висота розрахунку (рівень людини)

% Розрахунок зарядів (Метод дзеркальних відбитків)
tau_anti = calc_tau(X_a, Y_a, U_a, r_cond, eps0);
tau_syn = calc_tau(X_s, Y_s, U_s, r_cond, eps0);

E_anti = zeros(size(x_vec)); B_anti = zeros(size(x_vec));
E_syn = zeros(size(x_vec)); B_syn = zeros(size(x_vec));

for k = 1:length(x_vec)
    % Протифазний режим (ДОРПЛ)
    [ex, ey, bx, by] = calc_point_field(x_vec(k), y_calc, X_a, Y_a, tau_anti,
I_a, eps0, mu0);
    E_anti(k) = abs(sqrt(ex^2 + ey^2))/1000;
    B_anti(k) = abs(sqrt(bx^2 + by^2))*1e6;

    % Синфазний режим
```

```

[exs, eys, bxs, bys] = calc_point_field(x_vec(k), y_calc, X_s, Y_s,
tau_syn, I_s, eps0, mu0);
E_syn(k) = abs(sqrt(exs^2 + eys^2))/1000;
B_syn(k) = abs(sqrt(bxs^2 + bys^2))*1e6;
end

%% 4. РОЗРАХУНОК КОРОНИ
m0_corr = 0.82; % Коефіцієнт шорсткості проводу
delta = 1.0; % Відносна густина повітря

% Критична напруженість за Піком (кВ/м)
E_crit = 30.3 * m0_corr * delta * (1 + 0.299/sqrt(r_cond*100)) * 100;

% Коефіцієнт нерівномірності розщепленої фази
k_split = 1 + (n_sub - 1) * (r_cond / r_bundle);

% Макс. напруженість на поверхні самого навантаженого проводу (кВ/м)
E_surf_anti = max(abs(tau_anti)) / (2 * pi * eps0 * r_cond) * k_split / 1000;
E_surf_syn = max(abs(tau_syn)) / (2 * pi * eps0 * r_cond) * k_split / 1000;

% 5. ВІЗУАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ
figure('Color', 'w', 'Position', [100, 100, 1000, 700]);

% Електричне поле
subplot(2,1,1);
plot(x_vec, E_syn, 'r--', 'LineWidth', 1.2); hold on;
plot(x_vec, E_anti, 'b', 'LineWidth', 2);
line([min(x_vec) max(x_vec)], [E_lim E_lim], 'Color', 'k', 'LineStyle', '-.');
line([min(x_vec) max(x_vec)], [0 0], 'Color', 'k', 'LineStyle', ':');
grid on; ylabel('Е, кВ/м'); title('Електричне поле (y = 1.8 м)');
legend('Синфазна ПЛ', 'ДОРПЛ (Ромб)', 'E=0.5 кВ/м', 'B=5 мкТл');

% Магнітне поле
subplot(2,1,2);
plot(x_vec, B_syn, 'r--', 'LineWidth', 1.2); hold on;
plot(x_vec, B_anti, 'b', 'LineWidth', 2);
line([min(x_vec) max(x_vec)], [B_lim B_lim], 'Color', 'k', 'LineStyle', ':');
grid on; ylabel('В, мкТл'); xlabel('Відстань від осі ПЛ, м');
title('Магнітне поле (y = 1.8 м)');

%% 6. ФОРМУВАННЯ ЗВІТУ У КОНСОЛЬ
fprintf(' \n');
fprintf(' ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ПЛ 500 кВ (3.2 ГВт) \n');
fprintf(' ===== \n');
fprintf(' Критична напруженість (E_crit): %.2f кВ/м \n',
E_crit);
fprintf(' ===== \n');
fprintf(' РЕЖИМ ДОРПЛ (Протифазний ромб): \n');
fprintf(' - Поле на землі (max): %.2f кВ/м | %.2f мкТл \n',
max(E_anti), max(B_anti));
fprintf(' - Напруженість проводу: %.2f кВ/м \n',
E_surf_anti);
fprintf(' - Стан корони: %s (коеф. %.3f) \n',
check_corona(E_surf_anti/E_crit), E_surf_anti/E_crit);
fprintf(' ===== \n');
fprintf(' РЕЖИМ СИНФАЗНИЙ (Паралельний): \n');
fprintf(' - Поле на землі (max): %.2f кВ/м | %.2f мкТл \n',
max(E_syn), max(B_syn));
fprintf(' - Напруженість проводу: %.2f кВ/м \n',
E_surf_syn);
fprintf(' - Стан корони: %s (коеф. %.3f) \n',
check_corona(E_surf_syn/E_crit), E_surf_syn/E_crit);

```



```

fprintf('%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%\n');

% --- КІНЕЦЬ ОСНОВНОГО СКРИПТА ---

% --- ДОПОМІЖНІ ФУНКЦІЇ ---

function msg = check_corona(k)
    if k > 0.9, msg = 'РИЗИК КОРОНИ (Критично)';
    elseif k > 0.75, msg = 'МОЖЛИВА МІСЦЕВА КОРОНА';
    else, msg = 'БЕЗПЕЧНО (Корона відсутня)';
    end
end

function [X, Y, U, I] = generate_geometry(Xc, Ym, Dv, th, rb, Uph, Itot, ns,
is_anti)
    X = []; Y = []; U = []; I = [];
    shift = 0; if is_anti, shift = pi; end
    for f = 1:3
        % Дві точки підвісу (вершини ромба) для кожного кола
        pos_y = [Ym + Dv/2, Ym - Dv/2];
        u_vals = [Uph(f), Uph(f) * exp(1j*shift)];
        i_vals = [(Itot/(2*ns)) * exp(1j*angle(Uph(f))), ...
            (Itot/(2*ns)) * exp(1j*(angle(Uph(f)) + shift))];
        for node = 1:2
            for s = 1:ns
                X(end+1) = Xc(f) + rb*cos(th(s));
                Y(end+1) = pos_y(node) + rb*sin(th(s));
                U(end+1) = u_vals(node);
                I(end+1) = i_vals(node);
            end
        end
    end
end

function t = calc_tau(x, y, u, r, e0)
    n = length(x); A = zeros(n);
    for i=1:n
        for j=1:n
            D = sqrt((x(i)-x(j))^2 + (y(i)-y(j))^2);
            if i==j, D = r; end
            Dp = sqrt((x(i)-x(j))^2 + (y(i)+y(j))^2);
            A(i,j) = (1/(2*pi*e0)) * log(Dp/D);
        end
    end
    t = A \ u.';
end

function [Ex, Ey, Bx, By] = calc_point_field(px, py, X, Y, tau, I, e0, m0)
    Ex=0; Ey=0; Bx=0; By=0;
    for i = 1:length(X)
        dx = px - X(i); dy1 = py - Y(i); dy2 = py + Y(i);
        Ec = tau(i)/(2*pi*e0);
        Ex = Ex + Ec*(dx/(dx^2+dy1^2) - dx/(dx^2+dy2^2));
        Ey = Ey + Ec*(dy1/(dx^2+dy1^2) - dy2/(dx^2+dy2^2));
        Bc = (m0*I(i))/(2*pi);
        Bx = Bx - Bc*dy1/(dx^2+dy1^2);
        By = By + Bc*dx/(dx^2+dy1^2);
    end
end

```

ДОДАТОК Д

Розроблений програмний код 3D розподіл ЕМП для двоколової
однорадіусної повітряної лінії 500 кВ з урахуванням провисання проводів

```
% =====
% 3D РОЗПОДІЛ ЕМП ДЛЯ ДОРПЛ 500 кВ З УРАХУВАННЯМ ПРОВИСАННЯ ПРОВІДІВ
% =====
clear; clc; close all;

%% ===== 1. ВХІДНІ ДАНІ =====
U_nom   = 500e3;      % Номінальна напруга, В
P_mw    = 3200;      % Активна потужність, МВт
cos_phi  = 0.95;      % Коефіцієнт потужності
eps0     = 8.854e-12; % Електрична стала, Ф/м
mu0      = 4*pi*1e-7; % Магнітна стала, Гн/м

% Параметри проводу АС-330/43
r_cond   = 0.0115;    % Радіус одиночного проводу, м
n_sub    = 3;         % Кількість проводів у розщепленні
r_bundle = 0.15;      % Радіус розщеплення (тріпка), м

% Фазні струми та напруги
phi_ph    = [0, -120, 120] * pi/180;
U_ph_base = (U_nom / sqrt(3)) * exp(1j * phi_ph);
I_total_ph = (P_mw * 1e6) / (sqrt(3) * U_nom * cos_phi);

% ГДК
E_lim = 0.5; % кВ/м (житлова забудова)
B_lim = 5.0; % мкТл

% ===== 2. ГЕОМЕТРІЯ ДОРПЛ (КОНФІГУРАЦІЯ «РОМБ») =====
X_centers = [-5, 0, 5]; % Горизонтальні координати фаз А, В, С, м
Y_attach  = 22.0;       % Висота кріплення проводів на опорі, м
D_vert    = 3.5;        % Вертикальна діагональ ромба (між
% колами), м
theta_s   = [90, 210, 330] * pi/180; % Кути підвіски трьох проводів у пучку

% ===== 3. ПАРАМЕТРИ ПРОЛЬОТУ (ПРОВИСАННЯ) =====
% Параболічна апроксимація провисання (стандарт для ПЛ):
%  $f(z) = 4 * f_{\text{sag}} * (z / L_{\text{span}}) * (1 - z / L_{\text{span}})$ 
%  $Y_{\text{mid}}(z) = Y_{\text{attach}} - f(z)$ 
%
% При  $z = 0$  та  $z = L_{\text{span}}$  :  $Y_{\text{mid}} = Y_{\text{attach}}$  (опора)
% При  $z = L_{\text{span}}/2$  :  $Y_{\text{mid}} = Y_{\text{attach}} - f_{\text{sag}}$  (середина прольоту)
L_span = 400; % Довжина прольоту між опорами, м
f_sag  = 10.0; % Максимальне провисання в середині прольоту, м
% Мінімальна висота проводу =  $Y_{\text{attach}} - D_{\text{vert}}/2 - f_{\text{sag}} = 22 - 1.75 - 10 = 10.25$  м

%% ===== 4. РОЗРАХУНКОВА СІТКА =====
x_vec = -70 : 2 : 70; % Поперечна координата X, м
z_vec = 0 : 10 : L_span; % Поздовжня координата Z (вздовж прольоту), м
y_calc = 1.8; % Висота розрахункової площини (рівень людини), м

[X_grid, Z_grid] = meshgrid(x_vec, z_vec);
nz = length(z_vec);
nx = length(x_vec);
```

```

E_anti = zeros(nz, nx); % Електричне поле, ДОРПЛ (протифазний)
B_anti = zeros(nz, nx); % Магнітне поле, ДОРПЛ
E_syn = zeros(nz, nx); % Електричне поле, синфазний
B_syn = zeros(nz, nx); % Магнітне поле, синфазний

% ===== 5. ОСНОВНИЙ РОЗРАХУНКОВИЙ ЦИКЛ =====
% Метод: для кожного поперечного перерізу з розраховується 2D поле
% з урахуванням актуальної висоти підвісу проводів в даному перерізі.
% Це квазі-2D (перерізна) апроксимація – стандарт для довгих ПЛ.

fprintf('Розрахунок 3D поля (%d перерізів x %d точок)...\n', nz, nx);
tic;
for kz = 1:nz
    z = z_vec(kz);

    % Провисання в перерізі z (параболічна апроксимація)
    f_z = 4 * f_sag * (z / L_span) * (1 - z / L_span);
    Y_mid = Y_attach - f_z; % Поточна висота центру ромба

    % Координати 36 провідників та їх параметри для цього перерізу
    [Xa, Ya, Ua, Ia] = generate_geometry(X_centers, Y_mid, D_vert, ...
        theta_s, r_bundle, U_ph_base, I_total_ph, n_sub, true);
    [Xs, Ys, Us, Is] = generate_geometry(X_centers, Y_mid, D_vert, ...
        theta_s, r_bundle, U_ph_base, I_total_ph, n_sub, false);

    % Вектори лінійних зарядів (розв'язання СЛАР через матрицю потенціальних
    коеф.)
    tau_anti = calc_tau(Xa, Ya, Ua, r_cond, eps0);
    tau_syn = calc_tau(Xs, Ys, Us, r_cond, eps0);

    for kx = 1:nx
        [ex, ey, bx, by] = calc_point_field(x_vec(kx), y_calc, Xa, Ya,
            tau_anti, Ia, eps0, mu0);
        E_anti(kz,kx) = abs(sqrt(ex^2 + ey^2)) / 1000;
        B_anti(kz,kx) = abs(sqrt(bx^2 + by^2)) * 1e6;

        [exs, eys, bxs, bys] = calc_point_field(x_vec(kx), y_calc, Xs, Ys,
            tau_syn, Is, eps0, mu0);
        E_syn(kz,kx) = abs(sqrt(exs^2 + eys^2)) / 1000;
        B_syn(kz,kx) = abs(sqrt(bxs^2 + bys^2)) * 1e6;
    end
end
fprintf('Готово за %.1f с.\n\n', toc);

%% ===== 6. ПРОФІЛЬ ПРОВИСАННЯ (ДЛЯ ПІДПISУ ГРАФІКІВ) =====
z_fine = linspace(0, L_span, 200);
Y_sag_mid = Y_attach - 4*f_sag*(z_fine/L_span).*(1 - z_fine/L_span); % центр
ромба
Y_sag_bot = Y_sag_mid - D_vert/2; % нижній провід (найближчий до землі)

%% ===== 7. ВІЗУАЛІЗАЦІЯ =====

%-----
% РИСУНОК 1 – ДОРПЛ: Електричне і магнітне поле (окремо, 3D поверхні)
%-----
fig1 = figure('Color','w','Name','ДОРПЛ 500 кВ – 3D ЕМП','Position',[40 40
1380 620]);

% --- 7.1 Електричне поле ---
ax1 = subplot(1,2,1);
surf(X_grid, Z_grid, E_anti, 'EdgeColor','none', 'FaceAlpha',0.92);
hold on;

```

```

% Площина ГДК (E = 0.5 кВ/м)
patch_plane(ax1, x_vec, z_vec, E_lim, [0.9 0.2 0.2], 0.28);
colormap(ax1, jet);
cb = colorbar(ax1); cb.Label.String = 'E, кВ/м'; cb.FontSize = 10;
xlabel('X, м (поперечний)', 'FontSize', 11);
ylabel('Z, м (вздовж лінії)', 'FontSize', 11);
zlabel('E, кВ/м', 'FontSize', 11);
title({'ДОРПЛ – Електричне поле E', '(y_{розр} = 1.8 м, протифазний ромб)'} , 'FontSize', 11);
view(40, 32); grid on; box on;
caxis([0 max(E_anti, [], 'all')*1.05]);

% --- 7.2 Магнітне поле ---
ax2 = subplot(1,2,2);
surf(X_grid, Z_grid, B_anti, 'EdgeColor', 'none', 'FaceAlpha', 0.92);
hold on;
patch_plane(ax2, x_vec, z_vec, B_lim, [0.9 0.5 0.0], 0.28);
colormap(ax2, hot);
cb = colorbar(ax2); cb.Label.String = 'B, мкТл'; cb.FontSize = 10;
xlabel('X, м (поперечний)', 'FontSize', 11);
ylabel('Z, м (вздовж лінії)', 'FontSize', 11);
zlabel('B, мкТл', 'FontSize', 11);
title({'ДОРПЛ – Магнітне поле B', '(y_{розр} = 1.8 м, протифазний ромб)'} , 'FontSize', 11);
view(40, 32); grid on; box on;
caxis([0 max(B_anti, [], 'all')*1.05]);

sgtitle(sprintf('ДОРПЛ 500 кВ | 3D ЕМП на висоті 1.8 м | Проліт %d м, провисання %.0f м', ...
    L_span, f_sag), 'FontSize', 13, 'FontWeight', 'bold');

%-----
% РИСУНОК 2 – Порівняння: Синфазний vs ДОРПЛ (4 графічні побудови у 3D вимірі)
%-----
fig2 = figure('Color', 'w', 'Name', 'Порівняння: Синфазний vs ДОРПЛ', 'Position', [40 40 1380 940]);

datasets_e = {E_syn, E_anti};
datasets_b = {B_syn, B_anti};
mode_names = {'Синфазний (паралельний)', 'ДОРПЛ (протифазний ромб)'};
cmaps_e = {'parula', 'jet'};
cmaps_b = {'pink', 'hot'};

for col = 1:2
    % Електричне поле
    axe = subplot(2, 2, col);
    surf(X_grid, Z_grid, datasets_e{col}, 'EdgeColor', 'none', 'FaceAlpha', 0.9);
    hold on;
    patch_plane(axe, x_vec, z_vec, E_lim, [0.9 0.2 0.2], 0.25);
    colormap(axe, cmaps_e{col});
    cb = colorbar(axe); cb.Label.String = 'E, кВ/м';
    xlabel('X, м'); ylabel('Z, м'); zlabel('E, кВ/м');
    title([mode_names{col} ' – E (кВ/м)'], 'FontSize', 10);
    view(38, 30); grid on;
    Emax_val = max(datasets_e{col}, [], 'all');
    xlim([0 Emax_val]);
    text(0.02, 0.95, sprintf('E_{max} = %.2f кВ/м', Emax_val), ...
        'Units', 'normalized', 'FontSize', 9, 'Color', 'k', 'FontWeight', 'bold');

    % Магнітне поле
    axb = subplot(2, 2, col+2);

```

```

    surf(X_grid, Z_grid, datasets_b{col}, 'EdgeColor','none',
'FaceAlpha',0.9);
    hold on;
    patch_plane(axb, x_vec, z_vec, B_lim, [0.9 0.5 0.0], 0.25);
    colormap(axb, cmaps_b{col});
    cb = colorbar(axb); cb.Label.String = 'B, мкТл';
    xlabel('X, м'); ylabel('Z, м'); zlabel('B, мкТл');
    title([mode_names{col} ' – B (мкТл)'],'FontSize',10);
    view(38, 30); grid on;
    Bmax_val = max(datasets_b{col},[],'all');
    caxis([0 Bmax_val]);
    text(0.02, 0.95, sprintf('B_{max} = %.2f мкТл', Bmax_val), ...
        'Units','normalized','FontSize',9,'Color','k','FontWeight','bold');
end

sgtitle(sprintf('Порівняльний 3D аналіз ЕМП | 500 кВ, %.1f ГВт | y = 1.8 м',
P_mw/1000), ...
    'FontSize',13,'FontWeight','bold');

% Стрілка-аннотація для зниження
annotation(fig2,'textbox',[0.48 0.5 0.04
0.04],'String','\rightarrow','FontSize',24, ...
    'EdgeColor','none','HorizontalAlignment','center','Color',[0 0.6 0]);

%-----
% РИСУНОК 3 – Ефект провисання: поле вздовж осі лінії (x=0) + профіль
%-----
fig3 = figure('Color','w','Name','Ефект провисання','Position',[40 40 1100
520]);

[~, ix0] = min(abs(x_vec - 0)); % індекс x=0

E_axis_anti = E_anti(:, ix0);
B_axis_anti = B_anti(:, ix0);
E_axis_syn = E_syn(:, ix0);
B_axis_syn = B_syn(:, ix0);

% Нормалізовані значення провисання для осі Y праворуч
Y_axis_bot = Y_attach - 4*f_sag*(z_vec/L_span).*(1 - z_vec/L_span) -
D_vert/2;

yyaxis left;
plot(z_vec, E_axis_syn, 'r--', 'LineWidth', 1.8, 'DisplayName', 'E,
Синфазний'); hold on;
plot(z_vec, E_axis_anti, 'b-', 'LineWidth', 2.2, 'DisplayName', 'E, ДОПЛ');
plot(z_vec, B_axis_syn/10, 'm--', 'LineWidth', 1.5, 'DisplayName', 'B/10,
Синфазний');
plot(z_vec, B_axis_anti/10, 'c-', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', 'B/10,
ДОПЛ');
yline(E_lim, 'k:', 'LineWidth',1.2, 'DisplayName', 'ГДК E = 0.5 кВ/м');
yline(B_lim/10, 'k--', 'LineWidth',1.0, 'DisplayName', 'ГДК B/10 = 0.5');
ylabel('E, кВ/м | B/10, мкТл','FontSize',11);
ylim([0 max(E_axis_syn)+4]);

yyaxis right;
plot(z_vec, Y_axis_bot, 'g-s', 'LineWidth', 1.5, 'MarkerSize', 4, ...
    'DisplayName', 'Висота нижнього проводу, м');
ylabel('Висота нижнього проводу над землею, м','FontSize',11);
ylim([0 Y_attach+4]);

xlabel('Z, м (вздовж прольоту)','FontSize',11);
title(sprintf('Поле на осі лінії (x = 0) – вплив провисання'), ...

```

```

    sprintf('L_{прольоту} = %d м | f_{cag} = %.0f м | Y_{attach} = %.0f м |
y_{розр} = %.1f м', ...
    L_span, f_sag, Y_attach, y_calc)}, 'FontSize',11);
legend('Location','northeast','FontSize',9);
grid on; box on;

% Позначення середини прольоту
xm = L_span/2;
xline(xm, 'k-.', 'LineWidth',1, 'Label','Середина
прольоту','LabelVerticalAlignment','bottom');

%-----
% РИСУНОК 4 – Комбінований нормований індекс ЕМП (E/E_lim + B/B_lim)
%-----
fig4 = figure('Color','w','Name','Нормований індекс ЕМП','Position',[40 40
1380 560]);

EMF_idx_anti = E_anti/E_lim + B_anti/B_lim; % > 2 = обидва поля перевищують
ГДК
EMF_idx_syn = E_syn/E_lim + B_syn/B_lim;

ax4a = subplot(1,2,1);
surf(X_grid, Z_grid, EMF_idx_syn, 'EdgeColor','none', 'FaceAlpha',0.9);
colormap(ax4a, jet);
cb = colorbar(ax4a); cb.Label.String = 'E/E_{ГДК} + B/B_{ГДК}';
hold on;
patch_plane(ax4a, x_vec, z_vec, 1.0, [0.6 0 0.8], 0.22); % рівень
перевищення
xlabel('X, м'); ylabel('Z, м'); zlabel('Нормований індекс');
title('Синфазний – Нормований ЕМП-індекс','FontSize',11);
view(38,30); grid on;

ax4b = subplot(1,2,2);
surf(X_grid, Z_grid, EMF_idx_anti, 'EdgeColor','none', 'FaceAlpha',0.9);
colormap(ax4b, jet);
cb = colorbar(ax4b); cb.Label.String = 'E/E_{ГДК} + B/B_{ГДК}';
hold on;
patch_plane(ax4b, x_vec, z_vec, 1.0, [0.6 0 0.8], 0.22);
xlabel('X, м'); ylabel('Z, м'); zlabel('Нормований індекс');
title('ДОРПЛ – Нормований ЕМП-індекс','FontSize',11);
view(38,30); grid on;

sgtitle('Нормований індекс ЕМП (I = E/E_{ГДК} + B/B_{ГДК}) | Площина ГДК =
1.0', ...
    'FontSize',13,'FontWeight','bold');

% ===== 8. КОНСОЛЬНИЙ ЗВІТ =====

[Em_a_tower, iz_tower] = deal(max(E_anti(1,:)), 1);
[Em_a_mid, iz_mid ] = deal(max(E_anti(round(nz/2+0.5),:)),
round(nz/2+0.5));
[Bm_a_tower] = max(B_anti(1,:));
[Bm_a_mid] = max(B_anti(round(nz/2+0.5),:));

find_sz = @(vec, fld, lim) max([0, abs(vec(fld > lim))]);
sz_E_a = find_sz(x_vec, E_anti(round(nz/2+0.5),:), E_lim);
sz_B_a = find_sz(x_vec, B_anti(round(nz/2+0.5),:), B_lim);
sz_E_s = find_sz(x_vec, E_syn(round(nz/2+0.5),:), E_lim);
sz_B_s = find_sz(x_vec, B_syn(round(nz/2+0.5),:), B_lim);

fprintf('
fprintf('|| 3D АНАЛІЗ ЕМП ДОРПЛ 500 кВ – %.1f ГВт ||\n',
P_mw/1000);

```

```

fprintf(' \n');
fprintf('   Параметри прольоту: \n');
fprintf('   L_прольоту      = %3d м \n',
L_span);
fprintf('   Провисання      = %.1f м (парабола) \n',
f_sag);
fprintf('   Висота на опори = %.1f м; у середині = %.1f м \n',
Y_attach, Y_attach - f_sag);
fprintf(' \n');
fprintf('   ДОРПЛ (Противафазний ромб): \n');
fprintf('   E_max (на опори)   = %.3f кВ/м \n',
Em_a_tower);
fprintf('   E_max (в середині) = %.3f кВ/м  [%.1f%%] \n',
Em_a_mid, 100*(Em_a_mid/Em_a_tower-1));
fprintf('   B_max (на опори)   = %.3f мкТл \n',
Bm_a_tower);
fprintf('   B_max (в середині) = %.3f мкТл  [%.1f%%] \n',
Bm_a_mid, 100*(Bm_a_mid/Bm_a_tower-1));
fprintf(' \n');
fprintf('   СЗЗ (Е, середина) = ±%.1f м \n',
sz_E_a);
fprintf('   СЗЗ (В, середина) = ±%.1f м \n',
sz_B_a);
fprintf(' \n');
fprintf('   Синфазний (порівняння): \n');
fprintf('   E_max (середина) = %.3f кВ/м \n',
max(E_syn(round(nz/2+0.5),:)));
fprintf('   B_max (середина) = %.3f мкТл \n',
max(B_syn(round(nz/2+0.5),:)));
fprintf('   СЗЗ (Е) = ±%.1f м   |   СЗЗ (В) = ±%.1f м \n',
sz_E_s, sz_B_s);
fprintf(' \n');
fprintf('   Ефект ДОРПЛ vs Синфазний (середина прольоту): \n');
fprintf('   Зниження Е: у %.1f разів \n',
max(E_syn(round(nz/2+0.5),:))/Em_a_mid);
fprintf('   Зниження В: у %.1f разів \n',
max(B_syn(round(nz/2+0.5),:))/Bm_a_mid);
fprintf(' \n');

% ===== ДОПОМІЖНІ ФУНКЦІЇ =====

function patch_plane(ax, xv, zv, val, clr, alpha)
% Малює горизонтальну площину z=val для позначення межі ГДК
xp = [min(xv) max(xv) max(xv) min(xv)];
zp = [min(zv) min(zv) max(zv) max(zv)];
vp = val * ones(1, 4);
patch(ax, xp, zp, vp, clr, 'FaceAlpha', alpha, 'EdgeColor', 'none');
end

function [X, Y, U, I] = generate_geometry(Xc, Ym, Dv, th, rb, Uph, Itot, ns,
is_anti)
% Генерація координат 36 провідників (3 фази × 2 кола × 3 пучка ×
[антифаза/синфаза])
X = []; Y = []; U = []; I = [];
shift = 0;
if is_anti, shift = pi; end % Противафазне включення кіл
for f = 1:3
    pos      = [Ym + Dv/2,   Ym - Dv/2]; % Верхнє /
нижнє коло
    u_vals = [Uph(f),      Uph(f) * exp(1j*shift)];
    i_vals = [(Itot/(2*ns)) * exp(1j*angle(Uph(f))), ...
              (Itot/(2*ns)) * exp(1j*(angle(Uph(f)) + shift))];

```

```

    for node = 1:2
        for s = 1:ns
            X(end+1) = Xc(f) + rb * cos(th(s));           %#ok<AGROW>
            Y(end+1) = pos(node) + rb * sin(th(s));         %#ok<AGROW>
            U(end+1) = u_vals(node);                         %#ok<AGROW>
            I(end+1) = i_vals(node);                         %#ok<AGROW>
        end
    end
end

function t = calc_tau(x, y, u, r, e0)
    % Метод потенціальних коефіцієнтів + дзеркальні відбитки
    % [U] = [A]*[tau] => [tau] = [A]^-1 * [U]
    n = length(x);
    A = zeros(n);
    for i = 1:n
        for j = 1:n
            D = sqrt((x(i)-x(j))^2 + (y(i)-y(j))^2);
            if i == j, D = r; end % Власний
        end
        потенціал: r_cond
        Dp = sqrt((x(i)-x(j))^2 + (y(i)+y(j))^2); % Дзеркальний провід
        A(i,j) = (1/(2*pi*e0)) * log(Dp/D);
    end
    t = A \ u.';
end

function [Ex, Ey, Bx, By] = calc_point_field(px, py, X, Y, tau, I, e0, m0)
    % Поле від системи нескінченних паралельних проводів (+ їх дзеркальних відображень)
    % Рівняння (4) та (6) з матеріалу конференції
    Ex=0; Ey=0; Bx=0; By=0;
    for i = 1:length(X)
        dx = px - X(i);
        dy1 = py - Y(i); % Вектор до реального проводу
        dy2 = py + Y(i); % Вектор до дзеркального проводу
        Ec = tau(i) / (2*pi*e0);
        Ex = Ex + Ec*(dx/(dx^2+dy1^2) - dx/(dx^2+dy2^2));
        Ey = Ey + Ec*(dy1/(dx^2+dy1^2) - dy2/(dx^2+dy2^2));
        Bc = (m0 * I(i)) / (2*pi);
        Bx = Bx - Bc * dy1 / (dx^2+dy1^2);
        By = By + Bc * dx / (dx^2+dy1^2);
    end
end

```

Цей та інші коди потребують версію MATLAB 2018b, або новіші.