

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ



Чорноморський національний університет
імені Петра Могили

Кафедра управління земельними ресурсами

ПАНЧЕНКО ТИМУР ЗАХАРОВИЧ

"Точність визначення меж охоронних зон ліній електропередач"

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня вищої освіти другого (магістерського) рівня

галузі знань 19 "Архітектура та будівництво"

спеціальності 193 "Геодезія та землеустрій"

за освітньо-професійною програмою "Землеустрій та кадастр"

Науковий керівник:
Перович Л.М., д-р техн. наук, професор

Рецензент:
ФОП Лановський О.В.

Миколаїв 2025

ЗМІСТ

ВСТУП	3
РОЗДІЛ 1 ТЕОРЕТИЧНІ ТА МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ВИЗНАЧЕННЯ МЕЖ ОХОРОННИХ ЗОН ЛЕП.....	8
1.1. Поняття та класифікація ліній електропередач.	8
1.2. Нормативно-правове забезпечення встановлення охоронних зон ЛЕП.....	11
1.3. Геометричні параметри охоронних зон для різних класів напруги.....	14
1.4. Методичні підходи до визначення охоронних зон у сучасному землеустрої.	18
Висновки до розділу 1	21
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТОЧНОСТІ ГЕОДЕЗИЧНИХ ВИМІРЮВАНЬ.....	24
2.1. Дослідження точності визначення меж ліній електропередач	24
2.2. Фактори, що впливають на точність визначення меж охоронних зон.	30
2.3. Фізичні та конструктивні параметри ліній електропередач, що впливають на просторове моделювання охоронних зон.	32
2.4. Системи координат та трансформації, що впливають на точність моделювання охоронних зон.....	35
2.5. Класифікація похибок під час визначення меж охоронних зон.....	38
Висновки до розділу 2.....	40
РОЗДІЛ 3 МЕТОДИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ПРОСТОРОВОГО МОДЕЛЮВАННЯ МЕЖ ОХОРОННИХ ЗОН.....	44
3.1. Використання ГІС-технологій для побудови охоронних зон.	44
3.2. Алгоритми формування буферних зон у ГІС та їх точність.	48
3.3. Особливості 3D-моделювання ЛЕП у геоінформаційних системах.	51
3.4. Топологічні помилки під час моделювання охоронних зон та методи їх усунення.	54
3.5. Інтегральні моделі точності при поєднанні різнорідних просторових даних.	57
3.6. Використання цифрових моделей рельєфу при моделюванні охоронних зон ЛЕП.	61
3.7. Похибки ГІС-моделювання охоронних зон ліній електропередач.	64
Висновки до розділу 3	68
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ В ПРОФЕСІЙНІЙ ДІЯЛЬНОСТІ.....	70
ВИСНОВКИ.....	74
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	78

ВСТУП

Сучасний розвиток енергетичної інфраструктури в Україні робить питання точності визначення меж охоронних зон ліній електропередач особливо важливим. ЛЕП є критичною частиною енергосистеми, яка забезпечує стабільне постачання електроенергії на значні відстані. Будь-які неточності у визначенні меж охоронних зон можуть призвести до порушення правил користування землею, ускладнення виконання землевпорядних робіт, юридичних конфліктів та потенційних ризиків для безпеки населення й об'єктів інженерної інфраструктури. У зв'язку з цим виникає проблема забезпечення достовірності просторових даних, від яких залежить як безпечна експлуатація ЛЕП, так і якість управління територіями.

Актуальність теми посилюється в умовах цифровізації землевпорядних процесів, інтеграції геодезичних та кадастрових даних, а також оновлення законодавчих вимог щодо використання та охорони земель. Сьогодні межі охоронних зон відіграють важливу роль у регулюванні землекористування, плануванні територій та запобіганні потенційним аварійним ситуаціям. Проте на практиці часто виникають розбіжності між фактичним просторовим розташуванням ЛЕП, даними картографічних матеріалів та інформацією, внесеною до Державного земельного кадастру. Це свідчить про потребу вдосконалення методів визначення меж охоронних зон та підвищення точності відповідних розрахунків.

Розвиток сучасних технологій, таких як високоточні GNSS-системи, дистанційне зондування Землі, обробка ортофотоданих та геоінформаційні системи, створює нові можливості для підвищення точності просторових вимірювань. Водночас різниця між методами збору даних, їх якістю та умовами застосування потребує детального аналізу. Важливо не лише порівняти точність різних підходів, але й зрозуміти, які фактори найбільше впливають на кінцевий результат. Це формує наукову проблему, що полягає в необхідності комплексної оцінки точності визначення меж охоронних зон ЛЕП та пошуку шляхів її підвищення.

Зв'язок роботи з науковими та освітніми програмами полягає у відповідності завданню підготовки фахівців у галузі геодезії та землеустрою, зокрема щодо розвитку методології просторових вимірювань, удосконалення землеустрою та формування якісних кадастрових даних.

Метою даної роботи є підвищення точності визначення меж охоронних зон ліній електропередач на основі аналізу сучасних технологій просторових вимірювань та геоінформаційного моделювання.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- з'ясувати теоретичні аспекти та нормативно-правові вимоги щодо формування охоронних зон ЛЕП;
- проаналізувати доступні джерела геопросторових даних і технології їх обробки;
- дослідити точність визначення меж охоронних зон за різними підходами; виявити фактори, що впливають на точність побудови таких меж;
- сформулювати практичні рекомендації щодо підвищення достовірності просторових розрахунків.

Об'єктом дослідження є процес визначення меж охоронних зон ліній електропередач.

Предметом дослідження є методи та технології оцінювання точності визначення цих меж у системі сучасних геопросторових даних.

Методи дослідження включають аналіз нормативно-правових джерел, порівняльний аналіз геопросторових даних, методи геоінформаційного моделювання, аналітичні та статистичні методи оцінювання похибок.

Щоб виконати поставлені в дослідженні завдання, було застосовано комплекс наукових методів, які забезпечили всебічний аналіз точності визначення меж охоронних зон ліній електропередач. Абстрактно-логічний метод дав змогу узагальнити наукові підходи до моделювання охоронних зон, систематизувати технічні, геодезичні та нормативні положення та сформулювати теоретичну основу дослідження. Методи аналізу й синтезу дозволили оцінити особливості формування просторових моделей ЛЕП, порівняти різні джерела

просторових даних, визначити вплив похибок вимірювань на результат та з'ясувати закономірності виникнення просторових відхилень. Графічний метод застосовано для наочного відтворення побудови охоронних зон, демонстрації геометрії проводів та представлення результатів ГІС-моделювання. Метод аналогії та узагальнення використано для порівняння різних підходів до побудови буферних зон, аналізу можливостей 2D і 3D-моделювання, а також для визначення оптимальних рішень щодо підвищення точності встановлення меж охоронних зон, ґрунтуючись на сучасних технічних і технологічних практиках.

Інформаційну базу дослідження склали Закони України, постанови Кабінету Міністрів України та Верховної Ради України; статистичні дані Держгеокадастру України, Державного комітету статистики України; наукові публікації вітчизняних і зарубіжних вчених.

Наукова новизна роботи полягає у систематизації підходів до визначення меж охоронних зон ЛЕП з позиції точності, а також у формуванні комплексної моделі факторів, що впливають на просторові похибки. Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості використання рекомендацій для підвищення точності геодезичного забезпечення, удосконалення картографічних матеріалів та оптимізації кадастрових процесів, пов'язаних з обмеженнями у використанні земель.

Найвагоміші наукові результати полягають у наступному:

удосконалено:

- теоретичні підходи до визначення охоронних зон ліній електропередач, що дало змогу уточнити просторову структуру зон з особливими умовами використання земель з урахуванням геометрії проводів, рельєфу місцевості та конструктивних параметрів ЛЕП, забезпечивши більш точне відтворення їх реального положення у просторі;

- методику аналізу точності геодезичних вимірювань, на підставі якої удосконалено оцінювання впливу випадкових, систематичних і технічних

похибок на положення меж охоронних зон, що дозволило сформувати комплексний підхід до контролю геодезичної точності при моделюванні ЛЕП;

- ГІС-методи побудови охоронних зон, шляхом уточнення алгоритмів буферизації та топологічної перевірки лінійних об'єктів, що забезпечує підвищення достовірності моделі охоронних зон у процесах землеустрою та просторового планування;

- підходи до використання систем координат і трансформацій, що дало змогу мінімізувати похибки суміщення просторових даних різної природи та забезпечити їх узгодженість під час побудови моделей охоронних зон ЛЕП;

дістали подальшого розвитку:

- інтегральні моделі точності при поєднанні різнорідних просторових даних, які враховують вагові коефіцієнти точності та дозволяють формувати узгоджену модель охоронної зони на основі даних GNSS, цифрових моделей рельєфу, кадастрової інформації та технічних характеристик ЛЕП;

- 3D-моделювання ліній електропередач у ГІС, що дозволило більш точно врахувати поведінку проводів у вертикальній площині, сезонні зміни стріли провисання та вплив рельєфу на просторове положення охоронних зон;

- методи виявлення та усунення топологічних помилок лінійних об'єктів, що забезпечило підвищення надійності побудови охоронних зон і зменшення ризику виникнення деформованих або неповних геометричних моделей у процесі ГІС-аналізу;

- методичні підходи до застосування ГІС-технологій у встановленні зон з особливими умовами використання земель, що забезпечило можливість більш точного, обґрунтованого та стандартизованого визначення меж охоронних зон ЛЕП у межах землеупорядної та кадастрової діяльності.

Практичне значення одержаних результатів. Теоретико-методичні напрацювання, висновки та рекомендації роботи можуть знайти застосування в практичній діяльності територіальних органів Держгеокадастру, органів виконавчої влади, а також фізичних і юридичних осіб.

Особистий внесок автора полягає у проведенні аналізу методів визначення меж охоронних зон, опрацюванні джерел геопросторової інформації, узагальненні факторів впливу на точність та формуванні рекомендацій щодо її підвищення. Апробація основних положень роботи здійснювалась у процесі виконання навчальних та практичних завдань у межах освітньої програми "Геодезія та землеустрій".

Структура кваліфікаційної роботи. Клафікаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел. Загальний обсяг роботи становить 84 сторінки, з них 76 сторінки – основного тексту. Матеріали кваліфікаційної роботи містять 5 рисунків та 2 таблиці. Список використаних джерел нараховує 58 найменування.

РОЗДІЛ 1

ТЕОРЕТИЧНІ ТА МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ВИЗНАЧЕННЯ МЕЖ ОХОРОННИХ ЗОН ЛЕП

1.1. Поняття та класифікація ліній електропередач.

Лінії електропередач є ключовим елементом енергетичної інфраструктури, оскільки забезпечують передачу електричної енергії на значні відстані — від генерувальних підприємств до споживачів [1]. Їхня роль виходить далеко за межі технічного призначення: стабільна робота ЛЕП формує основу економічної безпеки держави, впливає на темпи розвитку регіонів та визначає можливості функціонування критично важливих об'єктів. У зв'язку з цим класифікація ЛЕП та розуміння їхніх конструктивних, технічних і функціональних особливостей є необхідним аналітичним підґрунтям для подальшого моделювання охоронних зон і дослідження точності їхніх меж.

У широкому розумінні лінія електропередач — це комплекс споруд, що складається з опор, проводів, ізоляторів, арматури, заземлювальних пристроїв [3] та допоміжних елементів, які забезпечують безпечну і безперебійну передачу електроенергії. На законодавчому рівні ЛЕП визначаються як електричні мережі, призначені для транспортування електричної енергії повітряними або кабельними трасами [4], де електропроводи розміщуються на опорах або в ґрунті.

Класифікація ЛЕП охоплює кілька груп параметрів, що використовуються в технічних регламентах, енергетичних стандартах і проєктній документації. Найпоширенішою є класифікація за класом напруги, який визначає призначення лінії, допустиму потужність, конструктивні особливості та тип необхідних охоронних заходів. В Україні застосовується таке групування [4]:

- до 1 кВ — низьковольтні лінії;
- 6–35 кВ — лінії середньої напруги;

- 110–150 кВ — високовольтні;
- 220–330 кВ — надвисоковольтні;
- 400–750 кВ — магістральні міжсистемні лінії.

Показник напруги безпосередньо впливає на ширину охоронної зони [5], мінімальні допустимі відстані, вимоги до габаритів підвісу та рівень електромагнітного впливу. Чим вищий клас напруги — тим суворіші технічні регламенти щодо експлуатації та визначення меж обмежень.

Окрім класу напруги, суттєвим фактором класифікації є тип виконання ЛЕП. За цією ознакою виділяють два основні різновиди [3]:

- повітряні лінії електропередач (ПЛ) — проводи прокладені відкрито, на опорах;
- кабельні лінії (КЛ) — проводи розташовані в ґрунті, колекторах або у спеціальних каналах.

Повітряні лінії є найпоширенішим типом, оскільки вони технологічно простіші, дешевші у будівництві, легше обслуговуються, мають менші вимоги до підготовчих робіт. Кабельні ж лінії використовуються у місцях, де встановлення опор неможливе або небажане: у великих містах, історичних центрах, на ділянках із високою щільністю забудови, у місцях перетину транспортних магістралей або природних перешкод [6].

Наступною важливою ознакою класифікації є кількість ланцюгів). За цією характеристикою ЛЕП поділяють на [3]:

- одно-ланцюгові (одна пара фазних проводів);
- дволанцюгові (дві паралельні системи проводів на одній трасі);
- багатоланцюгові (застосовуються на магістральних лініях надвисокої напруги).

Наявність кількох ланцюгів впливає на конфігурацію охоронної зони, адже збільшує ширину розміщення провідників, а відповідно — і простір, у межах якого встановлюються обмеження [4]. Дволанцюгові ЛЕП забезпечують резервування потужності та підвищену надійність, тому використовуються на критично важливих напрямках.

До конструктивних характеристик, за якими класифікують ЛЕП, також належать типи опор і несучих конструкцій. Опори бувають [2;7]:

- дерев'яні — застосовуються у мережах низької та середньої напруги;
- залізобетонні — найпоширеніші для мереж від 10 до 150 кВ;
- металеві ґратчасті — використовуються у мережах високої та надвисокої напруги;
- порталні та анкерні вежі — для складних інженерних умов і великих кутів повороту траси.

Характер опор визначає не лише технічні можливості лінії, а й просторовий характер охоронної зони. Наприклад, анкерні опори мають більшу ширину конструкції, що збільшує зону технічного обслуговування, тоді як проміжні опори мають мінімальні габарити.

Ще однією значущою класифікаційною ознакою є характер трасування. Враховується, чи проходить лінія:

- у межах населених пунктів;
- через землі сільськогосподарського призначення;
- по лісових ділянках;
- через водні перешкоди або заболочені місцевості;
- у гірських регіонах.

Трасування суттєво впливає на технічні рішення та ширину охоронної зони. Наприклад, у лісових масивах враховують небезпеку падіння дерев, тому нормативи можуть вимагати збільшення габаритів розчистки та обмежень [7]. На рівнинних територіях вимоги менш суворі, але в містах охоронні зони взаємодіють з великою кількістю інженерних мереж, що ускладнює моделювання.

У нормативній літературі також застосовується класифікація за типом проводів, що впливає на параметри електромагнітного поля, поведінку

провідників під навантаженням та конфігурацію стріли провисання. За цією ознакою проводи поділяються на:

- однодротові — використовуються у мережах невисокої та середньої напруги;
- багатодротові або пучкові — застосовуються у мережах високих та надвисоких напруг, де зменшення коронних втрат і підвищення пропускну здатності є критично важливими [8].

Тип проводів впливає і на форму охоронної зони, адже масивні пучкові проводи потребують більших міжфазних відстаней, що в сукупності збільшує ширину зони обмежень.

З огляду на наведені класифікаційні ознаки можна зробити висновок, що кожна лінія електропередач має унікальну комбінацію характеристик, які визначають її поведінку в просторі, конструктивні особливості, експлуатаційні умови та параметри охоронної зони. У подальшій роботі це відіграє ключову роль, адже моделювання меж охоронних зон повинно враховувати саме ті параметри, що стосуються конкретного типу ЛЕП — починаючи від класу напруги і типу опор та закінчуючи профілем місцевості й технічним станом проводів.

Класифікація ліній електропередач ґрунтується на поєднанні технічних, конструктивних та функціональних характеристик, які визначають правила експлуатації, вимоги до безпечних відстаней та нормативи охоронних зон. Це створює міцне теоретичне підґрунтя для подальшого аналізу точності визначення меж охоронних зон і формування комплексної ГІС-моделі, що забезпечить достовірність просторових даних та відповідність вимогам чинного законодавства.

1.2. Нормативно-правове забезпечення встановлення охоронних зон ЛЕП.

Правове регулювання встановлення охоронних зон ліній електропередач в Україні ґрунтується на поєднанні земельного, енергетичного, екологічного

та містобудівного законодавства. Це зумовлено тим, що охоронні зони ЛЕП є не лише технічним, а й правовим інструментом, який забезпечує безпеку населення, надійність функціонування енергетичної інфраструктури та раціональне використання земельних ресурсів.

У центрі системи правового регулювання перебуває Земельний кодекс України, який визначає правовий режим земель з обмеженнями у використанні [9]. Охоронні зони належать до категорії земель з особливими умовами використання, і для них встановлюються спеціальні правила щодо забудови, землекористування, проведення господарської діяльності та розміщення інженерних споруд. Саме через це межі таких зон повинні бути чітко визначені та просторово закріплені, що робить питання точності ключовим аспектом правозастосування [12].

Важливе значення має законодавство у сфері електроенергетики, яке регламентує порядок експлуатації та технічного обслуговування ЛЕП, визначає обов'язки операторів системи передачі і розподілу, а також встановлює вимоги до безпечної експлуатації електричних мереж. У нормах технічних правил закріплено підходи до визначення ширини охоронних зон, мінімальних відстаней до будівель, споруд, деревної рослинності та інших об'єктів. Ці вимоги інтегруються у проєктну та землеустроювальну документацію під час встановлення охоронних зон.

Суттєвий вплив на просторове визначення охоронних зон мають стандарти у сфері енергетики, будівництва та охорони праці, де містяться норми щодо безпечних відстаней, конструктивних параметрів опор, габаритів підвісу проводів, а також вимоги щодо експлуатації обладнання під напругою. Хоч формально ці документи не є землеустроювальними, вони визначають технічну основу для формування охоронних зон, що робить їх важливою частиною правового поля.

Окрему роль у правовому регулюванні відіграють нормативні акти, що визначають режим функціонування інженерних мереж та вимоги до їх взаємодії з іншими об'єктами інфраструктури. У них містяться положення

щодо того, які види діяльності допускаються або забороняються в межах охоронних зон. Наприклад, забороняється спорудження будівель, розташування тимчасових конструкцій, виконання земляних робіт без погодження з експлуатуючою організацією, а також будь-які дії, що можуть порушити стійкість опор чи створити загрозу безпечній експлуатації мереж.

У системі сучасного землеустрою охоронні зони ЛЕП розглядаються як обмеження у використанні земель, що підлягають обов'язковому відображенню в державному земельному кадастрі. Відповідно до чинних правил, їх просторові межі мають бути визначені з достатньою точністю, забезпечені геодезичним супроводом і внесені до кадастру у вигляді окремих об'єктів. Це забезпечує юридичну визначеність та дозволяє уникнути конфліктів між землевласниками, органами влади та операторами енергетичних мереж.

Значну увагу законодавство приділяє питанням узгодженості охоронних зон із містобудівною документацією [11]. Оскільки розміщення ЛЕП суттєво впливає на планування територій, їх охоронні зони повинні бути інтегровані до генеральних планів населених пунктів, детальних планів територій і комплексних планів просторового розвитку громад. Це дозволяє забезпечити збалансоване територіальне планування, уникнути накладення охоронних зон із зонами транспортної інфраструктури, житлової та громадської забудови, природоохоронними територіями.

Важливим є і регулювання відповідальності за порушення вимог охоронного режиму. Законодавство передбачає адміністративну та у деяких випадках кримінальну відповідальність за самовільне виконання робіт у межах охоронних зон, пошкодження опор чи проводів, створення аварійних ситуацій [13]. Це підкреслює значення належного встановлення меж обмежень, адже будь-яка правова дія ґрунтується на їх точному просторовому відтворенні.

У межах нормативного регулювання охоронних зон усе більшої ваги набувають цифрові стандарти просторових даних та вимоги до сумісності геоінформаційних систем [14]. Це пов'язано з тим, що сучасні підходи до

управління інженерною інфраструктурою передбачають інтеграцію даних різних відомств у єдиному інформаційному середовищі, де точність і взаємовідповідність координат відіграють вирішальну роль.

Нормативно-правова база встановлення охоронних зон ЛЕП формує комплексне середовище, де технічні, земельні та юридичні вимоги взаємодіють між собою. Вона визначає як методи встановлення меж, так і вимоги до їх точності, що робить правове регулювання ключовим фундаментом для подальшого моделювання охоронних зон та оцінювання їх просторових параметрів у геоінформаційних системах.

1.3. Геометричні параметри охоронних зон для різних класів напруги.

Геометричні параметри охоронних зон ліній електропередач визначаються поєднанням технічних характеристик лінії, вимог електробезпеки та норм, що регулюють допустиму відстань від елемента ЛЕП до об'єктів навколишнього середовища. Ці параметри мають фундаментальне значення, оскільки саме вони задають простір, у межах якого діє особливий режим використання земель. У практиці землеустрою від точності визначення таких параметрів залежить коректність нанесення охоронних зон на кадастрові плани, а також юридична обґрунтованість обмежень для землевласників і користувачів.

У загальному випадку охоронна зона ЛЕП — це смуга землі, обмежена паралельними лініями, що проходять по обидва боки від проекції крайніх проводів на поверхню землі [5]. Ширина цієї смуги залежить передусім від класу напруги, який визначає рівень електромагнітного впливу, розміри габаритів підвісу та вимоги щодо забезпечення безпечної експлуатації мережі. Чим вища напруга, тим більшими є як горизонтальні, так і вертикальні мінімальні відстані, необхідні для запобігання небезпечному наближенню людей, техніки, будівель або рослинності до проводів.

У діючих технічних нормах наводяться стандартизовані значення ширини охоронних зон. Ці параметри враховують геометрію проводів, конструкції опор, стрілу провисання та можливі конструктивні відхилення під час експлуатації. Показники мають бути достатніми для безпечного виконання ремонтних і оглядових робіт, а також для уникнення контакту сторонніх предметів із проводами під напругою.

З огляду на чинні технічні регламенти, ширина охоронних зон повітряних ЛЕП для різних класів напруги може бути узагальнена в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1

Нормативні ширини охоронних зон повітряних ліній електропередач.

Клас напруги ЛЕП	Ширина охоронної зони від крайніх проводів, м (у кожен бік)
До 1 кВ	2 м
6–20 кВ	10 м
35 кВ	15 м
110 кВ	20 м
150–220 кВ	25 м
330 кВ	30 м
400–750 кВ	40 м

Джерело: Сформовано автором на основі [Постанова КМУ "Про затвердження Правил охорони електричних мереж" від 27 грудня 2022 р. № 1455: станом на 20 вересня 2025 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1455-2022-%D0%BF#Text> (дата звернення: 22.09.2025)]

Ці значення є не випадковими — вони враховують як електромагнітний вплив, так і технічні габарити проводів у різних кліматичних та експлуатаційних умовах. Наприклад, у лініях напругою 330 кВ і вище передбачено більшу ширину охоронної зони через значну стрілу провисання та високий рівень напруженості електричного поля поблизу проводів [8].

Однак навіть за наявності нормативно встановлених значень реальна геометрія охоронних зон може варіюватися залежно від конфігурації конкретної ЛЕП. На це впливають:

- діаметр і маса проводів;
- кількість проводів у фазі;
- кліматичні навантаження (вітер, ожеледь);
- висота та тип опор;
- характер рельєфу;
- територіальні особливості (місто, село, лісові масиви).

Саме через це у практиці фотограмметричних, GNSS-та геодезичних зйомок необхідно враховувати реальні просторові положення проводів, а не лише паспортні значення [14].

Окремої уваги потребує питання вертикальних відстаней, які визначають мінімальний допустимий підвіс проводів над землею та об'єктами. Ці параметри прямо впливають на конфігурацію охоронних зон і враховуються під час моделювання. Мінімальна висота проводу змінюється залежно від кліматичних умов, ваги провідникових матеріалів, температурних коливань та величини струмового навантаження. Відомо, що зі збільшенням температури провід має властивість видовжуватися, збільшуючи стрілу провисання, що вимагає корекції безпечних відстаней. Саме тому проєктні значення завжди передбачають певний резерв для компенсації можливих деформацій.

У складних інженерних умовах — під час перетину автодоріг, залізниць, водних об'єктів, трубопроводів — застосовуються спеціальні нормативи, які вимагають збільшення габаритів безпеки [10]. У таких випадках навіть для ліній відносно низької напруги ширина охоронної зони може бути більшою, а мінімальні відстані — жорсткішими. Це пов'язано з підвищеними вимогами до забезпечення надійності й недопущення аварійних ситуацій, що можуть спричинити значні економічні збитки або загрожувати життю та здоров'ю людей.

Геометричні параметри охоронних зон враховують не лише ширину та вертикальні габарити, але й планову конфігурацію самої лінії. Наприклад, на ділянках повороту траси охоронна зона набуває асиметричної форми, а у місцях встановлення анкерних опор може потрібне додаткове розширення в

зоні розтяжок. Важливим також є врахування рельєфу: на підвищеннях та схилах проводи можуть розташовуватися ближче до поверхні землі, ніж у рівнинних умовах, що підвищує ризик небезпечного наближення та потребує коригування граничних відстаней.

У сучасній практиці встановлення охоронних зон усе ширше використовуються дані лазерного сканування, безпілотних літальних апаратів, цифрових моделей рельєфу та 3D-аналітики [14]. Такі підходи дозволяють отримувати реальну конфігурацію проводів у просторі, враховуючи їхню фактичну стрілу провисання і зміну форми під впливом температури та вітрових навантажень. Використання цих даних значно підвищує точність моделювання охоронних зон і дозволяє уникнути помилок, пов'язаних з автоматичним застосуванням нормативних значень без урахування фактичного стану ЛЕП.

Геометричні параметри охоронних зон формують цілісну просторову картину, у якій технічні характеристики лінії, особливості рельєфу та нормативні вимоги взаємодіють між собою. Саме тому під час визначення меж охоронних зон важливо враховувати не лише регламентовані значення, а й реальні просторові умови, характерні для конкретної ЛЕП. Застосування сучасних геодезичних та ГІС-технологій — зокрема лазерного сканування, даних БПЛА та 3D-моделювання — дає змогу точно відтворювати фактичне положення проводів та опор, коригуючи модель з урахуванням температурних, вітрових та конструктивних факторів. Такий підхід підвищує надійність розрахунків, мінімізує ризик помилок і створює інформаційну основу для правомірного та обґрунтованого внесення меж охоронних зон до державного земельного кадастру.

1.4. Методичні підходи до визначення охоронних зон у сучасному землеустрої.

Методика визначення охоронних зон ліній електропередач у сучасному землеустрої формується на перетині технічних регламентів, вимог електробезпеки, картографічних стандартів і принципів точного просторового моделювання. На відміну від суто технічних правил, які описують мінімальні допустимі відстані й параметри габаритів, методичні підходи орієнтовані на комплексне відтворення меж охоронних зон у реальних просторових умовах, що потребує узгодження даних різної точності, різних форматів та різних джерел походження.

У практиці землеустрою встановлення охоронних зон розглядається як двоетапний процес:

1) аналітичне визначення параметрів зони на основі нормативів, технічної документації та вихідних геодезичних даних [2;4];

2) просторове моделювання меж у координатній системі, що використовується в державному земельному кадастрі [14].

Обидва етапи взаємозалежні, і якість кожного з них визначає точність остаточного результату.

Першим елементом методики є отримання достовірної вихідної інформації. Йдеться про координати опор, тип та конфігурацію проводів, висотні параметри, паспортні характеристики ЛЕП, а також інформацію про рельєф і наявні обмеження використання землі. У багатьох випадках доцільним є залучення даних GNSS-вимірювань, тахеометричних зйомок або фотограмметрії з БПЛА, що дозволяє уточнити фактичне положення елементів ЛЕП. Від правильності збору вихідних даних залежить можливість реалістичного відтворення охоронної зони, особливо на ділянках складного рельєфу або в населених пунктах із щільною забудовою.

Другим ключовим елементом є вибір методики визначення внутрішньої та зовнішньої меж охоронної зони. Традиційно ширина охоронної зони формувалася на основі нормативних значень, що задавали фіксовану відстань

від крайнього проводу. Проте сучасний підхід передбачає врахування фактичного положення проводів, їх стріли провисання, сезонних змін та технічного стану опор. Розрахункова схема має бути адаптована до конкретних умов, що потребує застосування буферних алгоритмів у ГІС, здатних моделювати зону з урахуванням просторових викривлень, зміни висоти місцевості та конфігурації траси.

У практиці сучасного землеустрою дедалі більше використовується цифрове моделювання реальної траси ЛЕП, яке дозволяє інтегрувати різноманітні дані — від планових координат опор до цифрових моделей рельєфу. Такий підхід забезпечує точніше визначення меж, ніж традиційні картографічні методи, і мінімізує похибки, пов'язані з генералізацією або неточним перенесенням ліній на кадастрові плани. Застосування цифрових моделей особливо важливе на складних ділянках — у гірських районах, у місцях переходів через річки, балки чи транспортну інфраструктуру.

Сучасні методичні підходи також передбачають перевірку топологічної коректності отриманої моделі, що включає відсутність пересічень, розривів, помилкових сегментів і невідповідностей між проєкцією лінії та фактичним положенням об'єктів місцевості. Такі помилки можуть зумовити значні юридичні наслідки — від накладення обмежень на невідповідні земельні ділянки до неправильного внесення відомостей у державний кадастр.

Наступним важливим елементом методики є гармонізація просторових даних, що використовуються для моделювання охоронних зон. У практиці часто виникають ситуації, коли координатні системи, в яких виконувалися геодезичні вимірювання, не збігаються з системою координат, прийнятою в державному земельному кадастрі. У таких випадках необхідним є виконання точних трансформацій — як лінійних, так і більш складних, коли працюють з локальними системами координат або застарілими топографічними матеріалами. Використання некоректно трансформованих даних може спричинити розбіжності у десятки метрів, що унеможлиблює внесення

охоронної зони в кадастр або може створити юридичні колізії щодо прав на землю.

У сучасних підходах особливе місце займає оцінювання точності моделі, яке здійснюється шляхом порівняння отриманих меж з незалежними вимірюваннями або аналітичними розрахунками. Це дозволяє визначити ступінь відповідності фактичній геометрії ЛЕП і, за потреби, скоригувати модель. Оцінювання точності є обов'язковим етапом, оскільки формування охоронних зон має юридичні наслідки, і будь-яка похибка в просторовому положенні межі може спричинити спори між землевласниками або порушення правил експлуатації об'єкта.

Важливим методичним підходом, що дедалі частіше застосовується в землеустрої, є використання 3D-моделювання. Воно дозволяє враховувати не лише планове положення проводів, але й їхню висоту, форму дуги та провисання під впливом температурних змін. Для ЛЕП високих і надвисоких напруг це є особливо актуальним, оскільки вертикальні зміщення проводів можуть суттєво впливати на ширину охоронної зони. 3D-моделі забезпечують більш точне відображення небезпечних зон, особливо на ділянках, де наявні перепади висот, складний рельєф або забудова.

Ще одним важливим напрямом є врахування ризиків та аналіз сценаріїв, що застосовується у європейській практиці визначення охоронних зон. Суть підходу полягає у моделюванні потенційних ситуацій — наприклад, сильного вітру, аварійного обриву проводу або аномального провисання — і визначенні, чи залишаються межі охоронної зони безпечними за таких умов. У деяких випадках саме ризик-орієнтоване моделювання дає можливість встановити охоронні зони, що більш точно відповідають місцевим умовам, ніж стандартні нормативні значення.

Завершальним етапом методичного процесу є формування офіційної землеустроювальної документації, яка включає опис меж охоронної зони, картографічні матеріали, текстові обґрунтування та просторові моделі у вигляді файлів, що відповідають вимогам кадастру. Документація повинна

містити як вихідні дані, так і технічні рішення, а також інформацію щодо використаних алгоритмів моделювання, що забезпечує прозорість та відтворюваність результатів.

Загалом сучасні методичні підходи спрямовані на те, щоб охоронні зони ЛЕП визначалися не лише формально за нормативними параметрами, а й з урахуванням реальних просторових і технічних особливостей. Такий підхід підвищує точність моделювання, забезпечує відповідність правовим вимогам і створює надійну основу для подальшого внесення меж до державного земельного кадастру.

Висновки до розділу 1

Проведений аналіз засвідчив, що лінії електропередач є складними інженерними об'єктами, просторово-протяжними за своєю природою та різноманітними за технічними параметрами. Вивчення понятійного апарату і класифікаційних характеристик ЛЕП дозволило сформуванати цілісне розуміння їхньої будови, функціонування та особливостей взаємодії з навколишнім середовищем. Виявлено, що класифікація ЛЕП охоплює низку ключових ознак — характер траси, тип виконання, конструкцію опор, кількість ланцюгів та клас напруги, який визначає рівень електромагнітного впливу та мінімально допустимі відстані безпеки. Саме комбінація цих характеристик формує ті технічні умови, що диктують вимоги до ширини та геометрії охоронних зон.

Детальне вивчення нормативно-правового забезпечення встановлення охоронних зон ліній електропередач показало, що в Україні сформовано комплексну систему правового регулювання, що поєднує положення земельного, енергетичного, містобудівного та екологічного законодавства. Охоронні зони ЛЕП розглядаються не лише як елемент технічної безпеки, а й як юридична категорія, що забезпечує захист населення, надійність експлуатації та синхронізацію інженерних мереж із територіальним плануванням. Особливої ваги набуває вимога щодо точності просторового

визначення меж охоронних зон, адже будь-яке відхилення може спричинити конфлікт між землекористувачами, призвести до помилок у кадастрових даних або порушити умови експлуатації інфраструктурних об'єктів.

Вивчення геометричних параметрів охоронних зон за різними класами напруги показало, що встановлення меж базується не лише на фіксованих нормативних відстанях, а й на реальних технічних характеристиках кожної конкретної лінії. Зростання напруги потребує збільшення ширини охоронної зони, а складні інженерні умови — додаткових коригувань габаритів безпеки. Значну роль відіграють стріла провисання проводів, сезонні зміни їхнього положення, конструкції опор, рельєф та умови місцевості. Сучасна практика встановлення охоронних зон дедалі більше орієнтується на реальні просторові дані, а не на узагальнені нормативні значення, що особливо важливо для гірських територій, ділянок із різкими перепадами висот або зон із щільною забудовою.

Розгляд методичних підходів до визначення охоронних зон показав, що сучасний землеустрій рухається у напрямі комплексного цифрового моделювання всієї траси ЛЕП. Методика встановлення охоронних зон включає збір вихідних геодезичних даних, аналіз технічної документації, урахування конструктивних особливостей проводів та опор, використання цифрових моделей рельєфу, точні трансформації координат, перевірку топологічної коректності та оцінювання сумарної точності створеної моделі. Дуже важливим є перехід до 3D-аналітики, яка дозволяє враховувати вертикальні зміщення проводів і просторову поведінку лінії під впливом кліматичних та динамічних навантажень. У поєднанні ці методичні підходи забезпечують значно вищий рівень точності, ніж традиційні картографічні методи, та відповідають сучасним вимогам цифрового кадастру.

Комплексний аналіз теоретичних і методологічних аспектів визначення меж охоронних зон дозволив зробити висновок, що точність моделювання залежить не лише від геодезичних вимірювань, а й від якості нормативних та методичних рішень. Коректне встановлення меж охоронних зон можливе

лише за умови поєднання інженерно-технічних знань, просторових моделей, геодезичної точності, сучасних ГІС-технологій та правової відповідальності виконавця. Це підкреслює міждисциплінарний характер завдання: точність меж охоронних зон ЛЕП — це результат синхронної роботи землеустрою, геодезії, енергетики, містобудування та нормативно-правового забезпечення.

Проведене дослідження засвідчило також необхідність переходу до більш сучасних методів обробки геопросторових даних, що включають використання GNSS-технологій, безпілотних літальних апаратів, лазерного сканування, 3D-моделювання та аналітичних інструментів для оцінювання точності. Такий підхід забезпечує реалістичне відтворення положення ліній електропередач у просторі й дозволяє адаптувати охоронні зони до конкретних умов місцевості. Застосування цих технологій стає ключовим елементом підвищення достовірності кадастрових даних та створення надійних передумов для подальшої експлуатації інженерних мереж.

У цілому результати опрацювання теоретичного матеріалу показують, що встановлення меж охоронних зон ЛЕП є технічно й нормативно складною процедурою, що потребує комплексного аналізу технічних параметрів, правових норм і просторових особливостей території. Розуміння цих аспектів створює фундамент для подальших прикладних досліджень, пов'язаних з оцінюванням точності, моделюванням охоронних зон у ГІС та визначенням особливостей їхнього застосування в кадастрових системах та практиці землеустрою.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТОЧНОСТІ ГЕОДЕЗИЧНИХ ВИМІРЮВАНЬ

2.1. Дослідження точності визначення меж ліній електропередач

Оцінювання точності визначення меж зон впливу ліній електропередач базується на розумінні фізичної природи електромагнітного поля та просторових характеристик його поширення. Залежно від інтенсивності та структури впливу, а також від того, як відповідний чинник розповсюджується в навколишньому середовищі, можна визначити межі зон його дії та оцінити точність їх відтворення на місцевості. Для цього враховують нормативні значення гранично допустимих концентрацій або інших порогових показників, що визначають межу безпечного впливу.

Як приклад проаналізуємо теоретичні основи визначення точності встановлення меж зон, що формуються під дією електромагнітного поля ліній електропередач. Відомо, що відповідно до санітарно-гігієнічних норм України гранична густина потоку електромагнітної енергії не має перевищувати $2,5 \text{ мкВт/см}^2$. На рисунку 2.1 наведено схему поширення електромагнітних хвиль.

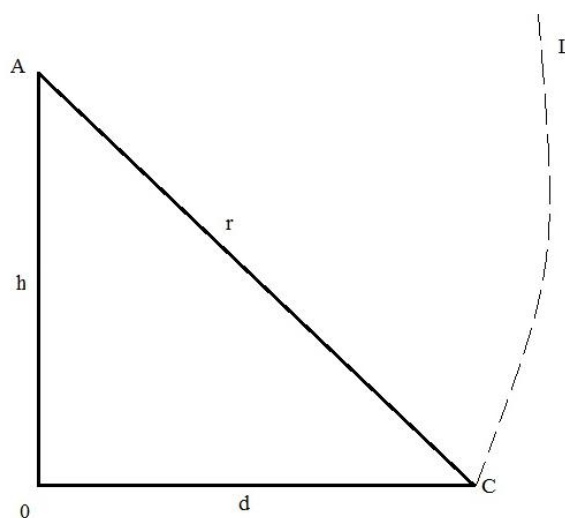


Рисунок. 2.1 Розповсюдження електромагнітних хвиль

Відповідно до рисунку маємо

$$d = \sqrt{r^2 - h^2}, \quad (2.1)$$

де h - висота антени, м;

r - радіус граничної ізолінії, м;

d - ширина санітарно-захисної зони, м.

З іншого боку, величину d представимо у вигляді

$$d = \sqrt{(x_c - x_0)^2 + (y_c - y_0)^2}, \quad (2.2)$$

де x_c, y_c - координати точки С;

x_0, y_0 - координати точки О.

Для оцінювання середньої квадратичної похибки використовують залежність:

$$m_d^2 = \left(\frac{\partial d}{\partial x_c} \right)^2 m_{x_c}^2 + \left(\frac{\partial d}{\partial x_0} \right)^2 m_{x_0}^2 + \left(\frac{\partial d}{\partial y_c} \right)^2 m_{y_c}^2 + \left(\frac{\partial d}{\partial y_0} \right)^2 m_{y_0}^2, \quad (2.3)$$

де $\frac{\partial d}{\partial x_c}, \frac{\partial d}{\partial x_0}, \frac{\partial d}{\partial y_c}, \frac{\partial d}{\partial y_0}$ - часткові похідні від змінних координат пунктів О та С;

$m_{x_c}, m_{x_0}, m_{y_c}, m_{y_0}$ - середні квадратичні похибки пунктів О і С.

Приймаючи координати вихідного пункту О безпомилковими і $m_{x_c} = m_{y_c} = m_{x,y}$ отримаємо

$$m_d^2 = 2m_{x,y}^2. \quad (2.4)$$

З іншого боку, відповідно до формули (4.4) середня квадратична похибка

$$m_d^2 = \frac{1}{d^2} (r^2 m_r^2 + h^2 m_h^2), \quad (2.5)$$

де m_2^2 - середня квадратична похибка радіусу граничної ізоляції розповсюдження електромагнітних випромінювань;

m_h^2 - середня квадратична похибка визначення висоти антени випромінювання електромагнітних хвиль.

Прирівнявши праві частини формул (2.3) та (2.5), маємо

$$m_{x,y}^2 = \frac{1}{2d^2} (r^2 m_r^2 + h^2 m_h^2). \quad (2.6)$$

Формула (2.6) дає змогу обчислити середні квадратичні похибки координат межі зони обмежень. При цьому важливо враховувати, що характер поширення електромагнітних хвиль безпосередньо залежить від фізичних характеристик передавальних антен.

Використовуючи основні положення теорії магнітної індукції, можна подати залежність між величиною індукції та радіусом її поширення у такому вигляді:

$$r = \frac{\mu_0 I}{2\pi B}, \quad (2.7)$$

де B - магнітна індукція, Тл (тесл);

I - величина струму у антені, А;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ - магнітна стала, Тл·м/А.

Для антен, що працюють на високих частотах і випромінюють електромагнітні поля, зручно перейти до використання потужності, скориставшись відомим співвідношенням:

$$P = \frac{1}{2} \cdot U \cdot I \text{ або } I = \frac{2P}{U}, \quad (2.8)$$

де P - потужність антени, Вт;

U - напруга енергозабезпечення, В.

З врахуванням (2.8) формула (2.7) прийме вигляд

$$r = \frac{\mu_0 P}{\pi B U}. \quad (2.9)$$

У загальному випадку вираз для обчислення середньої квадратичної похибки радіуса поширення магнітного поля можна подати у такій формі:

$$m_r^2 = \left(\frac{\partial r}{\partial P} \right)^2 m_p^2 + \left(\frac{\partial r}{\partial B} \right)^2 m_B^2 + \left(\frac{\partial r}{\partial U} \right)^2 m_U^2, \quad (2.10)$$

де $\frac{\partial r}{\partial P}$, $\frac{\partial r}{\partial B}$, $\frac{\partial r}{\partial U}$ - часткові похідні від функції (2.10) відповідно по змінних (потужності P , магнітній індукції B та напрузі U);

m_p, m_B, m_U - середні квадратичні похибки визначення змінних P , B та U .

Відповідно до формули (2.10) знайдемо часткові похідні. Маємо

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial r}{\partial P} &= \frac{\mu_0 P}{\pi B U}; \\ \frac{\partial r}{\partial B} &= \frac{-\mu_0 P}{\pi U B^2}; \\ \frac{\partial r}{\partial U} &= -\frac{\mu_0 P}{\pi B U^2}. \end{aligned} \right\}. \quad (2.11)$$

З врахуванням отриманих часткових похідних (2.11) формула (2.10) буде

$$m_r^2 = \left(\frac{\mu_0}{\pi B U} \right)^2 m_p^2 + \left(\frac{\mu_0 P}{\pi B^2 U} \right)^2 m_B^2 + \left(\frac{\mu_0 P}{\pi B U^2} \right)^2 m_U^2 \quad (2.12)$$

або

$$m_r^2 = \left(\frac{\mu_0}{\pi B U} \right)^2 \left[m_p^2 + \left(\frac{P}{B U} \right)^2 m_B^2 + \left(\frac{P}{U^2} \right)^2 m_U^2 \right]. \quad (2.13)$$

Враховуючи, що

$$r^2 = \frac{\mu_0^2 P^2}{\pi^2 B^2 U^2} \quad (2.14)$$

формулу (2.13) приведемо до більш компактного вигляду

$$m_r^2 = \frac{\mu_0^2}{\pi^2 B^2} \cdot \frac{P^2}{U^2} \left[\frac{1}{P^2} m_P^2 + \frac{1}{B^2} m_B^2 + \frac{1}{U^2} m_U^2 \right] \quad (2.15)$$

або

$$m_r^2 = r^2 \left[\frac{1}{P^2} m_P^2 + \frac{1}{B^2} m_B^2 + \frac{1}{U^2} m_U^2 \right]. \quad (2.16)$$

Підставивши значення m_r^2 із формули (2.16) в формулу (2.6), маємо

$$m_{x,y}^2 = \frac{1}{2d^2} \left[r^4 \left(\frac{1}{P^2} m_P^2 + \frac{1}{B^2} m_B^2 + \frac{1}{U^2} m_U^2 \right) + h^2 m_h^2 \right]. \quad (2.17)$$

або

$$m_{x,y}^2 = \frac{r^2}{2d^2} \left[r^2 \left(\frac{1}{P^2} m_P^2 + \frac{1}{B^2} m_B^2 + \frac{1}{U^2} m_U^2 \right) + \frac{h^2}{r^2} m_h^2 \right]. \quad (2.18)$$

У підсумковому вигляді для обчислення середніх квадратичних похибок координат ширини зони обмеженого використання земельних ресурсів, що визначається граничними значеннями впливу фізичного поля на довкілля, застосовують такий вираз:

$$m_{x,y} = \frac{r}{d\sqrt{2}} \sqrt{r^2 \left(\frac{1}{P^2} m_P^2 + \frac{1}{B^2} m_B^2 + \frac{1}{U^2} m_U^2 \right) + \frac{h^2}{r^2} m_h^2}. \quad (2.19)$$

В роботі [17] наведено математичні залежності, що дозволяють розрахувати ширину санітарно-захисних зон для ліній електропередач напругою 110, 150, 220, 330, 400, 500 та 750 кВ. Враховуючи характерне для таких ліній трикутне розташування проводів, вираз для визначення магнітної індукції набуває такого вигляду:

$$B = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I \cdot b}{r^2}, \quad (2.20)$$

де b – відстань між проводами, м.

Аналогічно попереднім судженням, формула визначення середньої квадратичної похибки радіусу граничного магнітного поля має вигляд

$$m_r^2 = \frac{1}{4} r^2 \left(\frac{1}{P^2} m_p^2 + \frac{1}{b^2} m_b^2 + \frac{1}{B^2} m_B^2 + \frac{1}{U^2} m_U^2 \right). \quad (2.21)$$

Приведемо розміри санітарно-захисних зон та точність визначення їх координат для ЛЕП різної потужності. Для цього використаємо формули (2.1), (2.9) та (2.21). при розрахунках прийнято $m_p = 0,1 \text{ мВм}$, $m_b = 0,1 \text{ мкТл}$, $m_U = 1 \text{ кВ}$, $m_g = 0,2 \text{ м}$. Результати розрахунків приведемо в таблиці 2.1.

Аналіз значень, наведених у таблиці 2.1, показує, що залежно від технічних характеристик лінії електропередач ширина санітарно-захисної зони, у межах якої можливий негативний вплив на здоров'я людини, варіюється від 30 до 125 метрів. На таких територіях необхідно встановлювати спеціальний режим землекористування, який регламентує як допустимі види господарської діяльності, так і тривалість перебування людей у межах цих зон.

За даними таблиці 2.1, точність визначення координат ширини санітарно-захисних зон перебуває у межах кількох метрів — від 1,5 до 4,5 м. За аналогічною методикою можна встановлювати як розміри, так і точність окреслення зон впливу будь-якого іншого екологічного чинника.

Таблиця 2.1

Санітарно-захисні зони ЛЕП

Характеристика ЛЕП			Ширина санітарно- захисної зони, м	Середні квадратичні похибки координат $m_{x,y}$, м
Напруга U , кВ	Потужність P , мВт	Віддаль між проводами φ , м		
110	30	6	30	1,50
150	55	7	35	1,55
220	135	7	45	1,93
330	320	7	60	2,34
400	520	8	70	2,80
500	900	10	95	3,55
750	2100	11	125	4,55

2.2. Фактори, що впливають на точність визначення меж охоронних зон.

Точність визначення меж охоронних зон ліній електропередач є результатом взаємодії багатьох факторів, які формують загальну картину просторової невизначеності та впливають на достовірність моделювання. Оскільки охоронні зони мають юридичний статус і визначають обмеження у використанні земель, від точності їх побудови залежить правильність прийняття рішень у сфері землеустрою, кадастру та просторового планування. Тому для якісного відтворення меж необхідно враховувати як технічні, так і природні, організаційні та методичні чинники, що впливають на процес моделювання.

Одним із ключових факторів є якість вихідних геодезичних даних, на основі яких здійснюється побудова моделі охоронної зони. Координати опор,

відстані між ними, конструктивні параметри проводів, висота підвісу, конфігурація трасування — усі ці елементи визначають геометрію лінії у просторі. Помилки, що виникають під час GNSS-вимірювань, тахеометричної зйомки або використання застарілих картографічних матеріалів, можуть призвести до зміщення лінії і, відповідно, до некоректного розташування меж охоронної зони. Важливим є також вплив мультипасу, похибок супутникового сигналу, поганих погодних умов та технічних обмежень приладів.

Не менш суттєвим фактором виступають конструктивні особливості самих ліній електропередач. Реальна стріла провисання проводів, яка змінюється залежно від температури, сили вітру та навантаження в мережі, може відрізнятись від паспортних значень. Це означає, що фактичне положення проводів може зміщуватися у вертикальній та горизонтальній площинах. Для високовольтних ліній такі зміни можуть бути значними, а отже, необхідно враховувати можливі деформації під час побудови моделі охоронної зони. Неврахування цих особливостей може спричинити некоректне визначення мінімально допустимих відстаней до будівель, деревної рослинності або інженерних споруд.

Точність визначення меж охоронних зон також залежить від рельєфу місцевості та природно-ландшафтних умов. У гірських районах, на ділянках із різкими перепадами висот, у балках чи на схилах горизонтальні відстані можуть суттєво відрізнятись від проєкційних, що збільшує ризик помилок у разі використання спрощених двовимірних моделей. Наявність перешкод, щільної забудови або високих об'єктів також впливає на точність як вимірювань, так і подальшого моделювання, оскільки частина ЛЕП або прилеглої території може бути частково недоступною для наземних вимірювань.

Окремою групою факторів є похибки, пов'язані з топологією просторових даних [16]. Неправильно оцифровані об'єкти, розриви ліній, невірне поєднання сегментів або технічні помилки у векторизації можуть суттєво вплинути на розміщення меж охоронних зон. Особливо це актуально у

випадку використання даних, отриманих шляхом інтеграції різних джерел, коли необхідно забезпечити узгодженість координат та однорідність топологічних відносин [17].

Важливою складовою точності є вибір алгоритму побудови буферних зон у ГІС [18]. Різні програмні продукти або різні режими інструменту Buffer можуть по-різному обробляти криволінійні ділянки, гострі кути, місця поворотів траси ЛЕП або нерівні сегменти [19]. Неточності, що виникають на стиках сегментів, можуть призвести до появи локальних зсувів межі або до викривлень форми буфера. Тому вибір алгоритму, параметрів згладжування та методів лінійної апроксимації безпосередньо впливають на точність моделі.

Не можна недооцінювати й організаційні чинники — актуальність документації, своєчасність оновлення технічних паспортів ЛЕП, відповідність проєктної інформації фактичному стану мережі [21]. У багатьох випадках невідповідність між старими кресленнями та реальною геометрією лінії може створити суттєві похибки, а іноді й повністю змінити контур охоронної зони [22].

Сукупність наведених факторів демонструє, що точність визначення меж охоронних зон є багатовимірною величиною, що залежить не від одного параметра, а від комплексної взаємодії технічних, природних, аналітичних і організаційних складових [23; 24]. Лише з урахуванням їхнього відносного впливу можна забезпечити достовірність просторової моделі та коректне внесення меж до державного земельного кадастру.

2.3. Фізичні та конструктивні параметри ліній електропередач, що впливають на просторове моделювання охоронних зон.

Фізичні та конструктивні параметри ліній електропередач визначають геометрію їхнього просторового положення і формують основу для побудови охоронних зон, які забезпечують безпеку населення, інженерних споруд та навколишнього середовища. Під час моделювання меж охоронних зон

необхідно враховувати комплекс властивостей лінії, що впливають на положення проводів, їхню поведінку під навантаженням та характер взаємодії з рельєфом місцевості. ЛЕП є динамічними об'єктами: їхнє розташування у просторі не є фіксованим, а змінюється під впливом фізичних факторів, що вимагає детального аналізу конструктивних параметрів під час просторового моделювання.

Одним із ключових параметрів є стріла провисання проводів, що залежить від температури, ваги провідникового матеріалу, сили вітру, ожеледі та механічного натягу. Провід завжди має певну кривизну, і ця форма визначає мінімальну висоту проводу над землею на різних ділянках траси. У теплу пору року провід видовжується, зменшуючи висоту підвісу, тоді як у холодну — навпаки, піднімається. У реальних умовах різниця може сягати значних величин, особливо на довгих прольотах. Це створює додаткову змінність у габаритах безпеки, яку слід враховувати під час встановлення охоронних зон, оскільки їхні межі мають бути безпечними в усіх можливих експлуатаційних режимах.

Важливою конструктивною характеристикою є тип опор і схема їх розташування. Опори можуть бути дерев'яними, залізобетонними, металевими ґратчастими або спеціальними анкерними конструкціями. Вибір типу опори залежить від класу напруги, умов місцевості та технічних вимог. Наприклад, ґратчасті металеві опори використовуються у мережах надвисокої напруги та мають великі габарити, що впливає на ширину технологічних зон та характер розчищення території. Анкерні та кутові опори сприймають більші навантаження та мають іншу конфігурацію, що також змінює геометрію лінії у місцях повороту траси та переходів через складні ділянки.

Особливу роль відіграє конструкція провідників. Проводи можуть бути однодротовими або багатодротовими, мати різні діаметри, склад, питомий опір та механічну міцність [17]. У лініях високої та надвисокої напруги використовуються пучкові проводи, які мають складну структуру та під час

роботи демонструють специфічні коливальні та аеродинамічні властивості [18]. Це впливає на поведінку проводу під вітровими навантаженнями та визначає мінімальні міжфазні відстані, що у свою чергу позначається на ширині охоронної зони [19]. Технічні стандарти передбачають збільшення габаритів безпеки для таких ліній саме через складність конструкції провідників [20].

Важливим фізичним параметром, що впливає на просторове моделювання, є електромагнітне поле, яке утворюється навколо проводів ЛЕП [21]. Його інтенсивність залежить від струму, що проходить крізь провід, відстані між проводами, класу напруги та геометрії розташування фаз [22]. Хоча електромагнітні параметри безпосередньо не визначають форму охоронної зони, вони формують основу для встановлення мінімальних відстаней, зазначених у технічних нормах [23]. Для ліній напругою 110–750 кВ характерні значні електромагнітні впливи, тому для них передбачено ширші охоронні зони, які гарантують безпеку для людей і навколишніх об'єктів.

Окремої уваги потребує вплив навколишнього середовища: рельєф місцевості, наявність лісових масивів, водних перешкод або густої забудови [25]. На ділянках із перепадом висот проводи можуть розташовуватися ближче до землі, ніж на рівнинних територіях [26]. На крутих схилах або в гірських районах опори розташовуються з коригуванням по висоті, що змінює горизонтальне і вертикальне положення проводів [27]. Наявність високих дерев чи будівель може потребувати збільшення відстаней безпеки, що також впливає на конфігурацію охоронної зони [28].

Суттєвий вплив на точність просторового відтворення ЛЕП мають і температурні деформації та вітрові навантаження, які призводять до динамічних зміщень проводів [29]. У вітряну погоду провід може відхилятися від осевого положення, що збільшує горизонтальний діапазон його коливань [30]. Для врахування таких особливостей сучасні ГІС-моделі дедалі частіше

будують з використанням сценарних розрахунків, де моделюються різні режими роботи лінії [31].

Загалом фізичні та конструктивні параметри ліній електропередач формують основу для точного й достовірного моделювання охоронних зон [32]. Їх врахування дає змогу відтворити реальне положення ЛЕП у просторі, мінімізувати похибки геодезичних вимірювань та забезпечити відповідність моделі фактичним умовам експлуатації [33]. Це створює надійну методичну базу для подальшого внесення меж охоронних зон до державного земельного кадастру та є необхідною умовою для ефективного управління територіями, на яких розміщені лінії електропередач [34].

2.4. Системи координат та трансформації, що впливають на точність моделювання охоронних зон.

Точність просторового моделювання охоронних зон ліній електропередач значною мірою залежить від координатної основи, у якій виконуються геодезичні вимірювання та обробка даних. Використання різних систем координат, різнорідних проєкцій, локальних систем прив'язки або застарілих картографічних матеріалів може призвести до суттєвих похибок позиціонування, що ускладнює або робить неможливим коректне визначення меж охоронних зон ЛЕП [6; 22]. Тому узгодження координатної основи є одним із ключових етапів у процесі побудови просторових моделей.

У геодезії та землеустрої України застосовується кілька систем координат, серед яких найпоширенішими є УСК-2000 та WGS84 [8;17]. Перша використовується в державному земельному кадастрі та офіційних топографічних матеріалах, тоді як друга є глобальною системою, на якій базуються спостереження у GNSS-технологіях. У багатьох випадках геодезичні вимірювання виконуються в одній системі, тоді як кадастрові дані представлені в іншій, що потребує виконання трансформації координат.

Невірний вибір параметрів трансформації або використання спрощених моделей переведення може створити зміщення у межах десятків метрів [23], що є критичним під час встановлення охоронних зон.

Окремою проблемою є різниця між геодезичними, картографічними та проєктними системами координат. Якщо технічна документація на лінію електропередач була створена кілька десятиліть тому, існує ймовірність, що вона містить координати у локальних або умовних системах. Такі системи, як правило, не мають однозначного математичного зв'язку з сучасними державними системами координат, що потребує реконструкції параметрів трансформації або навіть повторного виконання польових вимірювань для узгодження координатної основи.

Важливим аспектом точності є вибір картографічної проєкції. Кожна проєкція має свої властивості, пов'язані зі спотвореннями довжин, площ або кутів [10]. У регіональних проєкціях ці спотворення можуть бути незначними, але під час моделювання протяжних об'єктів, таких як ЛЕП, похибки можуть накопичуватися [21]. Якщо використовується некоректна проєкція або виконується переведення між проєкціями без урахування масштабного коефіцієнта, положення лінії на карті може бути викривленим, що впливає на форму і точність охоронної зони [26].

Трансформації координат можуть бути лінійними та нелінійними. Лінійні трансформації передбачають рівномірні зміщення та повороти системи координат і використовуються тоді, коли робота виконується в межах одного регіону з однорідними геодезичними умовами. Нелінійні трансформації застосовуються у складніших випадках: наприклад, коли необхідно узгодити локальну систему координат, що базувалася на старій опорній мережі, із сучасною державною системою [24]. Такі трансформації потребують точних математичних моделей і можуть виконуватися лише за наявності достатньої кількості вихідних пунктів, взаємно ідентифікованих у обох системах [25].

Ключовим фактором є також якість геодезичної основи. Пункти планово-висотної мережі повинні бути актуальними, стабільними та відповідати

сучасним вимогам точності. Якщо використовуються застарілі мережі, де координати пунктів визначені методами, що не забезпечують високої точності, похибки початкової мережі автоматично передаються на всі подальші вимірювання та об'єкти моделювання [27]. В таких випадках доцільним є проведення модернізації геодезичної мережі або прив'язка до пунктів GNSS-постійно діючих станцій [28].

Особливу увагу слід приділяти вертикальній складовій координат [29]. Визначення висот проводів та опор є критичним для реалістичного моделювання стріли провисання, мінімальної висоти підвісу та просторової конфігурації охоронної зони. Якщо висоти визначені у різних системах (наприклад, у Балтійській системі або у висотах GPS), це може спричинити систематичні зміщення [30], що впливають на вертикальні параметри моделі. Для уникнення таких проблем необхідно використовувати єдину систему висот та забезпечувати коректність геодезичних перетворень [31].

У процесі моделювання також важливо враховувати точність цифрових моделей рельєфу (ЦМР) [32]. Невідповідність між фактичним рельєфом місцевості та даними ЦМР може спричинити неправильне визначення висоти проводів над землею, що є важливим для безпечного встановлення охоронних зон [33]. Чим нижча деталізація ЦМР, тим більшим може бути відхилення в розрахунках. Для ліній високої напруги рекомендовано використовувати високоточні ЦМР, отримані в результаті лазерного сканування або фотограмметрії [34].

Узагальнюючи, точність визначення меж охоронних зон ЛЕП значною мірою залежить від того, наскільки коректно узгоджені всі системи координат і наскільки точно виконані трансформації між ними [35]. Невеликі похибки на початкових етапах можуть перетворитися на суттєві відхилення у кінцевій моделі, що вплине як на геометрію охоронної зони, так і на її юридичну коректність [36]. Тому використання сучасних геодезичних технологій, єдиної координатної основи та точних алгоритмів трансформації є необхідною

умовою для надійного просторового моделювання та подальшого внесення меж до державного земельного кадастру [37].

2.5. Класифікація похибок під час визначення меж охоронних зон.

Точність визначення меж охоронних зон ліній електропередач залежить від сукупного впливу численних похибок, що виникають на різних етапах отримання, опрацювання та інтерпретації просторових даних. Для забезпечення достовірності моделювання необхідно розуміти природу цих похибок, механізми їх появи та можливі наслідки для геодезичних вимірювань і кінцевих результатів побудови охоронних зон. Похибки не можна розглядати як випадковий набір відхилень — вони мають певні закономірності, структуру та джерела виникнення, що дозволяє їх класифікувати й прогнозувати їхній вплив [35].

В основі класифікації лежить поділ похибок на геодезичні, картографічні, топологічні, аналітичні, фізичні та організаційні. Геодезичні похибки виникають у процесі безпосередніх вимірювань, що формують координати точок опор та лінійних елементів ЛЕП [11]. До цієї групи належать випадкові похибки вимірювань відстаней, кутів та висот, систематичні відхилення, спричинені технічними характеристиками приладів, а також грубі помилки — поодинокі значні відхилення, що виникають через неправильне наведення, втручання перешкод або людський фактор. Випадкові похибки характеризуються непередбачуваністю, але підлягають статистичному аналізу. Систематичні — проявляють сталі закономірності, наприклад, пов'язані з калібруванням приладів, температурними впливами або інструментальними деформаціями. Грубі помилки, хоч і поодинокі, можуть суттєво спотворити результат, особливо якщо вони не виявлені під час обробки.

До картографічних похибок належать спотворення, що виникають під час створення картографічних матеріалів або використання даних із різних

джерел [4]. Спотворення довжин, площ або кутів неминучі внаслідок того, що поверхня Землі має форму еліпсоїда, а карта — площину. Кожна картографічна проєкція має власні характеристики спотворень, що є критично важливим під час моделювання охоронних зон на великі відстані. Додаткові похибки можуть виникати через генералізацію карт, недостатню деталізацію, використання заниженої роздільної здатності або спотворення, що виникають у процесі растрово-векторного перетворення.

Топологічні похибки пов'язані з некоректністю взаємного розташування та логічних зв'язків між просторовими об'єктами. Серед них найпоширенішими є розриви ліній, дублювання сегментів, перетини, що не відповідають реальності, або самоперетини, які виникають через помилки оцифрування. Такі похибки можуть суттєво впливати на побудову охоронних зон, оскільки алгоритми формування буферних зон у ГІС сприймають кожну помилку як реальну геометричну особливість об'єкта. У результаті буфер може бути викривленим, мати нерівномірні розширення або небажані артефакти.

Аналітичні похибки виникають при побудові математичних моделей, що описують просторове положення ЛЕП та межі охоронних зон. Вони обумовлені спрощеннями, які використовуються для розрахунків, або неправильним застосуванням моделей. Наприклад, ігнорування стріли провисання проводів, некоректне припущення про рівномірність рельєфу або використання середніх значень параметрів можуть призвести до істотних відхилень у моделі. Аналітичні похибки також можуть з'являтися у разі некоректного застосування формул, неправильного вибору алгоритмів згладжування, або через неузгодженість між 2D і 3D моделями [15].

Фізичні похибки пов'язані з природними явищами та властивостями матеріалів, з яких складаються елементи ЛЕП. Найбільш типовим прикладом є температурні деформації проводів, що змінюють їх довжину залежно від погодних умов. У спекотну погоду провід видовжується, і стріла провисання збільшується, тоді як у холодну — скорочується. Це впливає на висоту підвісу

та горизонтальне положення проводу. Вітрові навантаження можуть викликати коливання проводів, що змінюють їхню миттєву позицію. Ігнорування таких ефектів під час моделювання може спричинити недотримання мінімальних допустимих відстаней. Також до фізичних похибок належать похибки, пов'язані із магнітними та електричними полями, які можуть впливати на стабільність GNSS-сигналу.

Організаційні похибки виникають через недоліки у веденні технічної документації або неузгодженість між різними установами, що працюють із просторовими даними. Застарілі технічні паспорти ЛЕП, відсутність актуальних геодезичних зніманих, використання цифрових моделей рельєфу низької точності або невідповідність даних між різними етапами проєктування — усе це може створити суттєві неточності. Якщо модель охоронної зони створюється на основі застарілих або неузгоджених даних, результат неминуче буде містити помилки, що може призвести до юридичних колізій або технічних суперечностей під час встановлення обмежень у використанні земель.

Сукупність усіх зазначених похибок формує загальну просторову невизначеність, яка впливає на кінцеву модель охоронної зони. Важливо враховувати взаємодію похибок між собою: похибка вимірювань може підсилювати картографічну похибку, топологічна помилка — спотворювати алгоритм буферизації, а некоректна трансформація координат — множити помилки на всіх етапах моделювання [30;31]. Тому забезпечення точності визначення меж охоронних зон можливе лише за умови комплексного підходу, що включає контроль вихідних даних, правильність математичних моделей, коректність ГІС-процедур та узгодженість усієї координатної основи [35].

Висновки до розділу 2

Опрацювання теоретичних основ точності геодезичних вимірювань у контексті встановлення меж охоронних зон ліній електропередач показало, що

питання точності є не допоміжним, а центральним елементом усього процесу просторового моделювання. Дослідження, виконані у підрозділі 2.1, засвідчили, що для опису впливу електромагнітного поля ЛЕП на навколишній простір, а також для обґрунтування ширини санітарно-захисних та охоронних зон, доцільно застосовувати математичні моделі, які враховують параметри струму, напруги та магнітної індукції. На основі аналітичних виразів для ширини зони впливу та середніх квадратичних похибок визначено, що навіть за використання точних формул неможливо повністю усунути невизначеність, а отже, під час встановлення меж охоронних зон завжди необхідно працювати з певним діапазоном допустимих відхилень.

Проведений аналіз факторів, що впливають на точність визначення меж охоронних зон, показав, що похибки формуються на всіх етапах — від польових геодезичних вимірювань до роботи з цифровими просторовими моделями. До найважливіших чинників віднесено якість вихідних координат опор та елементів ЛЕП, умови виконання вимірювань, конструктивні особливості лінії, конфігурацію трасування, складний рельєф місцевості, щільність забудови, вибір алгоритмів побудови буферів у ГІС та рівень актуальності наявної документації. Показано, що навіть за незначних похибок окремих вимірів їх накопичення на протяжних ділянках може призвести до помітного зміщення меж, що є критичним для кадастрової точності та юридичної визначеності.

Опрацювання фізичних та конструктивних параметрів ліній електропередач дало змогу краще зрозуміти, як саме технічні характеристики ЛЕП впливають на геометрію охоронних зон. Стріла провисання проводів, тип опор, кількість ланцюгів, конструкція провідників, клас напруги та електромагнітні характеристики формують реальну просторову конфігурацію лінії. З'ясовано, що ЛЕП не можна розглядати як статичний об'єкт: її елементи реагують на зміну температури, вітрові навантаження, ожеледь, а в окремих випадках — і на зміну режиму роботи мережі. Усе це призводить до

варіативності фактичного положення проводів, яку необхідно враховувати при моделюванні охоронних зон, особливо для високовольтних та надвисоковольтних ліній.

Особливе значення для забезпечення точності моделювання має координатна основа. У підрозділі 2.4 показано, що невідповідність між системами координат, у яких зібрані вихідні дані, виконується проєктування та ведеться кадастрова інформація, може стати джерелом суттєвих просторових розбіжностей. Неправильно виконані трансформації між глобальними (GNSS) та державними системами, використання різних картографічних проєкцій без урахування їхніх спотворень, а також неоднозначність між геодезичними та локальними системами координат здатні змістити положення лінії електропередач і відповідно межі її охоронної зони. Такі відхилення призводять не тільки до технічних похибок, але й мають прямі юридичні наслідки — від помилкового накладення обмежень на земельні ділянки до конфліктів між землевласниками та операторами мереж.

Окремо було розглянуто класифікацію похибок, які виникають під час визначення меж охоронних зон. Виділення геодезичних, картографічних, топологічних, аналітичних, фізичних та організаційних похибок дозволило систематизувати джерела неточностей і окреслити їхній вплив на кінцевий результат. Показано, що жодну групу похибок не можна вважати незначною, оскільки в реальній практиці вони діють комплексно та можуть підсилювати одна одну. Наприклад, невелика геодезична похибка у поєднанні з картографічними спотвореннями та топологічними помилками у векторних даних здатна суттєво змінити конфігурацію охоронної зони. Відтак, до визначення меж охоронних зон ЛЕП слід підходити як до комплексного завдання, де важлива не тільки точність окремих вимірювань, а й узгодженість усієї системи вихідних даних, моделей та алгоритмів обробки.

Сукупність результатів, отриманих у межах другого розділу, показує, що забезпечення необхідної точності при визначенні меж охоронних зон можливе

лише за умов системного підходу. Він має поєднувати використання сучасних методів польових вимірювань, правильний вибір координатної системи, коректні трансформації, уважне ставлення до якості цифрових картографічних даних, а також критичну оцінку застосовуваних аналітичних моделей. Такий підхід створює підґрунтя для подальшого впровадження адаптивних методів просторового моделювання, де охоронні зони ЛЕП будуть не просто формально обчисленими за нормативними значеннями, а відображатимуть реальні просторові умови та технічний стан ліній.

РОЗДІЛ 3

МЕТОДИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ПРОСТОРОВОГО МОДЕЛЮВАННЯ МЕЖ ОХОРОННИХ ЗОН

3.1. Використання ГІС-технологій для побудови охоронних зон.

Геоінформаційні системи (ГІС) є ключовим інструментом для моделювання охоронних зон ліній електропередач, оскільки забезпечують інтеграцію різних джерел просторових даних та виконання геометричних операцій [14]. Використання ГІС дозволяє автоматизувати процес побудови охоронної зони, зменшити кількість ручних розрахунків та забезпечити точність відповідно до нормативних вимог [6; 24].

Побудова охоронних зон ЛЕП у ГІС починається з підготовки вихідних даних, які включають координати опор, трасу лінії, кадастрові межі, елементи рельєфу та інші просторові шари. Після приведення даних до єдиної системи координат здійснюється перевірка їх цілісності та виправлення можливих топологічних похибок. На основі координат опор формують лінійний об'єкт — модель траси ЛЕП, що слугує основою для подальших операцій [20].

Далі виконується визначення нормативних параметрів охоронних зон згідно з чинними вимогами законодавства, після чого застосовується операція буферизації, що дозволяє отримати полігон охоронної зони фіксованої ширини. Узагальнена схема процесу побудови охоронної зони наведена у структурованому вигляді на рисунку 3.1.

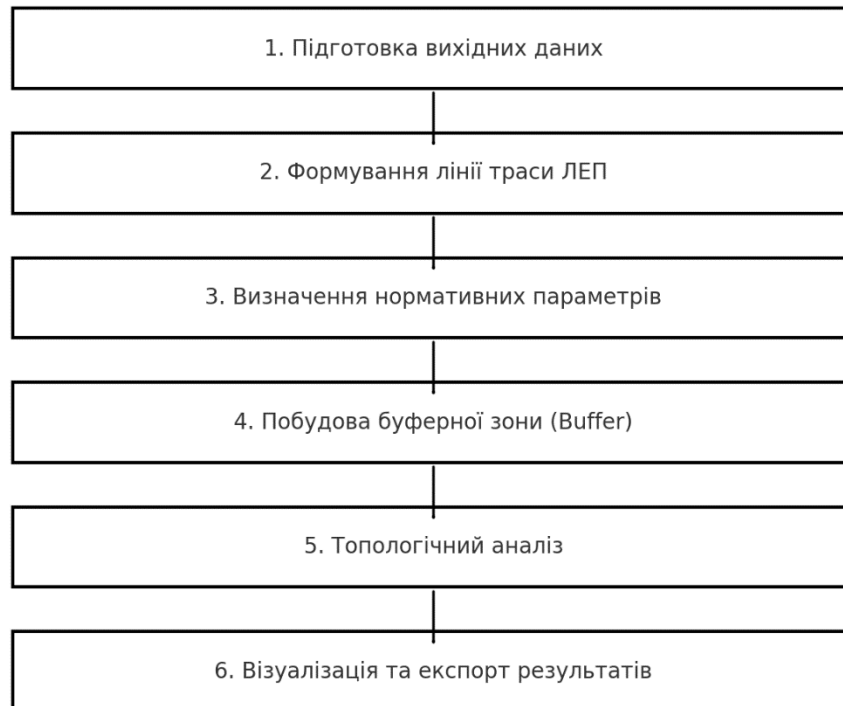
Алгоритм побудови охоронної зони ЛЕП у ГІС

Рисунок 3.1. Алгоритм побудови охоронної зони ЛЕП у ГІС

Джерело: Сформовано автором

ГІС-середовище дозволяє реалізовувати два основні методи визначення охоронних зон — векторний та растровий. Найбільш поширеним є векторний метод, оскільки він забезпечує точне відтворення нормативної ширини охоронної зони та легко інтегрується із кадастровими та технічними даними [20; 29]. Метод базується на створенні буфера навколо лінійного об'єкта та подальшому аналізі отриманого полігону на предмет перетину з іншими просторовими елементами [24]. Послідовність виконання цього методу подана на рисунку 3.2.

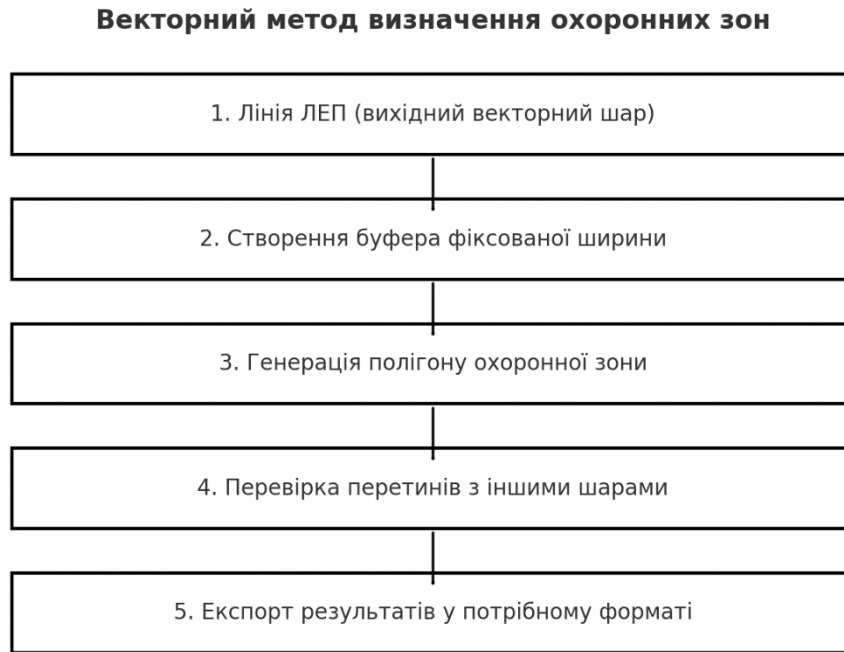


Рисунок 3.2. Векторний метод визначення охоронних зон

Джерело: Сформовано автором

У складніших умовах, зокрема на територіях з пересіченим рельєфом або щільною забудовою, застосовується растровий метод, що базується на цифрових моделях рельєфу. Він дозволяє врахувати реальні просторові відстані та висоти, оцінити можливість небезпечного наближення проводів до об'єктів інфраструктури та визначити охоронні зони як у 2D-, так і у 3D-моделі [8; 30]. Загальна схема виконання растрового методу наведена на рисунку 3.3.

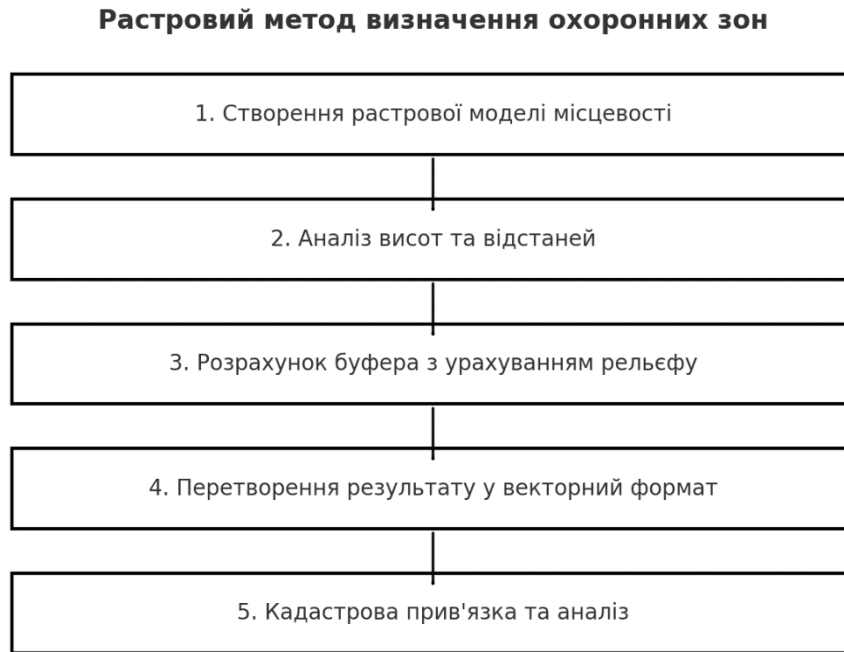


Рисунок 3.3. Растровий метод визначення охоронних зон

Джерело: Сформовано автором

Інтеграція векторного та растрового методів дозволяє досягти найбільшої точності, оскільки векторний метод забезпечує відповідність нормативним параметрам, тоді як растровий дозволяє врахувати реальні властивості місцевості. ГІС-технології також забезпечують можливість автоматизованого аналізу накладання охоронних зон на межі земельних ділянок, виявлення сервітутів, перевірку відповідності нормам та формування графічних матеріалів для землевпорядної документації.

Завдяки широкому інструментарію ГІС значно підвищується ефективність роботи з просторовими даними, що дозволяє отримувати точні та надійні результати при визначенні меж охоронних зон ліній електропередач.

3.2. Алгоритми формування буферних зон у ГІС та їх точність.

Побудова буферних зон у геоінформаційних системах є центральним елементом створення моделей охоронних зон ліній електропередач. Саме алгоритми буферизації визначають форму, розміри та просторову точність зони, що накладається на місцевість та відображає просторовий вплив ЛЕП згідно з нормативними вимогами. Хоча механізм створення буфера на перший погляд здається простим — збільшення геометрії лінійного об'єкта на задану відстань — реальна робота алгоритмів є значно складнішою і включає низку етапів, під час яких можуть виникати похибки та спотворення [23; 30]. Тому детальне розуміння принципів роботи буферних алгоритмів є необхідною умовою для коректного моделювання охоронних зон.

Основою алгоритму буферизації є побудова майбутнього контуру зони шляхом розширення лінійного об'єкта на певну відстань у перпендикулярних напрямках [10]. Для рівних і прямолінійних сегментів такий підхід працює досить точно, однак у реальних умовах лінії електропередач рідко мають ідеально прямолінійну геометрію [20]. ЛЕП пролягають через складний рельєф, містять численні повороти, мають змінну стрілу провисання, а їхні координати формуються з окремих відрізків, отриманих у результаті геодезичних вимірювань. Тому алгоритм буферизації повинен правильно обробляти не лише прямолінійні ділянки, а й вузли, кути поворотів, ділянки зі змінною кривизною та сегменти зі складною геометрією.

У ГІС існує декілька підходів до обробки лінійних об'єктів під час буферизації, які відрізняються методами згладжування та побудови кутових елементів. Найпоширенішими є три варіанти: плоскі кути (flat caps), круглі кути (round caps) та квадратні кути (square caps) [14]. Кожен із них формує буферну зону по-своєму. Плоскі кути формують буфер із прямолінійним завершенням, що корисно для об'єктів короткої протяжності. Круглі кути забезпечують плавне згладжування, що є найбільш природним для ЛЕП, оскільки дозволяє моделювати реальні криволінійні ділянки. Квадратні ж кути

застосовуються у специфічних випадках, зокрема, для блокових або інженерних комунікацій з прямими сегментами.

Важливим етапом алгоритму є обробка місць повороту лінії. На різких кутах формується буфер, який може або розширюватися, або стискатися залежно від того, як працює алгоритм визначення середини кута [21]. Якщо об'єкт має гострий кут, то буфер буде розширюватися значно більше, ніж на прямих ділянках, утворюючи так звані "артефакти-виступи" [24]. Для ЛЕП це може призвести до помилкового збільшення площі охоронної зони в місцях повороту траси. У той же час при дуже плавних поворотах буфер може бути дещо вузьким, ніж потрібно, якщо алгоритм працює зі спрощеною апроксимацією [29]. Таким чином, точність побудованої зони значною мірою залежить від того, наскільки коректно алгоритм враховує кут повороту лінії.

Окремої уваги потребує вплив топологічної якості вхідних лінійних даних. Якщо лінія має розриви, дублікати, самоперетини або дрібні сегменти, алгоритм буферизації може інтерпретувати цю геометрію як реальну, внаслідок чого буфер буде містити некоректні розширення, внутрішні порожнини або асиметричні відхилення. Це особливо актуально під час роботи з лініями електропередач, які можуть бути представлені у вигляді великої кількості дрібних сегментів, отриманих зі старих карт або імпортованих з CAD-систем. Перед буферизацією необхідно виконати топологічне очищення — злиття лінійних сегментів, видалення дублюючих елементів, нормалізацію розташування вузлів та виявлення можливих розривів.

Точність буферних зон також залежить від того, у якій системі координат вони будуються. Якщо буфер створюється у географічних координатах (широта/довгота), то зона буде спотвореною через нерівномірність градусної сітки, особливо на великих протяжностях [29]. Тому всі опенсорсні та професійні ГІС рекомендують виконувати буферизацію у проєктованих системах координат, де одиниця виміру — метр, а спотворення мінімізовані.

У разі використання широких зон або довгих ЛЕП рекомендується застосовувати локальні проєкції, які найменше спотворюють форму об'єкта.

Ще одним важливим аспектом є розділення алгоритмів для 2D та 3D моделей. Буфер у 2D працює лише з плановими координатами і не враховує реального вертикального положення проводів, кривизну траси в просторі, рельєф та висоту опор [26]. Для ліній електропередач це може бути суттєвим обмеженням, оскільки рівень підвісу проводів і стріла провисання мають безпосередній вплив на мінімальні допустимі відстані. Тому у сучасних ГІС реалізовано методи побудови буферів у тривимірному середовищі, де формується просторовий об'єм навколо умовної траєкторії проводу з урахуванням висотної складової. Такі моделі є значно точнішими, проте вимагають наявності деталізованих вихідних даних.

Важливо також враховувати, що різні ГІС-програми застосовують різні підходи до обчислення буфера. У ArcGIS алгоритм включає багаторівневе згладжування [8], у QGIS — реалізовано декілька варіантів буферизації з можливістю налаштування точності апроксимації [14], а в GRASS GIS — використовується математична модель, що дозволяє контролювати рівень деталізації радіальних сегментів [21]. Це означає, що один і той самий лінійний об'єкт може створити дещо різні за формою буферні зони у різних програмних середовищах. Похибка може бути незначною у межах кількох сантиметрів, але для протяжних об'єктів це іноді може призвести до помітних відмінностей.

Точність побудованих буферних зон оцінюється шляхом порівняння моделі з контрольними даними — геодезичними зніманнями, нормативними значеннями або результатами альтернативних методів моделювання [20]. Одним із ключових критеріїв є відповідність отриманої зони нормативам — тобто дотримання мінімальної ширини охоронної зони у будь-яких умовах. Також оцінюється рівність буферної лінії, відсутність "артефактів", плавність кривин, симетрія на ділянках руху лінії, співвідношення між проєктною геометрією та фактичною. Для 3D моделей додатково оцінюється

правильність вертикальної структури — зокрема, чи не виходить геометрія за межі допустимих відстаней у вертикальній площині [26].

Алгоритми формування буферних зон у ГІС є значно складнішими за просте геометричне розширення лінійного об'єкта. Їхня точність залежить від якості вихідних даних, від обраного програмного забезпечення, від параметрів згладжування, від геометрії лінії, а також від того, чи враховується вертикальна складова моделі. Розуміння цих особливостей дозволяє створювати високоточні просторові моделі охоронних зон, що відповідають реальним умовам експлуатації ліній електропередач та вимогам нормативних документів.

3.3. Особливості 3D-моделювання ЛЕП у геоінформаційних системах.

3D-моделювання ліній електропередач у геоінформаційних системах відкриває принципово нові можливості для точного визначення меж охоронних зон, оскільки дозволяє відтворити реальне просторове положення проводів та опор з урахуванням їхньої висоти, стріли провисання, рельєфу місцевості та взаємодії з навколишнім середовищем. На відміну від традиційних 2D-методів, тривимірні моделі відображають не лише планове положення ЛЕП, а й вертикальний компонент, що має вирішальне значення для коректного встановлення мінімальних безпечних відстаней. Саме 3D-підхід забезпечує найбільш реалістичну реконструкцію просторової конфігурації лінії, що робить його незамінним інструментом під час моделювання охоронних зон.

Однією з ключових переваг 3D-моделювання є можливість врахування змінної стріли провисання проводів. У реальних умовах проводи не залишаються у фіксованому положенні: їхнє вертикальне та горизонтальне зміщення залежить від температури, швидкості вітру, маси ожеледі, режиму навантаження мережі та довжини прольоту. У результаті фактичне положення проводу може змінюватися на значні величини. У двовимірній моделі неможливо відобразити такі зміни, що створює ризик недотримання

нормативних відстаней до землі або об'єктів інфраструктури. У 3D-моделі ж можна описати провід як просторову криву, положення якої розраховується на основі технічних характеристик лінії, що дозволяє моделювати ситуації для різних температурних режимів [26].

Важливим елементом тривимірного моделювання є інтеграція цифрової моделі рельєфу (ЦМР). Рельєф має суттєвий вплив на висоту проводів над землею, особливо у гірських районах або на ділянках із значними перепадами висот [29]. У такому разі мінімальні відстані до земної поверхні можуть змінюватися у межах одного прольоту, що вимагає коректної оцінки висотної складової. Використання високоточної ЦМР дозволяє визначити реальну висоту проводу над будь-якою точкою рельєфу, що забезпечує структурно правильний розрахунок вертикальної складової охоронної зони та можливість виявлення потенційно небезпечних ділянок [30].

Тривимірне моделювання також дозволяє враховувати взаємодію ЛЕП з навколишніми об'єктами. Багатоповерхова забудова, промислові споруди, окремі архітектурні елементи та висока деревна рослинність можуть наближатися до ЛЕП на відстані, меншій за нормативну, що становить потенційну небезпеку. За допомогою 3D-аналізу можна визначити, чи перетинається охоронна зона з будівлями у вертикальній площині, а також виявити ділянки, де проводи наближаються до дерев або конструкцій унаслідок дії вітру чи температурних коливань. Такий підхід дозволяє виявити проблемні місця, які у 2D-моделі не помітні.

Сучасні ГІС-платформи підтримують роботу з 3D-геометрією, зокрема ArcGIS Pro, QGIS з 3D-модулем, Bentley MicroStation, AutoCAD Map 3D та інші спеціалізовані системи [14; 29]. У цих програмних середовищах можна створювати моделі опор і проводів, формувати 3D-лінії, екструдувати об'єкти за висотними атрибутами, а також виконувати просторові аналізи в тривимірному просторі [26]. Наприклад, інструменти "3D Buffer" або "Intervisibility Analysis" дозволяють оцінити просторову конфігурацію

охоронної зони не лише в плані, а й у вертикальному напрямку. Це забезпечує більш комплексний підхід до аналізу просторових ризиків [22].

Одним із найточніших джерел даних для 3D-моделювання є LiDAR-сканування [18], яке дозволяє отримати мільйони точок просторової хмари з високою точністю. З таких даних можна виділити окремі елементи опор, провідники, штирі та сусідні об'єкти [26]. LiDAR дає можливість відтворити фактичне положення проводів у просторі та зіставити його з проєктним положенням, виявивши деформації, провисання або небезпечні наближення. Для регіонів, де LiDAR-дані недоступні, може застосовуватися фотограмметричне моделювання з БПЛА [30] — особливо на обмежених ділянках, де точність даних критично важлива.

Тривимірне моделювання дозволяє також формувати об'ємні охоронні зони, які відображають реальне просторове поширення допустимих габаритів безпеки. На відміну від 2D-буфера, який формує лише плановий контур, 3D-буфер утворює просторовий об'єм навколо проводу, враховуючи усі можливі варіації положення [29]. Така модель близька до реального фізичного середовища і може бути використана для проведення аналізу ризиків, планування інженерних робіт, визначення ділянок з потенційними порушеннями норм або для контролю за вирубкою дерев уздовж траси ЛЕП [21].

Важливим аспектом 3D-моделювання є можливість використання динамічних моделей, у яких положення лінії змінюється залежно від сценарію. Наприклад, у спеціалізованих програмних комплексах можна моделювати поведінку проводів при різних швидкостях вітру, температурах, обледенінні. Це дозволяє визначити максимально можливий габарит провисання та виявити критичні ділянки, де у несприятливих умовах провід може наблизитися до землі або сторонніх об'єктів. Такі моделі є надзвичайно важливими для експлуатаційних служб і фахівців, які займаються безпекою електромереж [29].

3D-моделювання також дозволяє створювати цифрових двійників (digital twins) ліній електропередач — точні цифрові копії реальних об'єктів, які можуть бути використані для моніторингу, моделювання та прогнозування стану мережі. Завдяки цьому оператори ЛЕП отримують можливість оцінювати стан лінії у реальному часі, прогнозувати можливі ризики, аналізувати наслідки аварійних ситуацій і планувати ремонтні або профілактичні роботи з високою точністю. Використання цифрових двійників включає інтеграцію датчиків, GPS-трекерів, даних дистанційного зондування та результатів інженерного обстеження.

3D-моделювання у ГІС забезпечує значно вищий рівень точності та деталізації порівняно з традиційними методами і є ключовим інструментом для роботи з охоронними зонами ліній електропередач. Воно дає можливість глибше зрозуміти просторову структуру ЛЕП, врахувати динамічні фактори, природні умови та технічні характеристики, що в сукупності забезпечує створення достовірної та надійної моделі охоронних зон.

3.4. Топологічні помилки під час моделювання охоронних зон та методи їх усунення.

Топологічна коректність векторних даних є однією з основних передумов точного просторового моделювання охоронних зон ліній електропередач. Будь-які порушення топологічної структури — розриви, самоперетини, дублювати ліній, некоректно з'єднані сегменти, зайві вузли — можуть суттєво вплинути на результат буферизації, спричиняючи спотворення меж охоронних зон, їх асиметрію чи появу небажаних артефактів. Оскільки побудова охоронних зон має юридичну силу та використовується у землеустрої й кадастрі, топологічні помилки неприпустимі й потребують своєчасного виявлення та виправлення.

Топологічні помилки найчастіше виникають через те, що геометрія ліній електропередач формується з великої кількості сегментів, отриманих у процесі геодезичного знімання, імпорту даних із CAD-систем, оцифрування старих

топографічних карт або конвертування даних між різними форматами. Кожен із цих процесів потенційно може додати неточності у вигляді зміщень, дублювання, розривів або неправильного розташування вузлів. Такі відхилення є дрібними візуально, але мають критичний вплив на алгоритми формування буферних зон [34].

Однією з найпоширеніших топологічних помилок є розрив лінії — ситуація, коли два сегменти, які мають бути з'єднані, фактично розташовані на мінімальній відстані один від одного, але не з'єднані у спільний вузол [21; 35]. У таких випадках буферизація інтерпретує сегменти як окремі геометрії, утворюючи два незалежні буфери замість одного суцільного. Це призводить до появи локальних відривів у межах охоронної зони та викривлення її контуру. Розриви особливо часто виникають на довгих ділянках ЛЕП, де лінія була зібрана із сегментів, що частково перекриваються або мають різну точність координат.

Інша поширена проблема — самоперетин лінії. Він з'являється під час некоректної векторизації або коли дані імпортовані з систем, які не дотримуються топологічних правил. При самоперетині буферна зона може мати складну ламану форму, утворюючи зайві петлі або вигини, які не відповідають реальній траєкторії лінії. Таке спотворення створює значні труднощі в кадастрових роботах, оскільки охоронна зона може накладатися на ділянки, які фактично не перебувають у межах впливу ЛЕП.

Третім поширеним типом топологічних помилок є дублювання сегментів, коли один і той самий відрізок лінії існує в даних двічі. Дублікати часто виникають при імпорті складних CAD-файлів або при геоприв'язці оцифрованих об'єктів. Під час буферизації дублікати можуть спричиняти подвоєння контурів, формування накладених буферів або утворення надлишкових "обводів". Хоча такі помилки важко помітити на візуальному рівні, їх вплив на результат може бути суттєвим.

Окремої уваги потребують зайві (спайкові) вузли, які утворюються через похибки оцифрування або конвертації [34]. Такі вузли створюють дрібні ломані сегменти, що ускладнюють буферизацію, оскільки алгоритм намагається окремо обробити кожен мікросегмент. У результаті в охоронній зоні можуть з'явитися дрібні нерівності, зубчасті елементи або спотворення, які порушують плавність контуру та створюють неточності при подальшій обробці.

Ще одним типом топологічних відхилень є неправильне накладання геометрій, коли сегменти частково перекриваються або зміщені незначною мірою [35]. Такі помилки призводять до подвійних ліній або зміщених буферних зон, що суттєво впливає на точність моделювання. Особливо небезпечними вони є у регіонах з щільною мережею ЛЕП або паралельним проходженням декількох ліній.

Усунення топологічних помилок є необхідним етапом перед моделюванням охоронних зон. Сучасні ГІС-системи містять набори інструментів для перевірки та виправлення топології. Одним із найефективніших методів є топологічна валідація, яка автоматично перевіряє відповідність векторних даних заданим правилам: відсутності розривів, самоперетинів, дублювання, невірного накладання тощо. Після виявлення помилок програма пропонує автоматичне їх усунення або надає можливість виконати корекцію вручну.

Одним із основних способів очищення даних є об'єднання ліній (merge/dissolve), яке дозволяє з'єднати суміжні сегменти, що представляють один об'єкт. Це не лише усуває розриви, але й забезпечує структурну цілісність лінії перед буферизацією. Для дрібних фрагментів або зайвих сегментів застосовується генералізація та спрощення, які дозволяють зменшити кількість точок, зберігши при цьому загальну форму об'єкта.

Для самоперетинів використовуються методи розриву і нормалізації лінії, які дозволяють реконструювати об'єкт, усуваючи невідповідності. У разі

дублювання сегментів застосовується інструмент пошуку однакових геометрій. Додатково можуть використовуватися алгоритми виявлення аномалій на основі довжини сегментів, кутів повороту або щільності точок.

Для складних випадків, коли векторизація була виконана неякісно або дані отримані з різних джерел, використовується інтегрований підхід з перевіркою на різних рівнях: плановому, висотному та логічному. У таких ситуаціях поєднання ГІС-інструментів, геодезичних вимірювань та сервісів дистанційного зондування дозволяє отримати чисту топологію з високою точністю.

Коригування топології перед моделюванням охоронних зон є не технічним формальним кроком, а важливою передумовою для забезпечення надійності та юридичної достовірності результатів. Адже межі охоронних зон, сформовані з використанням некоректних топологічних даних, можуть накладатися на земельні ділянки неправильно, що спричиняє конфлікти, судові спори та необхідність повторного виконання кадастрових робіт. Таким чином, топологічна якість даних є фундаментом для точного і коректного просторового моделювання охоронних зон ліній електропередач.

3.5. Інтегральні моделі точності при поєднанні різнорідних просторових даних.

Створення достовірної моделі охоронних зон ліній електропередач потребує об'єднання великої кількості просторових даних, які відрізняються за джерелами, масштабами, точністю, методами отримання та ступенем актуальності. До таких даних належать геодезичні вимірювання, технічні паспорти ЛЕП, цифрові моделі рельєфу, картографічні матеріали, результати дистанційного зондування, кадастрова інформація, а також дані, отримані з ГІС-аналізу. Поєднання цих джерел створює комплексну інформаційну основу, яка дозволяє моделювати межі охоронних зон із високою точністю. Однак узгодження різнорідних даних неминуче пов'язане з появою похибок,

які передаються від одного джерела до іншого і формують інтегральну похибку кінцевої моделі [34; 35].

Інтегральні моделі точності дають можливість оцінити, як різні види похибок — геодезичні, координатні, картографічні, топологічні та аналітичні — взаємодіють між собою та проявляються у фінальному результаті. Їх застосування дозволяє прогнозувати рівень невизначеності моделі охоронної зони, виявляти критичні ділянки та визначати, чи відповідає модель вимогам нормативної точності для кадастрових робіт та землеустрою. Оскільки охоронні зони ЛЕП мають юридичний статус, а їхні межі визначають обмеження використання земель, інтегральний аналіз точності є необхідною умовою для їх коректного встановлення.

Однією з ключових проблем під час поєднання різнорідних просторових даних є різний рівень точності джерел. Так, GNSS-вимірювання забезпечують сантиметрову точність за умови використання RTK-технологій [9], тоді як картографічні матеріали масштабу 1:50000 можуть мати похибку у десятки метрів [13]. Якщо такі дані використовуються одночасно без належної трансформації та узгодження, інтегральна модель стає некоректною, а похибки розподіляються нерівномірно по всій території. Для ЛЕП це може призвести до зміщення меж охоронних зон та невірної ідентифікації ділянок, на які вони накладаються.

Важливим аспектом інтеграції даних є погодження систем координат. Оскільки різні джерела можуть бути представлені у різних системах (WGS84, УСК-2000, локальні мережі) [14], трансформації можуть створювати систематичні зміщення, які накопичуються під час об'єднання даних [35]. Невірно виконана трансформація може призвести до того, що межі ЛЕП будуть відображені у неправильному місці, а охоронна зона — накладена на об'єкти, що не перебувають під впливом лінії. Інтегральні моделі точності враховують параметри трансформації та дозволяють оцінити внесок цих похибок у загальну невизначеність моделі.

Додатковим джерелом похибок є різна деталізація та масштабність картографічних даних. Наприклад, кадастрові плани мають високу точність і деталізацію, тоді як топографічні карти середнього масштабу менш детальні, але містять важливу інформацію про рельєф та інженерну інфраструктуру. Поєднання таких даних без аналізу масштабу може призвести до конфліктів у топології або до зміщення об'єктів. Інтегральні моделі точності дозволяють визначити, які з джерел мають пріоритет у межах конкретної задачі, та зважити внесок кожного із них у кінцевий результат [34].

Одним із найважливіших напрямів інтеграції різнорідних даних є поєднання цифрових моделей рельєфу різної точності. Дані LiDAR можуть забезпечувати сантиметрову точність [28], тоді як загальнодержавні ЦМР мають значно більший крок. Використання менш точної моделі рельєфу може спричинити помилки у визначенні висоти проводів відносно поверхні землі, що є критично важливим для охоронних зон ЛЕП. Інтегральні моделі дозволяють обчислити різницю похибок між різними ЦМР та обрати оптимальну модель або їх комбінацію.

Особливий вплив на інтегральну точність мають дані дистанційного зондування, такі як супутникові знімки та фотограмметричні моделі з БПЛА. Супутникові знімки можуть містити геометричні спотворення, пов'язані з кутом зйомки, рельєфом або атмосферними умовами, тоді як фотограмметричні моделі залежать від якості прив'язки опорних точок та алгоритмів реконструкції. У разі поєднання цих даних з геодезичними вимірюваннями важливо враховувати їхню різну природу та точність, щоб уникнути зміщень у висотній та плановій складових.

Інтегральні моделі точності враховують також топологічні похибки, які передаються між різними джерелами під час інтеграції. Якщо один із наборів даних містить самоперетини, дублікати або розриви, вони можуть викликати похибки під час накладення шарів або формування буферів. У комплексних моделях топологічні похибки можуть бути замасковані іншими даними, що

ускладнює їх виявлення, тому інтегральні підходи включають попередню перевірку топології та корекцію геометрії.

Інтегральний аналіз також враховує невизначеність, що виникає під час аналітичної обробки. Будь-який алгоритм обробки даних — генералізація, згладжування, інтерполяція або моделювання — додає власну похибку. Особливо це помітно під час побудови складних 3D-моделей, де невелике відхилення у висотній складовій може призвести до значних помилок у визначенні мінімальної висоти проводу над землею. Інтегральні моделі дозволяють врахувати ці похибки шляхом статистичного аналізу або використання вагових коефіцієнтів для кожного етапу обробки.

Окремої уваги потребує фактор актуальності даних. Застарілі технічні паспорти ЛЕП, дані про рельєф старих років, невчасно оновлені кадастрові відомості або супутникові знімки з низькою частотою оновлення можуть бути джерелом значних похибок. Інтегральні моделі точності дозволяють оцінити рівень застарілості даних та їхній вплив на кінцевий результат, а також визначити, які з наборів потребують актуалізації.

Комплексна взаємодія різних похибок формує інтегральну невизначеність, яка є сумарним показником точності моделі охоронної зони [34; 35]. Ця невизначеність не є простою сумою похибок — її величина залежить від взаємного впливу та кореляції між джерелами даних. Наприклад, похибка, отримана під час трансформації координат, може бути посилена топологічною помилкою або неточністю рельєфу, що призводить до комбінованого ефекту. Інтегральні моделі точності дозволяють оцінити таку складну структуру похибок, що робить їх незамінними у практичних задачах встановлення охоронних зон.

Застосування інтегральних моделей дозволяє визначити ділянки, де точність є недостатньою та потребує додаткових вимірювань або уточнення. Такі ділянки можуть бути пов'язані з різким перепадом рельєфу, перетином з іншими інженерними комунікаціями, щільною забудовою або місцями

повороту траси ЛЕП. На основі інтегральної моделі точності можна формувати рекомендації щодо вибору оптимальних джерел даних, методів обробки та підходів до моделювання.

Загалом, застосування інтегральних моделей точності є ключовим елементом сучасного просторового моделювання охоронних зон ліній електропередач. Воно дозволяє досягти високої достовірності моделі шляхом комплексного аналізу різнорідних джерел, узгодження систем координат, оцінки топологічної коректності та врахування аналітичних похибок. Такий підхід забезпечує надійну основу для внесення меж охоронних зон до державного земельного кадастру та прийняття правильних управлінських рішень у сфері землеустрою, просторового планування та технічної експлуатації електромереж.

3.6. Використання цифрових моделей рельєфу при моделюванні охоронних зон ЛЕП.

Цифрові моделі рельєфу (ЦМР) відіграють ключову роль у моделюванні охоронних зон ліній електропередач, оскільки дозволяють точно враховувати вертикальну складову простору, що є критично важливою для визначення безпечних відстаней між проводами та землею поверхнею [34; 35]. Лінії електропередач функціонують у складному тривимірному середовищі, у якому рельєф може суттєво змінювати висотне положення проводів на різних ділянках траси [45]. Саме тому застосування ЦМР є обов'язковою складовою при створенні достовірних та юридично значущих моделей охоронних зон.

Застосування цифрової моделі рельєфу дозволяє виконувати низку важливих аналітичних та інженерних задач. Однією з них є оцінювання висоти проводу над землею в різних ділянках прольоту [39]. У рівнинних умовах зміни висоти можуть бути незначними, однак у районах з хвилястою чи гірською місцевістю мінімальна висота проводу може критично змінюватися вже у межах одного прольоту. У таких ситуаціях без ЦМР неможливо коректно визначити фактичну межу безпечного габариту. Натомість у 3D-

моделі, побудованій на основі ЦМР, можна точно проаналізувати реальні відстані від проводу до поверхні землі та оцінити їх відповідність нормативним вимогам [40].

Важливою перевагою використання ЦМР є можливість виявлення небезпечних ділянок, де провід наближається до землі через особливості рельєфу [36]. Наприклад, у заглибленнях або яркових формах рельєфу мінімальна висота проводу може порушувати нормативні відстані, що створює потенційно аварійні ситуації [40]. Застосування ЦМР дає змогу створити профіль траси ЛЕП, визначити найнижчу точку провисання проводів і виявити місця, у яких необхідно вжити заходів щодо корекції підвісу, заміни опор або вирубки рослинності.

Цифрові моделі рельєфу також дозволяють більш точно моделювати просторову форму охоронної зони, враховуючи характеристики місцевості [43]. Якщо у двовимірній моделі буферна зона має однакову ширину по всій довжині траси, то в тривимірному середовищі її межі можуть набувати складної об'ємної форми. Залежно від висоти підвішування проводів і конфігурації рельєфу, охоронна зона може збільшуватися або звужуватися у висотному вимірі. Саме це робить ЦМР інструментом, що дозволяє створити реалістичну об'ємну геометрію охоронної зони, яка найбільш точно відповідає фізичним умовам експлуатації лінії.

Ще однією важливою перевагою застосування цифрових моделей рельєфу є можливість одержання карт схилів та експозицій, які допомагають аналізувати умови, що можуть впливати на експлуатацію ЛЕП [45]. Круті схили створюють додаткові проблеми у визначенні висоти провисання проводів, а експозиція схилу може впливати на температуру навколишнього середовища, що, у свою чергу, змінює величину провисання. Таким чином, ЦМР дозволяє не лише визначити фактичне положення проводів у 3D-просторі, але й оцінити природні фактори, які можуть впливати на їх стабільність [39].

Особливо цінним є використання високоточної ЦМР, отриманої за допомогою LiDAR-сканування [28]. LiDAR забезпечує надзвичайно високу щільність точок, що дозволяє відтворити рельєф та об'єкти з сантиметровою точністю. Завдяки розділенню відбитків лазерного променя можна виділити землю навіть під густими кронами дерев. У контексті ЛЕП це надзвичайно важливо, адже дозволяє виявляти небезпечну рослинність, яка наближається до проводів. Звичайні ЦМР не дають таких можливостей, оскільки часто не відображають реальної висоти дерев чи дрібних об'єктів. LiDAR ж дозволяє моделювати не лише рельєф, але й розташування високоростучої рослинності, що є важливим елементом у моделюванні охоронних зон [41].

У тих районах, де дані LiDAR недоступні, може використовуватися фотограмметрична модель рельєфу, створена за допомогою БПЛА [37; 38]. Фотограмметрія дозволяє отримати точну модель місцевості навіть на локальних ділянках, що є дуже корисним під час обстеження окремих фрагментів ЛЕП. Фотограмметрична модель має достатню точність для аналізу висотних характеристик, а використання опорних точок забезпечує коректне узгодження з геодезичною мережею. Такі дані часто застосовуються для контрольних вимірювань або для актуалізації тривимірної моделі охоронних зон.

Важливим аспектом використання ЦМР є аналіз видимості (visibility analysis), який дозволяє оцінити можливі ділянки перетину проводів із рельєфом, рослинністю або штучними об'єктами [44]. Аналіз видимості дозволяє визначити, які ділянки підходять для встановлення нових опор або рекогностування траси, а також допомагає виявити потенційні ризики [28; 29]. Наприклад, на перегінах рельєфу або на височинах може виникати ситуація, коли провід при сильному провисанні наближається до землі або до дерев, що створює небезпеку виникнення аварійних ситуацій.

Цифрові моделі рельєфу також використовуються для моделювання альтернативних сценаріїв, коли необхідно оцінити вплив зміни температури,

навантаження на мережу або додаткових атмосферних факторів на положення проводів. Поєднання ЦМР зі спеціалізованими інженерними моделями дозволяє створювати динамічні 3D-моделі, які відображають зміну положення ЛЕП залежно від робочих умов. Це дає змогу прогнозувати потенційні ризики і своєчасно приймати рішення щодо модернізації або корекції проєктних параметрів.

Загалом, використання цифрових моделей рельєфу є одним із фундаментальних елементів сучасних технологій моделювання охоронних зон ЛЕП. ЦМР забезпечують можливість комплексного врахування рельєфу місцевості, формують основу для розрахунку висотних характеристик проводів, дозволяють моделювати об'ємні охоронні зони, аналізувати взаємодію ЛЕП із природним середовищем та виявляти потенційні загрози. Їх застосування забезпечує високу точність та надійність моделей, що є необхідною умовою для кадастрових робіт, просторового планування, технічного обслуговування мережі та прийняття управлінських рішень у сфері електроенергетики.

3.7. Похибки ГІС-моделювання охоронних зон ліній електропередач.

Побудова охоронних зон ліній електропередач у геоінформаційних системах передбачає поєднання різнорідних просторових даних, використання аналітичних інструментів, просторову трансформацію, топологічну перевірку та опрацювання складної багаторівневої геометрії [46]. Кожен із цих етапів є потенційним джерелом похибок, які можуть накопичуватися або взаємно підсилюватися. Оскільки межі охоронних зон мають юридичний статус та застосовуються в кадастрових документах, похибки ГІС-моделювання можуть спричинити некоректне встановлення обмежень використання земельних ділянок, що впливає на господарську діяльність, проєктування інженерної інфраструктури та безпеку експлуатації електромереж [47]. Тому аналіз природи та джерел похибок ГІС-моделювання є важливою частиною побудови достовірної моделі охоронних зон.

Одним із першочергових джерел похибок є невідповідність координатних систем, у яких представлені вихідні просторові дані [48]. Часто дані GNSS-вимірювань задані в одній системі, картографічні матеріали — у другій, а CAD-плани чи технічна документація — у третій. Під час некоректного або спрощеного трансформування виникає систематичне зміщення, яке передається всім подальшим операціям у ГІС. У випадку ЛЕП навіть невелике зміщення може зсунути межу охоронної зони так, що вона перекриватиме сусідні земельні ділянки, хоча фактично ЛЕП на них не впливає. Тому невірне узгодження координатних систем є одним із найбільш критичних чинників похибок.

Важливим джерелом неточностей є похибки генералізації та оцифрування даних. Якщо геометрія ЛЕП створена шляхом оцифрування старих карт або конвертації CAD-файлів, існує ризик появи спрощених ліній, неправильного розташування вузлів та втрати дрібних деталей. При генералізації, яка виконується автоматично для оптимізації геометрії, алгоритми можуть видалити важливі точки або згладити кути, що вплине на точність розрахунку ширини та форми охоронної зони [49]. У результаті буферна зона, побудована на основі таких геометрій, може не відповідати дійсному плановому положенню проводів.

Окрему групу складають топологічні похибки, які виникають під час імпорту, редагування або об'єднання даних. Розриви ліній, дублювання сегментів, самоперетини, зайві вузли чи накладання геометрій спричиняють спотворення алгоритмів створення буфера [50]. Наприклад, при наявності розриву навіть у кілька сантиметрів система може сформувати два окремі буфери або створити нерівномірний контур. Топологічні похибки особливо інтенсивно накопичуються під час поєднання даних з різних джерел — геодезичних, картографічних, кадастрових та інженерних.

Суттєво на точність ГІС-моделювання впливають похибки цифрової моделі рельєфу, яка використовується для визначення висоти проводів над

поверхнею землі та коректного формування просторової структури охоронної зони [51]. Неправильний вибір ЦМР, її низька роздільна здатність, помилки у хмарах точок або некоректно інтерпольовані значення можуть призвести до хибного уявлення про висотну компоненту ЛЕП. У складних рельєфних умовах навіть невелике відхилення у висоті може суттєво вплинути на визначення мінімального безпечного габариту. Особливо небезпечними є похибки інтерполяції, які виникають під час побудови моделі рельєфу на основі обмеженої кількості точок.

Наступним джерелом є алгоритмічні похибки, пов'язані з роботою інструментів ГІС [52]. Алгоритми буферизації відрізняються у різних програмних продуктах, а параметри округлення, тип буфера, спосіб згладжування кутиків, методика обрахунку геометрії — можуть суттєво впливати на кінцевий вигляд охоронної зони. У деяких випадках стандартний алгоритм Buffer створює нерівномірні форми у місцях різкого повороту лінії або при наявності дрібних сегментів. Неправильно налаштовані параметри буферизації здатні формувати локальні деформації, асиметрію або відриви охоронної зони.

Значну роль відіграють похибки інтерполяції та згладжування, які застосовуються до геометрії ЛЕП під час побудови тривимірної моделі [53]. Оскільки фактичне положення проводів у просторі є складною кривою, моделі часто використовують математичні методи для її наближення. Якщо алгоритм обрав неправильний тип кривої або невірно обробив вихідні точки, положення проводу може бути реконструйоване із суттєвими перекрученнями. Це особливо критично при моделюванні мінімальної висоти провисання або визначенні зон можливого наближення до об'єктів.

Важливим джерелом неточностей є атрибутивні похибки, які виникають під час перенесення або редагування інформації про технічні характеристики ліній. Якщо вказано неправильний клас напруги, тип проводу, матеріал, довжину прольоту або інші параметри, модель охоронної зони буде

сформована з порушенням нормативів [54]. Навіть невелика атрибутивна помилка здатна суттєво вплинути на масштаб обмежень, оскільки ширина охоронної зони напряду залежить від технічних характеристик ЛЕП.

Серед вагомих типів неточностей слід виділити часові похибки, пов'язані з неузгодженістю актуальності даних [55]. Рельєф може змінюватися через будівництво, проведення земляних робіт чи ерозійні процеси; рослинність — зростати або вирубуватися; опори ЛЕП — реконструюватися чи зміщуватися; кабелі — замінюватися на інші з іншим провисанням. Якщо просторові дані неактуальні, то побудована на їх основі модель охоронної зони не відповідатиме реальній ситуації. Особливо критично це для густонаселених територій та районів активного будівництва.

Похибки ГІС-моделювання часто мають накопичувальний ефект. Помилка в одному джерелі або на одному етапі обробки може бути посилена на наступних етапах. Наприклад, неточність у трансформації координат підсилюється під час буферизації, а неточність рельєфу — під час формування 3D-моделі [46]. Накопичення похибок у комплексі може призвести до значних зміщень у десятки метрів, що є критичним порушенням вимог точності кадастрових робіт.

Для мінімізації похибок застосовують низку методів, серед яких найважливішими є: топологічна перевірка; використання високоточних моделей рельєфу; ретельне узгодження систем координат; накладання контрольних геодезичних вимірювань; оцінка невизначеності результатів; аналіз залишкових похибок; застосування вагового моделювання під час поєднання даних; повторна перевірка геометрії на різних етапах моделювання; використання спеціалізованих алгоритмів обробки геометрії [47; 51].

Комплексний характер похибок ГІС-моделювання свідчить про те, що якість результатів значною мірою залежить від сумлінності підготовки вихідних даних, коректності їх узгодження та уважності на кожному етапі аналітичної обробки. Кожен тип даних має власну природу похибок, і лише

системний підхід до їх виявлення дозволяє створити модель охоронних зон, здатну точно відображати просторові умови, у яких функціонують лінії електропередач. Це забезпечує як технічну надійність електромереж, так і юридичну коректність встановлених обмежень, що вкрай важливо для землепорядних робіт, проєктування і просторового планування територій.

Висновки до розділу 3

Розділ, присвячений методам та технологіям просторового моделювання охоронних зон ліній електропередач, продемонстрував, наскільки багатокомпонентним і технічно складним є процес формування точних та надійних просторових моделей. Аналіз проведений у межах розділу показав, що сучасні підходи до моделювання охоронних зон поєднують геодезичні вимірювання, аналітичні інструменти, ГІС-технології, цифрові моделі рельєфу, дані дистанційного зондування та спеціалізовані алгоритми обробки геометрії. Кожний із цих компонентів відіграє важливу роль і має власні особливості, які необхідно враховувати, щоб отримати достовірну і юридично значущу модель охоронної зони.

У межах дослідження було встановлено, що одним із ключових елементів моделювання є коректне використання просторових даних, від якості яких залежить точність отриманого результату. Дані геодезичних вимірювань забезпечують високу точність локалізації опор і траси ЛЕП, а ГІС-технології дозволяють інтегрувати їх з іншими джерелами інформації та виконувати складні просторові операції. Особливо важливим виявилось розуміння того, що моделювання охоронних зон неможливе без узгодження систем координат, оскільки будь-яка невідповідність між ними спричиняє систематичні зміщення, які передаються всій подальшій моделі.

Проведений аналіз ГІС-інструментів показав, що побудова буферних зон значно залежить від особливостей алгоритмів, закладених у конкретне

програмне забезпечення. Різниця у способах округлення, генералізації, обробки кутів та складних геометричних форм може створювати нерівномірні межі, які не завжди відповідають фізичним умовам проходження ЛЕП. Саме тому важливо не лише обирати інструменти буферизації, але й розуміти їхні технічні обмеження.

Окреме місце в аналізі посіло тривимірне моделювання. Воно продемонструвало, що врахування вертикальної складової має критично важливе значення для достовірності моделі охоронної зони. У двовимірному середовищі траса ЛЕП розглядається лише у плановому положенні, що призводить до істотних спрощень. Натомість 3D-моделі дозволяють відтворити реальне положення проводів над поверхнею землі, врахувати провисання, вплив температури, геометрію прольотів та рельєф місцевості. Таке моделювання відкриває можливість для формування об'ємних охоронних зон, здатних більш точно відображати просторові ризики.

Важливою складовою дослідження стало використання цифрових моделей рельєфу. ЦМР дали змогу оцінити реальні висотні характеристики місцевості, визначити специфічні ділянки, у яких провід наближається до поверхні землі, та врахувати вплив природних умов на просторове положення лінії. Особливо корисним виявилось використання високоточних моделей, отриманих шляхом LiDAR-сканування або фотограмметрії з БПЛА. Ці методи дозволяють моделювати як рельєф, так і навколишню рослинність, що є важливим для визначення загроз, пов'язаних із можливим наближенням крон дерев до проводів.

Аналіз у межах підрозділу 3.7 показав, що похибки ГІС-моделювання мають комплексний характер і можуть виникати на будь-якому етапі — від збору даних до формування остаточної моделі охоронної зони. Їх природа охоплює як технічні фактори (трансформація координат, генералізація, інтерполяція), так і організаційні (неактуальність даних, відсутність топологічної перевірки, спрощення моделей). Моделювання охоронних зон

вимагає уважного ставлення до всіх джерел похибок, оскільки вони можуть підсилювати одна одну та формувати інтегральний ефект, що суттєво впливає на результат.

Інтегральні моделі точності, розглянуті у підрозділі 3.5, показали, що поєднання різнорідних просторових даних потребує комплексного підходу, який враховує змішану природу похибок. Їх аналіз дозволяє оцінити, наскільки модель охоронної зони відповідає нормативним вимогам і чи може вона бути використана у кадастрових роботах або проєктуванні. Інтегральна оцінка точності також допомагає визначити пріоритетність джерел даних, обґрунтувати необхідність повторного знімання або вказати на ділянки, які потребують уточнення.

У результаті проведених досліджень встановлено, що процес моделювання охоронних зон ЛЕП у ГІС — це складна багаторівнева задача, яка потребує системного підходу, об'єднання високоточних вимірювань, сучасних аналітичних технологій та засобів контролю якості просторових даних. Використання комплексних методів моделювання дозволяє не лише відтворити реальну просторову конфігурацію ліній електропередач, а й забезпечити юридичну обґрунтованість сформованих обмежень, що є необхідною умовою раціонального використання територій та безпечної експлуатації електричних мереж.

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ В ПРОФЕСІЙНІЙ ДІЯЛЬНОСТІ

Організація безпечних і здорових умов праці є обов'язковою складовою професійної діяльності на будь-якому підприємстві та регламентується чинним законодавством України. Закон України "Про охорону праці" вимагає, щоб роботодавець під час укладення трудового договору інформував працівника про умови праці, можливі небезпечні чи шкідливі фактори на робочому місці та надавав роз'яснення щодо наявних ризиків, їх впливу на здоров'я та передбачених пільг і компенсацій [56]. Поряд із цим роботодавець

зобов'язаний створити безпечне виробниче середовище, забезпечити виконання нормативних вимог та надати працівникам доступ до інструкцій, положень і правил, що регламентують безпечну роботу.

Нормативно-правова база у сфері охорони праці включає закони, стандарти, інструкції, правила та інші документи, що визначають вимоги до організації робочого процесу, експлуатації обладнання й утримання виробничих приміщень [56]. Вони мають обов'язковий характер і підлягають контролю з боку державних органів. У разі виявлення порушень інспектори можуть зупиняти діяльність підприємства чи окремих виробничих ділянок, а за невиконання приписів або грубі порушення застосовуються адміністративні штрафи, розмір яких може сягати до 5 % місячного фонду заробітної плати.

Особливу увагу приділяють виконанню робіт у польових умовах, де на працівників можуть діяти різні небезпечні та шкідливі фактори. Перед початком польових робіт необхідно заздалегідь визначити обсяг завдань, скласти план організаційно-технічних заходів та оцінити умови, у яких здійснюватиметься робота. Працівники повинні пройти всі необхідні інструктажі з охорони праці, отримати засоби індивідуального захисту, бути забезпечені аптечкою, питною водою та засобами зв'язку. До польових робіт допускаються лише особи, які перебувають у задовільному фізичному стані та не мають ознак алкогольного чи наркотичного сп'яніння [57].

Важливим системоутворюючим елементом охорони праці є належне нормативне забезпечення, яке здійснюється відповідно до Закону України "Про охорону праці", Кодексу законів про працю України та Закону України "Про загальнообов'язкове державне соціальне страхування від нещасних випадків на виробництві". Дані документи визначають права й обов'язки роботодавця, гарантії для працівників, вимоги до умов праці та механізми компенсації у разі нещасного випадку або професійного захворювання. Дотримання цих положень є обов'язковим для всіх суб'єктів господарювання, незалежно від форми власності.

Безпечні та нешкідливі умови праці забезпечуються за рахунок правильного облаштування приміщення, раціонального розміщення обладнання, створення оптимального мікроклімату, дотримання санітарних вимог і використання якісних засобів індивідуального та колективного захисту. Основні вимоги до робочих приміщень регламентуються державними санітарними нормами, будівельними нормами та правилами охорони праці. Вони визначають необхідні параметри площі, освітлення, шумового фону, рівнів вібрації, властивостей підлоги та оздоблення поверхонь.

Особливі вимоги висуваються щодо робочих місць, обладнаних персональними комп'ютерами. Вони повинні розміщуватися у приміщеннях, що відповідають вимогам до рівня освітленості, вентиляції та мікроклімату. Устаткування має встановлюватися так, щоб забезпечувати працівникові зручну робочу позу, вільний доступ до клавіатури й монітора та уникнення зайвого навантаження на зір і опорно-руховий апарат. Важливо дотримуватися нормативів відстаней між робочими місцями, а при необхідності концентрації уваги використовувати захисні перегородки.

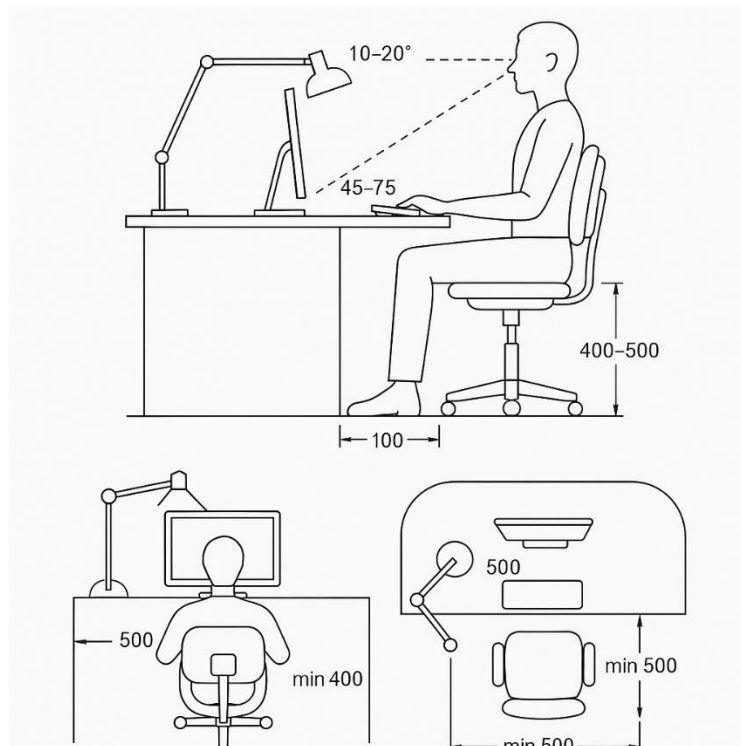


Рисунок 4.1 – Організація та обладнання робочого місця користувача персонального комп'ютера

Джерело: Сформовано автором

Крім правильного облаштування робочого місця, необхідно враховувати вимоги до освітлення. Приміщення повинні мати природне та штучне освітлення, яке забезпечує необхідний рівень яскравості для комфортної роботи. Джерела світла слід розташовувати так, щоб уникати блиску на екрані монітора й нерівномірності освітлення робочих поверхонь [58]. Також значну увагу приділяють рівням шуму та вібрації, оскільки тривалий вплив цих чинників може спричиняти стомлення й негативно позначатися на здоров'ї працівника.

Електробезпека є ще одним ключовим аспектом організації робочого середовища. Усі електроприлади повинні підключатися до мережі через справні розетки й штепсельні пристрої заводського виготовлення. Приміщення, у яких одночасно працює багато електронної техніки, мають бути забезпечені аварійним вимикачем, що дозволяє знеструмити приміщення в разі аварійної ситуації [58]. Електропроводка та обладнання повинні відповідати нормам пожежної безпеки, виключаючи можливість короткого замикання.

Раціональна організація праці передбачає дотримання регламентованих перерв для відпочинку. Вони дають змогу уникнути перевтоми, знизити навантаження на очі та опорно-руховий апарат. Тривалість і частота перерв залежать від характеру трудової діяльності та визначаються нормативними документами, стандартами безпеки та правилами внутрішнього трудового розпорядку.

У разі порушення роботодавцем вимог охорони праці працівники мають право звертатися до органів державного нагляду, а підприємство може бути притягнуте до відповідальності у вигляді штрафів, установлених законом [56].

Проте сплата штрафу не звільняє роботодавця від обов'язку усунути порушення у встановлені строки.

Отже, охорона праці охоплює комплекс заходів, що спрямовані на забезпечення безпечних умов виконання трудових обов'язків, збереження життя та здоров'я працівників, попередження виробничих травм і професійних захворювань. Ефективність цієї системи залежить як від роботодавця, який організовує робочий процес, так і від працівників, які повинні відповідально дотримуватися встановлених правил і норм. Лише взаємодія цих двох сторін дає змогу створити на підприємстві справді безпечне робоче середовище.

ВИСНОВКИ

Проведене дослідження дало змогу всебічно розглянути теоретичні, методологічні та практичні аспекти визначення меж охоронних зон ліній електропередач, а також сформулювати цілісне розуміння того, які фактори, процеси та технічні особливості впливають на точність визначення цих меж у сучасних умовах. Охоронні зони ЛЕП виконують не лише технічну, але й важливу правову та соціальну функцію, адже їх відтворення безпосередньо пов'язане з безпекою людей, захистом інфраструктури, раціональним використанням земель та запобіганням конфліктам землекористування. Саме тому питання їх точного визначення й моделювання є актуальним, практикоорієнтованим та має безпосереднє значення для сфери землеустрою, геодезії, електроенергетики та територіального планування.

У першому розділі роботи було проаналізовано теоретичні та методологічні засади, що стосуються класифікації ліній електропередач, їх технічних характеристик, а також нормативно-правового забезпечення встановлення охоронних зон. Вивчення класифікацій ЛЕП за різними ознаками — напругою, конструктивними елементами, просторовою конфігурацією — дозволило зрозуміти, чому охоронні зони для різних ліній суттєво відрізняються. Було розглянуто сучасну законодавчу базу, що регламентує розміри та особливості встановлення таких зон, визначає права та обов'язки землекористувачів, а також встановлює обмеження, які виникають у межах охоронних територій. Усвідомлення нормативної основи є критично важливим, адже точність визначення меж ЛЕП завжди має підґрунтя у конкретних правових нормах, що регулюють безпечні відстані й правила експлуатації інженерних мереж.

Окрему увагу приділено геометричним параметрам охоронних зон для різних класів напруги, що дозволило показати логіку формування мінімальних безпечних відстаней та зрозуміти, яким чином технічні особливості ліній трансформуються у вимоги до планування територій. Аналіз теоретичних основ точності геодезичних вимірювань дав змогу визначити природу похибок, їх класифікацію та вплив на кінцевий результат. Це стало фундаментом для подальшого аналізу чинників, які безпосередньо впливають на точність моделювання меж охоронних зон.

Другий розділ був присвячений детальному вивченню теоретичних основ точності, що мають значення під час визначення меж ЛЕП. Було з'ясовано, що на точність формування охоронних зон впливає значна кількість факторів — від фізичних особливостей поведінки проводів до технічних характеристик геодезичних приладів, від параметрів навантаження на мережу до зовнішніх природних умов. Доведено, що положення проводів у просторі є динамічним і змінюється залежно від температури, сили натягу, довжини прольотів та

вітрового навантаження. Це формує природну геометричну невизначеність, яку необхідно враховувати при визначенні меж зон.

Важливою частиною дослідження було визначення впливу конструктивних та фізичних особливостей ЛЕП на точність просторового моделювання. Стріла провисання, зміна висоти підвісу, деформаційні процеси проводів — усе це чинить суттєвий вплив на просторове положення лінії і, відповідно, на правильність і точність побудови охоронних зон. Так само важливим є вплив систем координат та особливостей їх трансформації. Навіть високоточні дані можуть давати помилкові результати, якщо отримані у різних координатних системах або неточно трансформовані. Це ще раз підкреслює значення правильного геодезичного забезпечення.

Виявлено, що точність визначення меж ЛЕП є комплексною величиною, яка включає в себе як технічні похибки геодезичних вимірювань, так і параметри поведінки самих проводів, а також похибки цифрових моделей та ГІС-алгоритмів. Саме тому оцінка точності визначення меж охоронних зон потребує системного підходу та ґрунтується на аналітичних, статистичних і геометричних методах.

Третій розділ був спрямований на аналіз сучасних методів та технологій просторового моделювання меж охоронних зон ЛЕП. Досліджено можливості ГІС-платформ та їх застосування для побудови 2D- та 3D-моделей. Розгляд алгоритмів формування буферних зон показав, що різні ГІС-програми можуть обробляти однакові вихідні дані по-різному, що зумовлено особливостями реалізації математичних операцій, обробки криволінійних елементів та топологічних структур. Це підкреслює необхідність попередньої топологічної перевірки даних та стандартизації їх обробки.

Особливе значення має 3D-моделювання, яке дозволяє враховувати реальну просторову поведінку проводів, рельєф місцевості, перепади висоти та інші чинники, що в 2D-моделях залишаються прихованими. Також було визначено основні топологічні помилки, що виникають у процесі створення

моделей, — розриви ліній, дублікати, самоперетини — та описано методи їх усунення. Вивчення інтегральних моделей точності показало, що важливо враховувати різницю у походженні даних, суміщаючи GNSS-вимірювання, картографічні матеріали, технічні документи та дані цифрового рельєфу.

Усі отримані результати свідчать про те, що точне моделювання охоронних зон є можливим лише за умови комплексного підходу, який поєднує сучасні технології з високоточними геодезичними вимірюваннями та правильним вибором алгоритмів просторового аналізу.

Узагальнюючи результати всієї роботи, слід підкреслити, що точність визначення меж охоронних зон ліній електропередач залежить від поєднання багатьох взаємопов'язаних факторів — технічних, геодезичних, нормативних і просторових. Встановлено, що значну роль відіграє не лише якість і точність первинних вимірювань, але й правильна інтерпретація технічних характеристик ЛЕП, вибір координатних систем, топологічна коректність векторних даних та особливості застосування геоінформаційних технологій.

Доведено, що застосування сучасних геодезичних приладів, алгоритмів обробки даних та тривимірного моделювання дозволяє суттєво підвищити точність просторових рішень, що у практичній площині сприяє більш якісному формуванню землевпорядної документації, зменшенню помилок під час встановлення обмежень у використанні земель та підвищенню безпеки експлуатації інженерних мереж.

Результати магістерської роботи можуть бути використані у практиці землеустрою, кадастровій діяльності, електроенергетиці, містобудуванні та територіальному плануванні. Проведене дослідження підтверджує необхідність подальшого удосконалення методів моделювання та оцінювання точності, розширення застосування 3D-технологій, а також оновлення нормативно-правової бази відповідно до сучасних технічних можливостей.

Загалом робота дозволила сформувати системне бачення процесів визначення меж охоронних зон ЛЕП, показала взаємозв'язок теоретичних і практичних аспектів точності, а також окреслила можливі напрями вдосконалення цієї сфери. Отримані висновки сприяють глибшому розумінню специфіки просторового моделювання та можуть бути основою для подальших наукових досліджень і практичних розробок у цій галузі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Закон України "Про ринок електричної енергії" : Закон України від 13.04.2017 № 2019-VIII // Верховна Рада України. – URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2019-19> (дата звернення: 22.09.2025).
2. Енергетична стратегія України до 2035 року "Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність". – Київ: Міненерговугілля України, 2017. – 66 с.
3. ДСТУ EN 50341-1:2014. Лінії електропередавання змінного струму напругою понад 1кВ. Частина 1. Загальні вимоги. – Київ: Мінекономрозвитку України, 2015. – 92 с.
4. Правила улаштування електроустановок. Електричні мережі. – Харків : Форт, 2013. – 456 с.

5. Про затвердження Правил охорони електричних мереж : Постанова Кабінету Міністрів України від 27.12.2022 № 1455 // Кабінет Міністрів України. – URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1455-2022-%D0%BF> (дата звернення: 22.09.2025).

6. ДБН В.2.5-74:2013. Електропостачання. – Київ : Мінрегіон України, 2014. – 134 с.

7. ДБН Б.2.2-12:2019. Планування та забудова територій. – Київ : Мінрегіон України, 2019. – 142 с.

8. CIGRÉ. Guide for the design of overhead lines. Paris: International Council on Large Electric Systems, 2016. 128 p.

9. Земельний кодекс України : Закон України від 25.10.2001 № 2768-III // Відомості Верховної Ради України. — 2002. — № 3–4. — Ст. 27. – URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2768-14> (дата звернення: 22.09.2025).

10. ДБН В.2.5-23:2010. Зовнішні мережі та споруди. Електричні мережі. — Київ : Мінрегіонбуд України, 2011. — 146 с.

11. Закон України "Про регулювання містобудівної діяльності" : Закон України від 17.02.2011 № 3038-VI // Відомості Верховної Ради України. — 2011. — № 34. — Ст. 343. – URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3038-17> (дата звернення: 25.09.2025).

12. Про затвердження Порядку ведення Державного земельного кадастру : Постанова Кабінету Міністрів України від 17.10.2012 № 1051 // Офіційний вісник України. — 2012. — № 89. — Ст. 3581. – URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1051-2012-%D0%BF> (дата звернення: 25.09.2025).

13. Кримінальний кодекс України : Закон України від 05.04.2001 № 2341-III // Відомості Верховної Ради України. — 2001. — № 25–26. — Ст. 131. – URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2341-14> (дата звернення: 25.09.2025).

14. Про національну інфраструктуру геопросторових даних : Закон України від 13.04.2020 № 554-IX // Голос України. — 2020. — № 79. — URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/554-20> (дата звернення: 27.09.2025).
15. Правила улаштування електроустановок. Розділ 2. Глава 2.4. Повітряні лінії електропередач : НПАОП 40.1-1.32-01. — К. : Міністерство праці та соціальної політики України, 2002. — 143 с.
16. Шебанін Л. В., Хомич В. В. Топологія географічних інформаційних систем : навч. посіб. — К. : ВПЦ “Київський університет”, 2015. — 184 с.
17. Ткачик О. Визначення розмірів санітарно – захисних зон ліній електропередачі / О. Ткачик // Збірник матеріалів XVII Міжнародного науково-технічного симпозіуму "Геоінформаційний моніторинг навколишнього середовища : GNSS і GIS-технології. – (Алушта (Крим), 2012р.)". – Львів, 2012. – С.241 243.
18. Барановський В. А., Колесник О. І., Руденко Л. Г. Геоінформаційні системи та технології : навч. посіб. — К. : КНЕУ, 2019. — 312 с.
19. Шевченко В. П., Бахтурін Ю. О., Кучеренко Ю. Г. Геоінформаційні системи та аналіз просторових даних : навч. посіб. — Харків : ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2020. — 284 с.
20. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ). — Чинний від 01.01.2018 р. — Київ : Міністерство енергетики та вугільної промисловості України, 2017. — 712 с.
21. ДСТУ EN 50341-1:2019. Лінії електропередавання змінного струму. Частина 1. Загальні вимоги. — Київ : ДП "УкрНДНЦ", 2019. — 198 с.
22. EN 50341-2-4:2018. Overhead electrical lines exceeding AC 1 kV — Part 2-4: National Normative Aspects — Ukraine. — Brussels : CENELEC, 2018. — 62 р.

23. IEC 60826:2017. Design criteria of overhead transmission lines. — Geneva : International Electrotechnical Commission, 2017. — 180 p.
24. CIGRÉ Technical Brochure 299. Guide for the Management of Transmission Line Clearances. Paris : CIGRÉ, 2006. — 112 p.
25. Burrough P. A., McDonnell R. A., Lloyd C. D. Principles of Geographical Information Systems. — Oxford University Press, 2015. — 432 p.
26. Кошляков О. Є., Кошлякова Н. В. Геоінформаційні системи: теорія та практика : навч. посіб. — Київ : Видавничий дім "Слово", 2020. — 312 с.
27. Шевченко В. П., Бондаренко С. М. Геоінформаційні технології в інженерних вишукуваннях : навч. посіб. — Київ : КНУБА, 2019. — 268 с.
28. Дем'янчук О. О., Мельник О. М. Цифрові моделі рельєфу та їх застосування в геоінформаційних системах : навч. посіб. — Львів : Видавництво ЛНУ ім. І. Франка, 2020. — 212 с.
29. Шкуропацький О. І., Марченко О. М. Геоінформаційні системи : підручник. — Київ : Ліра-К, 2019. — 368 с.
30. Бондаренко В. І., Кузьменко В. М. Електричні мережі та системи: підручник. — Київ : Вища школа, 2017. — 412 с.
31. Руденко В. П., Жеребцов Г. М., Костриця О. М. Геоінформаційні системи та моделювання просторових процесів: навч. посіб. — Київ : КНУ ім. Т. Шевченка, 2020. — 256 с.
32. Burrough P. A., McDonnell R. A., Lloyd C. D. Principles of Geographical Information Systems. — 3rd ed. — Oxford : Oxford University Press, 2015. — 432 p.
33. Яцик Т. О., Кошляков О. Ю. Геоінформаційні системи: теорія та практика : навч. посіб. — Київ : КНУБА, 2020. — 268 с.

34. Кулініч Л. В. Геоінформаційні технології у землеустрої : навч. посіб. — Харків : ХНАУ, 2019. — 312 с.
35. Shan J., Toth C. K. *Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing*. - Boca Raton : CRC Press, 2018. - 971 p.
36. Maune D.F. *Digital Elevation Model Technologies and Applications: The DEM Users Manual*. ASPRS, 2019.
37. R. Szeliski. *Computer Vision: Algorithms and Applications*. Springer, 2022.
38. Nex F., Remondino F. UAV for 3D Mapping. *Remote Sensing*, 2014.
39. Ісаєнко В. М., Кисіль В. М. Геоінформаційні системи в інженерно-геодезичних вишукуваннях. — Київ : КНУБА, 2017. — 256 с.
40. Дубик В. М., Ляшенко А. А. Цифрове моделювання рельєфу: теорія, методи, застосування. — Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2019. — 312 с.
41. Гутиря С. В., Дубина М. В. Використання LiDAR-технологій для побудови цифрових моделей рельєфу та аналізу лісової рослинності. // Науковий вісник НУБіП України. Серія: Лісівництво та декоративне садівництво. — 2020. — № 12. — С. 45–53.
42. Huang H., Cheng L., Li M., Chen Y. 3D modeling of transmission lines using LiDAR data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2019. Vol. 148. P. 1–13.
43. Li Z., Zhu Q., Gold C. *Digital Terrain Modeling: Principles and Methodology*. Boca Raton: CRC Press, 2005. 323 p.
44. ESRI. *ArcGIS Pro 3D Analyst User Guide*. ESRI Press, 2023.
45. Wilson J.P., Gallant J.C. *Terrain Analysis: Principles and Applications*. Wiley, 2017.

46. Kavanagh B.F., Bird S.J. Surveying: Principles and Applications. 9th ed. New York: Pearson, 2014. 720 p.
47. Заяць В. А., Шевченко О. Г. Геоінформаційні системи у кадастровій діяльності: правові та технологічні аспекти. Київ: Вид-во КНУБА, 2020. 212 с.
48. Лященко А. А., Дідик В. В. Геодезичні системи координат та їх трансформації: навчальний посібник. Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2019. 180 с.
49. Шевченко Р. Б. Генералізація просторових даних у геоінформаційних системах: методи та алгоритми: монографія. Київ: НАУ, 2017. 212 с.
50. Бацуровська І. В., Гутиря С. В. Топологічний контроль та усунення помилок у векторних даних ГІС. Вісник геодезії та картографії. 2019. №4. С. 21–29.
51. Яковлєв Є. О., Лисенко І. В. Аналіз точності цифрових моделей рельєфу та їх вплив на результати геоінформаційного моделювання. Вісник геодезії та картографії. 2020. №2. С. 17–26.
52. Сосса Р. В., Дубик М. О. Алгоритмічні особливості формування буферних зон у геоінформаційних системах. Геодезія, картографія і аерофотознімання. 2019. № 89. С. 45–52.
53. Ляшенко А. І., Панас Р. М. Похибки інтерполяції та згладжування при побудові цифрових моделей місцевості та лінійних об'єктів. Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. 2020. № 2(40). С. 112–118.
54. СОУ-Н ЕЕ 20.302:2007. Лінії електропередавання. Норми проектування. – Київ: Міністерство палива та енергетики України, 2007. – 128 с.
55. ДСТУ 7169:2010. Географічна інформація. Якість даних. – Київ: Держспоживстандарт України, 2011. – 34 с.

56. Закон України "Про охорону праці" : Закон України від 14.10.1992 № 2694-ХІІ // Верховна Рада України. – URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12> (дата звернення: 27.09.2025).

57. Типове положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці : Наказ Держнаглядохоронпраці України від 26.01.2005 № 15. – URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0231-05> (дата звернення: 27.09.2025).

58. ДБН В.2.5-28:2018. Природне і штучне освітлення. – Київ : Міністерство регіонального розвитку, будівництва та ЖКГ України, 2018. – 77 с.