

ПОЛТАВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерно-технологічний
Кафедра механічної та електричної інженерії

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи на здобуття ступеня вищої освіти

бакалавр

на тему: «Дослідження конструкцій і методів розрахунку повітряних ліній
електропередачі середньої напруги»

КРБ.14ЕЕбд_41.07.00.00.000 ПЗ

Виконав: здобувач вищої освіти за
освітньо-професійною програмою
*«Електроенергетика, електротехніка
та електромеханіка»*
спеціальності 141
*«Електроенергетика, електротехніка
та електромеханіка»*
ступеня вищої освіти *бакалавр*
групи *141ЕЕбд_41*
СЕРДЮК Владислав

Керівник: канд. фіз.-мат. наук, доцент
СЕМЕНОВ Анатолій

Полтава – 2026 року

ВСТУП

Повітряні лінії електропередачі середньої напруги є важливим елементом електроенергетичних систем, оскільки забезпечують передавання та розподіл електричної енергії між підстанціями, промисловими підприємствами, об'єктами комунального господарства та споживачами агропромислового комплексу [1]. Надійність роботи таких ліній значною мірою визначає безперебійність електропостачання, технічний стан мереж та економічну ефективність експлуатації електроенергетичних систем.

У сучасних умовах підвищуються вимоги до надійності, довговічності та безпеки повітряних ліній. Це пов'язано зі старінням значної частини мереж, впливом атмосферних факторів, механічними навантаженнями, а також необхідністю застосування нових конструкцій проводів, ізоляторів, опор та засобів захисту. Особливої актуальності набуває дослідження конструкцій повітряних ліній середньої напруги та методів їх розрахунку, оскільки правильний вибір конструктивних рішень і розрахункових параметрів є основою надійної та економічно доцільної експлуатації ліній електропередачі.

Повітряні лінії середньої напруги працюють у складних умовах зовнішнього середовища. На їх елементи впливають власна вага проводів, вітрові та ожеледні навантаження, температурні зміни, електричні перенапруги та механічні впливи. Тому при проектуванні таких ліній необхідно враховувати як електричні, так і механічні характеристики конструктивних елементів, а також особливості монтажу і подальшої експлуатації [2].

Метою роботи є дослідження конструкцій повітряних ліній електропередачі середньої напруги та методів їх розрахунку з метою обґрунтування раціональних технічних рішень, що забезпечують надійність, безпеку та ефективність експлуатації ліній.

Об'єкт дослідження – повітряні лінії електропередачі середньої напруги.

Предмет дослідження – конструктивні елементи повітряних ліній середньої напруги та методи їх електричного і механічного розрахунку.

Методи дослідження – аналіз технічної літератури та нормативних джерел, аналітичні методи розрахунку параметрів повітряних ліній, методи порівняння конструктивних рішень, а також узагальнення результатів дослідження.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

проаналізувати основні конструктивні елементи повітряних ліній середньої напруги;

дослідити особливості застосування проводів, опор, ізоляторів і лінійної арматури;

розглянути сучасні методи розрахунку повітряних ліній;

виконати розрахунок окремих параметрів повітряної лінії середньої напруги;

обґрунтувати технічні рішення щодо підвищення надійності та ефективності експлуатації лінії.

Практична значимість роботи полягає у можливості використання запропонованих підходів під час проектування, реконструкції та технічного переоснащення повітряних ліній електропередачі середньої напруги з метою підвищення надійності електропостачання, зниження аварійності та покращення умов експлуатації обладнання.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ СЕРЕДНЬОЇ НАПРУГИ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ НАПРЯМКУ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Загальна характеристика повітряних ліній середньої напруги

Повітряні лінії електропередачі середньої напруги є одним із найважливіших елементів систем розподілу електричної енергії. Вони забезпечують передавання електроенергії від підстанцій до промислових, комунальних, сільськогосподарських та побутових споживачів, а також виконують функцію зв'язку між окремими вузлами енергосистеми. До ліній середньої напруги, як правило, належать повітряні лінії класу 6, 10, 20 та 35 кВ, які широко застосовуються у розподільних електричних мережах [1].

Повітряна лінія електропередачі представляє собою інженерну споруду, призначену для передавання електричної енергії по проводах, що розташовані на відкритому повітрі та закріплені за допомогою ізоляторів і арматури на опорах [2]. У порівнянні з кабельними лініями повітряні лінії мають нижчу вартість спорудження, простіше технічне обслуговування, зручність виявлення пошкоджень та відносно високу ремонтпридатність [3, 4]. Саме тому вони залишаються найбільш поширеним видом ліній електропередачі у мережах середньої напруги, особливо в умовах значної протяжності трас та необхідності охоплення великих територій. Такий підхід до загальної характеристики ПЛ відповідає змісту поданого зразка, де розгляд конструкції лінії починається із визначення її ролі в системі електропостачання та опису основних елементів.

До складу типової повітряної лінії середньої напруги входять такі основні елементи: фазні проводи; опори; ізолятори; лінійна арматура; грозозахисні пристрої або троси, якщо вони передбачені конструкцією; заземлювальні пристрої; елементи захисту від перенапруг [2, 5].

Кожен із перелічених елементів виконує свою функцію в загальній конструкції повітряної лінії. Проводи забезпечують передавання електричного струму, опори сприймають механічні навантаження та утримують проводи на необхідній висоті, ізолятори забезпечують електричне відокремлення

струмоведучих частин від заземлених конструкцій, а лінійна арматура служить для кріплення, з'єднання та механічної фіксації елементів лінії. Надійність роботи всієї повітряної лінії залежить не лише від якості окремих складових, а й від правильності вибору їх конструкції, параметрів та умов експлуатації.

Особливістю повітряних ліній середньої напруги є їх робота в умовах безпосереднього впливу навколишнього середовища. На конструкції ПЛ діють температурні коливання, вітрові навантаження, ожеледь, атмосферні опади, сонячне випромінювання, забруднення атмосфери, а також електричні перенапруги, зумовлені грозовими явищами та комутаційними процесами. Саме тому при проєктуванні повітряних ліній необхідно враховувати не лише електричні параметри, але й механічну міцність, корозійну стійкість, довговічність і стійкість до кліматичних впливів.

Для повітряних ліній середньої напруги характерною є значна різноманітність конструктивних рішень. Це пояснюється різними умовами їх застосування: у населених пунктах, на відкритій місцевості, в промислових зонах, на сільськогосподарських територіях, у лісових масивах або в районах з підвищеним рівнем забруднення атмосфери. Відповідно до цих умов обираються типи проводів, конфігурація опор, типи ізоляторів, висота підвіски проводів та інші конструктивні параметри.

Серед повітряних ліній середньої напруги окрему увагу сьогодні приділяють лініям із застосуванням самонесучих ізольованих проводів. Такі рішення дозволяють підвищити безпечність експлуатації, знизити ризик коротких замикань через дотик гілок дерев чи сторонніх предметів, покращити надійність електропостачання та скоротити витрати на експлуатаційне обслуговування.

Незважаючи на простоту загального принципу побудови, повітряна лінія є складною системою [6], у якій поєднуються електротехнічні, механічні та будівельні вимоги. Неправильний вибір навіть одного з елементів конструкції може призвести до зниження надійності роботи всієї лінії, збільшення аварійності, підвищення втрат електроенергії або ускладнення технічного обслуговування.

Загальна характеристика повітряних ліній середньої напруги свідчить про те, що вони є складними електроенергетичними об'єктами, для яких важливе значення має раціональний вибір конструкції та методів розрахунку. Саме це зумовлює необхідність детального аналізу їх основних елементів [1].

1.2 Аналіз проводів повітряних ліній середньої напруги

Проводи є основним струмоведучим елементом повітряної лінії. Вони призначені для передавання електричної енергії на відстань та повинні забезпечувати необхідну пропускну здатність, механічну міцність, корозійну стійкість і довговічність. Вибір типу проводу для повітряної лінії середньої напруги є одним із найважливіших етапів проектування, оскільки саме провід значною мірою визначає електричні втрати, величину допустимого навантаження, механічні характеристики прольотів та економічність усієї лінії [1, 7, 8].

Для виконання повітряних ліній середньої напруги найчастіше застосовують алюмінієві, сталеалюмінієві та самонесучі ізольовані проводи. Розглянемо властивості міді, алюмінію, сталі та сталеалюмінієвих проводів.

Алюмінієві проводи характеризуються достатньо високою електропровідністю та відносно невеликою масою. Вони є економічно вигіднішими порівняно з мідними та широко використовуються в розподільчих мережах. Проте їхнім недоліком є нижча механічна міцність, через що вони не завжди можуть застосовуватися в умовах великих прольотів або підвищених механічних навантажень.

Мідні проводи мають кращі електричні характеристики, однак висока вартість і дефіцитність міді суттєво обмежують їх використання на повітряних лініях. Через це мідь в сучасних розподільчих мережах середньої напруги використовується рідко, переважно у спеціальних випадках [1, 6].

Для підвищення механічної міцності проводів широко використовують сталеалюмінієві проводи. Вони мають сталеве осердя, яке сприймає основне механічне навантаження, та зовнішній шар алюмінієвих дротів, що забезпечує необхідну електропровідність. Таке поєднання дає змогу отримати провід, який

одночасно є міцним і достатньо ефективним з точки зору передавання електроенергії. Саме сталевалюмінієві проводи особливо доцільно застосовувати на ділянках із великими прогонами, значними вітровими навантаженнями або складними кліматичними умовами [7-9].

За конструкцією проводи повітряних ліній, як правило, є багатодротяними. Окремі дроти скручуються навколо центрального елемента. Така конструкція забезпечує гнучкість проводу, достатню механічну міцність і зручність монтажу. Багатодротяна конструкція проводу містить на шість дротів більше, ніж попередній і дроти суміжних витків закручують у протилежні боки для збереження круглої форми проводу.

Маркування проводів характеризує з якого матеріалу та номінальний переріз. Наприклад, алюмінієві проводи позначаються літерою А, сталевалюмінієві – АС. Для сталевалюмінієвих проводів часто вказують переріз алюмінієвої частини та переріз сталевого осердя. Така система маркування дозволяє швидко ідентифікувати конструктивні особливості проводу та обирати його відповідно до вимог проєкту.

Останніми роками значної уваги набуває використання самонесучих ізольованих проводів. Їх конструкція передбачає наявність ізоляції зі світлостабілізованого поліетилену, що дає змогу значно підвищити безпеку експлуатації та зменшити ймовірність коротких замикань. СПІ мають низку важливих переваг: зменшення часу монтажу; підвищення безпеки експлуатації; зниження аварійності; зменшення втрат електроенергії; зменшення зони відчуження; зниження ризику несанкціонованого підключення [5].

Крім того, СПІ доцільно застосовувати в мережах 0,4–20 кВ замість традиційних неізольованих проводів, оскільки це забезпечує більш високий рівень надійності та безпеки лінії. Для середньої напруги це особливо актуально на ділянках, де траса проходить поблизу зелених насаджень, забудови або інших об'єктів, які можуть створювати підвищений ризик аварій.

Вибір типу проводу залежить від кількох основних чинників: класу напруги лінії; розрахункового струмового навантаження; довжини прогонів; кліматичних умов; механічних навантажень; економічної доцільності [1, 7, 8].

Таким чином, провід є не просто струмоведучим елементом лінії, а одним із ключових чинників, що визначають її технічні, економічні та експлуатаційні характеристики. Саме тому аналіз проводів повітряних ліній середньої напруги є необхідною передумовою для подальшого вибору конструкції та методів розрахунку лінії [7, 8].

1.3 Аналіз опор, ізоляторів та лінійної арматури повітряних ліній середньої напруги

Опори повітряних ліній призначені для механічного утримання проводів на заданій висоті від землі та забезпечення нормативних відстаней між проводами і заземленими частинами конструкції. Вони сприймають навантаження від маси проводів, ізоляторів, арматури, ожеледі, вітру та інших експлуатаційних факторів. Надійність повітряної лінії значною мірою залежить від правильного вибору типу опори та відповідності її конструкції конкретним умовам траси [5].

У розподільчих мережах середньої напруги найчастіше застосовують залізобетонні та металеві опори. Залізобетонні опори характеризуються достатньою довговічністю, відносною дешевизною, стійкістю до корозії та порівняно невеликими витратами на технічне обслуговування. Саме тому вони набули найбільшого поширення в мережах 6–35 кВ [5, 6]. У наданому зразку також зазначено, що залізобетонні опори відзначаються простотою виготовлення, дешевизною та відносною простотою обслуговування.

Металеві опори застосовують у випадках, коли потрібна підвищена механічна міцність або необхідно реалізувати спеціальні конструктивні рішення. Вони особливо доцільні на анкерних, кутових або перехідних ділянках, а також у випадках значних прольотів. Їх перевагою є можливість створення конструкцій складної форми, однак недоліком є вища вартість та необхідність антикорозійного захисту.

За призначенням опори поділяють на: проміжні; анкерні; кутові; кінцеві; відгалужувальні; перехідні.

На рис. 1.1 наведено основні типи опор повітряних ліній середньої напруги.

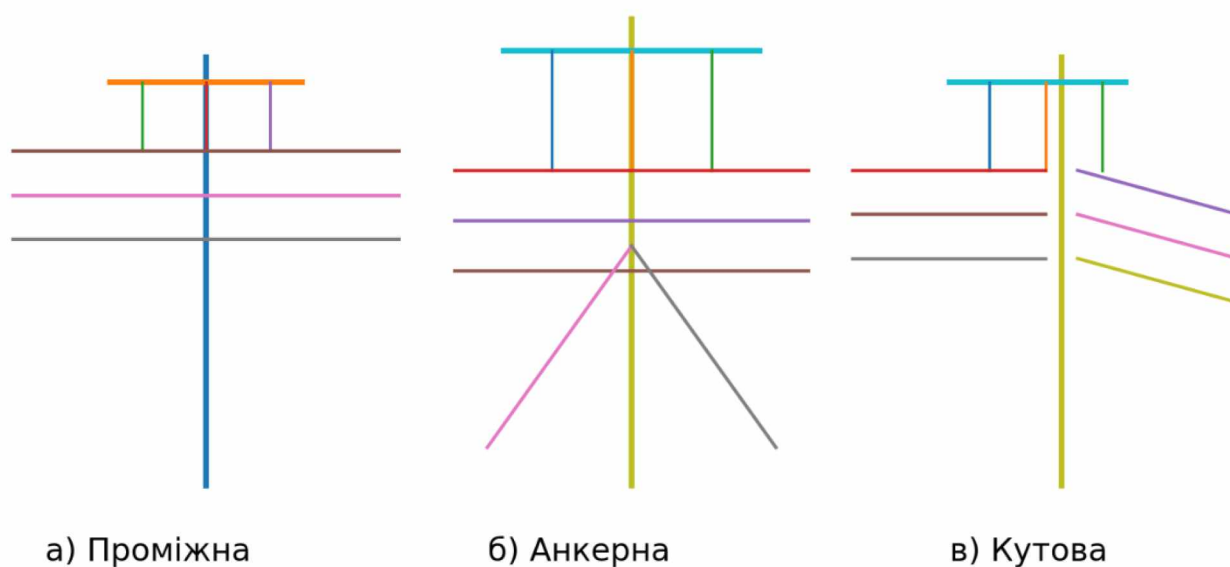


Рис. 1.1 Основні типи опор повітряних ліній середньої напруги.

Вибір конкретного типу опори залежить від конфігурації траси, довжини прогонів, величини механічних навантажень та умов експлуатації лінії.

Проміжні опори встановлюють на прямих ділянках траси для підтримання проводів. Анкерні опори призначені для сприйняття значних поздовжніх зусиль і встановлюються на кінцях лінії, на кутах повороту, а також на ділянках, де потрібно розділити трасу на окремі анкерні прогони.

Не менш важливим елементом конструкції повітряної лінії є ізолятори. Їх призначення полягає у створенні електричної ізоляції між проводом і опорою, а також у забезпеченні механічного кріплення проводу. Для повітряних ліній середньої напруги найчастіше використовують штирові, підвісні та композитні ізолятори [10-15].

Штирові ізолятори традиційно застосовуються на лініях до 35 кВ. Вони мають просту конструкцію, зручні у монтажі та забезпечують належну електричну міцність у нормальних умовах експлуатації [10, 12]. Підвісні ізолятори використовують у тих випадках, коли потрібна підвищена механічна міцність, наприклад на анкерних або кутових опорах.

Останніми роками значного поширення набули композитні ізолятори. Вони мають меншу масу, підвищену стійкість до забруднення атмосфери, добрі

механічні властивості та зручність у транспортуванні й монтажі. Композитні ізолятори доцільно застосовувати в районах із забрудненою атмосферою, оскільки вони характеризуються кращою роботою в складних умовах експлуатації [15–18]. Основною перевагою композитних ізоляторів є зменшення маси, покращення електричних і механічних характеристик, зручність монтажу та можливість застосування в забрудненій атмосфері.

Лінійна арматура забезпечує механічне з'єднання елементів повітряної лінії. До арматури належать: підтримувальні та натяжні затискачі; гаки; серги; скоби; траверси; сполучні елементи; захисна арматура. Правильний вибір арматури забезпечує рівномірний розподіл навантажень, надійне кріплення проводів, спрощення монтажу та зменшення ризику пошкоджень у процесі експлуатації. Особливе значення має арматура в місцях анкерування, на кутових опорах і в районах з інтенсивними вітровими або ожеледними навантаженнями [19, 20].

Таким чином, опори, ізолятори та лінійна арматура формують несучу та ізоляційну частину повітряної лінії. Від якості їх підбору, взаємного узгодження та відповідності умовам роботи залежить не лише надійність електропостачання, а й довговічність усієї лінії [19-21].

1.4 Обґрунтування напрямку дослідження та постановка задач роботи

Проведений аналіз показує, що повітряні лінії електропередачі середньої напруги залишаються основою розподільчих електричних мереж. Разом з тим значна частина таких ліній функціонує в умовах підвищених механічних та кліматичних впливів, а також під дією процесів старіння конструктивних елементів. Це призводить до зростання аварійності, збільшення витрат на технічне обслуговування та зниження ефективності функціонування електричних мереж [21].

Однією з основних проблем є необхідність забезпечення оптимального поєднання електричних, механічних та економічних параметрів повітряної лінії. Наприклад, вибір проводу лише за умовою допустимого струму не гарантує його механічної придатності в умовах вітру та ожеледі. Аналогічно, вибір типу опори

без належного врахування реальних навантажень може призвести до перевантаження конструкції. Отже, для досягнення необхідного рівня надійності потрібен комплексний підхід до аналізу конструкцій повітряних ліній та методів їх розрахунку [8, 20, 21].

На сучасному етапі розвитку електричних мереж особливої актуальності набуває: застосування нових типів проводів; використання композитних ізоляторів; вдосконалення конструкцій опор; використання СП; підвищення грозостійкості та експлуатаційної надійності; уточнення механічних та електричних методів розрахунку [14-18].

Існуючі конструктивні рішення слід аналізувати не лише крізь призму усталених підходів, а й з урахуванням сучасних вимог щодо безпеки, довговічності, енергоефективності та зручності експлуатації. З огляду на це, тема дослідження конструкцій і методів розрахунку повітряних ліній електропередачі середньої напруги є актуальною та має важливе практичне значення [2, 21].

У зв'язку з цим у даній роботі основна увага приділяється аналізу конструктивних елементів ПЛ середньої напруги та дослідженню методів їх розрахунку. Основними завданнями дослідження є:

- аналіз конструкцій проводів, опор, ізоляторів і лінійної арматури;
- визначення особливостей застосування сучасних конструктивних рішень у ПЛ середньої напруги;
- дослідження основних методів електричного та механічного розрахунку;
- аналіз чинників, що впливають на надійність та довговічність лінії;
- обґрунтування підходів до вибору раціональної конструкції повітряної лінії середньої напруги.

Результатом виконання роботи має стати узагальнення технічних підходів до побудови повітряних ліній середньої напруги та обґрунтування методів їх розрахунку, які забезпечують надійність, безпечність і ефективність експлуатації [20, 21].

Висновки до розділу 1

У результаті проведеного аналізу встановлено, що повітряні лінії електропередачі середньої напруги є важливою складовою розподільчих електричних мереж та забезпечують передавання електричної енергії до широкого кола споживачів. Їх конструкція включає проводи, опори, ізолятори, лінійну арматуру та допоміжні захисні елементи, кожен з яких суттєво впливає на надійність і довговічність лінії.

Показано, що вибір проводів повинен здійснюватися з урахуванням не лише електричних характеристик, але й механічної міцності, умов кліматичного навантаження та економічної доцільності. Найбільш поширеними для повітряних ліній середньої напруги є алюмінієві, сталевалюмінієві та самонесучі ізольовані проводи, використання яких визначається умовами експлуатації та конструктивними особливостями лінії.

Встановлено, що основними типами опор для ПЛ середньої напруги є залізобетонні та металеві конструкції, а вибір конкретного типу опори залежить від функціонального призначення, довжини прогонів та навантажень. Розглянуто також особливості застосування штирових, підвісних і композитних ізоляторів, а також роль лінійної арматури у забезпеченні механічної та експлуатаційної надійності повітряної лінії.

Проведений аналіз підтвердив актуальність дослідження конструкцій і методів розрахунку повітряних ліній електропередачі середньої напруги. Отримані результати є теоретичною основою для подальшого розгляду методів електричного та механічного розрахунку повітряних ліній у наступному розділі роботи.

РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ ОБ'ЄКТА ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ТЕХНІЧНИХ ВИМОГ ДО ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ СЕРЕДНЬОЇ НАПРУГИ

2.1 Об'єкт дослідження та структура повітряної лінії

Об'єктом дослідження у даній роботі є повітряна лінія електропередачі середньої напруги, призначена для передавання та розподілу електричної енергії між підстанціями, трансформаторними пунктами та кінцевими споживачами. Основу функціонування такої лінії становить передавання електричної енергії по фазних проводах, що закріплені на опорах за допомогою ізоляторів і лінійної арматури. Надійність функціонування повітряної лінії визначається технічним станом її конструктивних елементів, відповідністю параметрів умовам експлуатації, а також правильністю вибору методів розрахунку [1].

Повітряна лінія середньої напруги повинна забезпечувати безпечно та надійне передавання електричної енергії при дотриманні нормативних габаритів, допустимих електричних навантажень, механічної міцності елементів та стійкості до атмосферних впливів [2-5]. При цьому режим роботи лінії залежить від характеру навантаження споживачів, довжини траси, кліматичних умов, типу застосованих проводів і опор, а також від умов монтажу й технічного обслуговування [20, 21].

До складу типової повітряної лінії середньої напруги входять: проводи; опори; ізолятори; траверси; лінійна арматура; заземлювальні пристрої; засоби захисту від перенапруг [5, 19, 20]. Фазні проводи призначені для безпосереднього передавання електричної енергії. Вони можуть бути неізольованими або ізольованими залежно від прийнятої конструкції лінії. Опори забезпечують механічне утримання проводів на заданій висоті від землі, а ізолятори виконують функцію електричного відокремлення струмоведучих частин від заземлених конструкцій. Лінійна арматура забезпечує надійне кріплення і з'єднання конструктивних елементів. Від узгодженої роботи всіх цих частин залежить стійкість лінії до експлуатаційних навантажень [19, 20].

На рис. 2.1 наведено структурну схему повітряної лінії електропередачі середньої напруги.

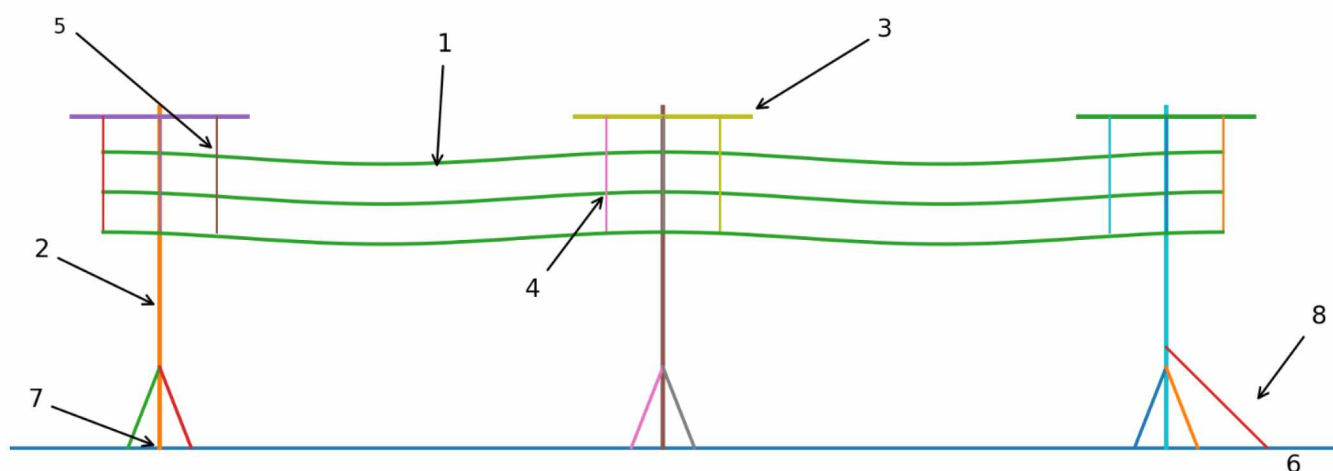


Рис. 2.1 – Структурна схема повітряної лінії середньої напруги:

1 – фазні проводи; 2 – опора; 3 – траверса; 4 – ізолятори; 5 – лінійна арматура; 6 – грозозахисний елемент або заземлювальний спуск; 7 – фундамент або закріплення опори в ґрунті; 8 – охоронна зона лінії.

На практиці повітряні лінії середньої напруги можуть мати різне конструктивне виконання залежно від класу напруги, характеру місцевості, протяжності траси, розрахункового навантаження та вимог до надійності електропостачання. Для мереж 6–10 кВ широко застосовуються залізобетонні опори зі штировими ізоляторами, тоді як для ліній 35 кВ частіше використовують більш потужні опори, підвісні ізолятори та посилені конструкції траверс [5, 10–13].

З точки зору функціонального призначення опори повітряної лінії поділяються на проміжні, анкерні, кутові, кінцеві, відгалужувальні та перехідні. Проміжні опори встановлюються на прямих ділянках траси і призначені переважно для підтримання проводів. Анкерні опори сприймають значні поздовжні навантаження і встановлюються на кінцях лінії, кутах повороту або для розподілу лінії на анкерні прогони. Кутові опори працюють у більш складних режимах, оскільки сприймають додаткові зусилля, пов'язані зі зміною напрямку траси [20, 21].

Для аналізу об'єкта дослідження важливо враховувати, що повітряна лінія середньої напруги є системою, у якій одночасно реалізуються електричні та механічні процеси. З одного боку, по проводах проходить електричний струм, що визначає втрати напруги, нагрівання та пропускну здатність лінії. З іншого боку, конструкція лінії зазнає впливу власної ваги, вітрових навантажень, ожеледі, температурних змін та механічних деформацій. Саме тому повітряна лінія повинна розглядатися як складний технічний об'єкт, для якого необхідне комплексне обґрунтування технічних вимог [8, 20, 21].

2.2 Технічні вимоги до повітряної лінії електропередачі

Повітряна лінія середньої напруги повинна забезпечувати надійне, безпечне та економічно доцільне передавання електроенергії в умовах тривалої експлуатації. Вона повинна бути розрахована на дію нормальних, аварійних і монтажних режимів, а також відповідати вимогам електричної міцності, механічної стійкості та довговічності [2-5, 20].

Основними технічними вимогами до повітряної лінії є: забезпечення необхідної пропускну здатності; допустимий рівень втрат напруги; механічна міцність проводів, опор та арматури; дотримання нормативних габаритів; стійкість до кліматичних впливів; безпечність експлуатації; ремонтпридатність; економічність будівництва та обслуговування [1, 2, 5].

Однією з найважливіших вимог є забезпечення необхідної пропускну здатності лінії [22]. Вона визначається розрахунковим струмом навантаження та обраним перерізом проводу. Переріз проводу повинен бути достатнім для тривалого пропускання струму без недопустимого перегрівання. При цьому необхідно враховувати не лише електричні параметри, а й механічну міцність проводу, особливо на ділянках із великими прольотами або підвищеними кліматичними навантаженнями [1, 7, 8].

Розрахунковий струм лінії визначають за виразом:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos\varphi}$$

де P – активна потужність навантаження, U – лінійна напруга мережі, $\cos\varphi$ – коефіцієнт потужності.

Крім забезпечення струмової навантажувальної здатності, провід повинен відповідати умовам механічної міцності. На провід діють власна вага, вітрове навантаження та навантаження від ожеледі. У разі недооцінки цих факторів можуть виникати надмірні стріли провисання, обриви проводів або перевантаження опор (рис. 2.2) [8, 20, 23].

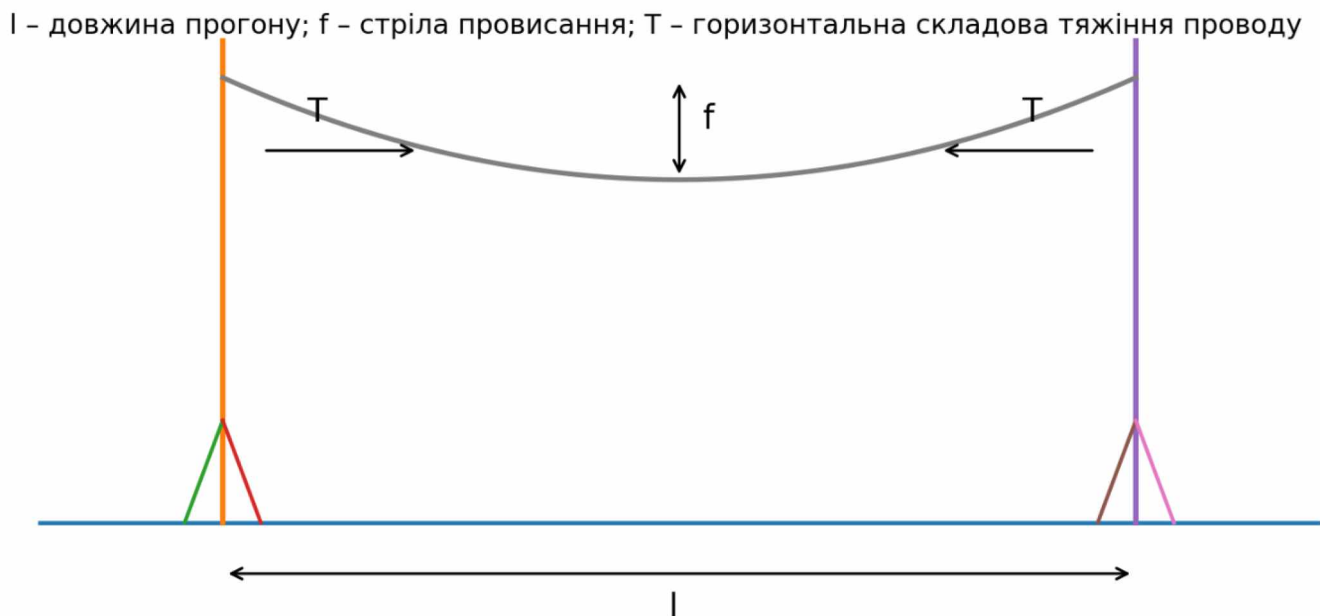


Рис. 2.2 – Схема провисання проводу в прогоні.

Одним із ключових параметрів механічного стану повітряної лінії є стріла провисання проводу. Для її наближеного визначення використовують вираз:

$$f = \frac{ql^2}{8T}$$

де f – стріла провисання, м; q – питоме навантаження на провід, Н/м; l – довжина прогону, м; T – горизонтальна складова тягіння, Н.

Ще однією важливою вимогою є дотримання нормативних габаритів. Проводи повітряної лінії повинні бути розташовані на безпечній висоті над землею, дорогами, будівлями, зеленими насадженнями та інженерними спорудами. Недотримання цих вимог створює загрозу ураження електричним струмом, виникнення коротких замикань або пошкодження лінії внаслідок дії сторонніх факторів [2-5]. В табл. 2.1 узагальнено основні технічні вимоги до повітряної лінії середньої напруги.

Таблиця 2.1 – Основні технічні вимоги до повітряної лінії середньої напруги

Параметр	Вимога	Практичне значення
Пропускна здатність	Забезпечення допустимого тривалого струму	Надійне передавання навантаження
Механічна міцність	Стійкість до власної ваги, вітру, ожеледі	Запобігання обривам і деформаціям
Ізоляційна міцність	Витримування робочої напруги та перенапруг	Надійність електроізоляції
Габарити	Дотримання нормативних відстаней	Безпека експлуатації
Довговічність	Стійкість до корозії та старіння	Зменшення експлуатаційних витрат
Ремонтопридатність	Зручність монтажу та обслуговування	Скорочення часу відновлення

Для ізоляторів і арматури важливою вимогою є забезпечення достатньої електричної міцності та механічної стійкості. Ізолятори повинні витримувати

робочу напругу, комутаційні та атмосферні перенапруги, а також механічні навантаження від маси проводів і дії вітру [14-15]. Для районів із забрудненою атмосферою необхідно враховувати також довжину шляху витоків та стійкість поверхні ізолятора до зволоження й забруднення [16-18].

На рис. 2.3 показано основні типи ізоляторів, що застосовуються на повітряних лініях середньої напруги. Їх вибір визначається класом напруги, механічним навантаженням, конструкцією опори та умовами навколишнього середовища [13-15].

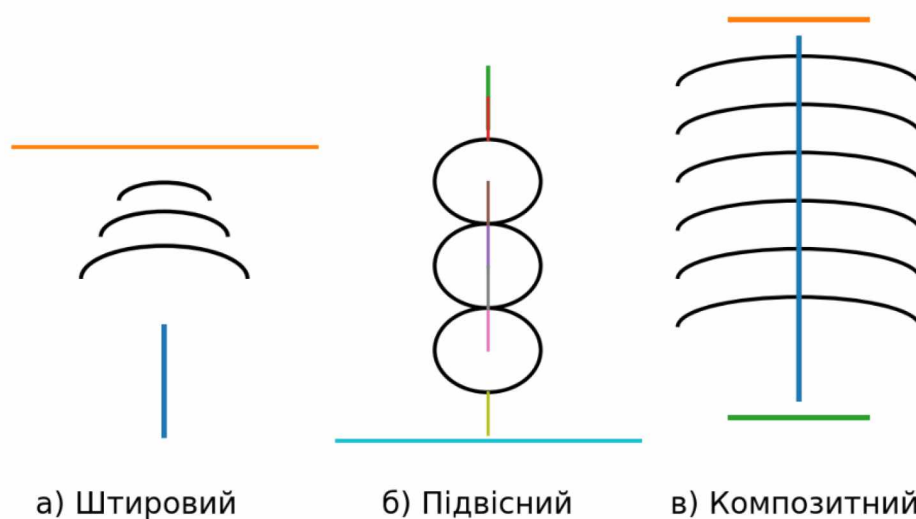


Рис. 2.3 – Основні типи ізоляторів для ПЛ середньої напруги

Окрему увагу необхідно приділяти безпеці експлуатації. Повітряна лінія повинна забезпечувати належний рівень електробезпеки для обслуговуючого персоналу та населення. Саме тому в сучасних мережах дедалі ширше застосовують композитні ізолятори, самонесучі ізольовані проводи та вдосконалені засоби захисту від перенапруг.

Технічні вимоги до повітряних ліній середньої напруги мають комплексний характер і охоплюють електричні, механічні, експлуатаційні та економічні аспекти [1, 20, 21].

2.3 Структура системи розрахунку та оцінювання параметрів повітряної лінії середньої напруги

Для забезпечення надійної роботи повітряної лінії середньої напруги необхідно виконувати комплексний розрахунок її параметрів. Такий розрахунок охоплює вибір проводу, перевірку механічної міцності, визначення стріли провисання, оцінювання навантажень на опори, вибір ізоляторів і перевірку нормативних габаритів. На відміну від окремого аналізу елементів конструкції, система розрахунку дозволяє розглядати повітряну лінію як єдиний об'єкт, у якому всі параметри взаємопов'язані [8, 20, 21].

До вихідних даних для розрахунку повітряної лінії належать: клас напруги; потужність і характер навантаження; довжина лінії; довжина прогонів; кліматичний район; тип місцевості; матеріал і конструкція проводу; тип опор; умови прокладання траси [1, 5, 20].

Першим етапом є вибір проводу за умовами допустимого струму та втрати напруги. Далі проводиться механічний розрахунок, у межах якого визначаються питомі навантаження, тяжіння в проводі та стріла провисання. Після цього виконується перевірка навантаження на опори, вибір ізоляторів за напругою і механічною міцністю, а також аналіз габаритів лінії [7, 8, 19, 20].

Розглянемо метод розрахунку конструкцій для проектування ПЛ, вибір площі поперечного перерізу жил проводів, розрахунок перерізу фазних жил проводів СПП, а також дослідимо блискавкозахист та механічні умови роботи конструкцій.

Електричний розрахунок повітряної лінії дає можливість: визначити допустиме навантаження; оцінити втрати потужності та напруги; обрати раціональний переріз проводу; забезпечити пропускну здатність лінії.

Механічний розрахунок дає змогу: перевірити міцність проводу; визначити стрілу провисання; оцінити навантаження на опору; забезпечити нормативні відстані до землі та інших об'єктів [20, 23].

На рис. 2.4 наведено структурну схему системи розрахунку повітряної лінії середньої напруги.

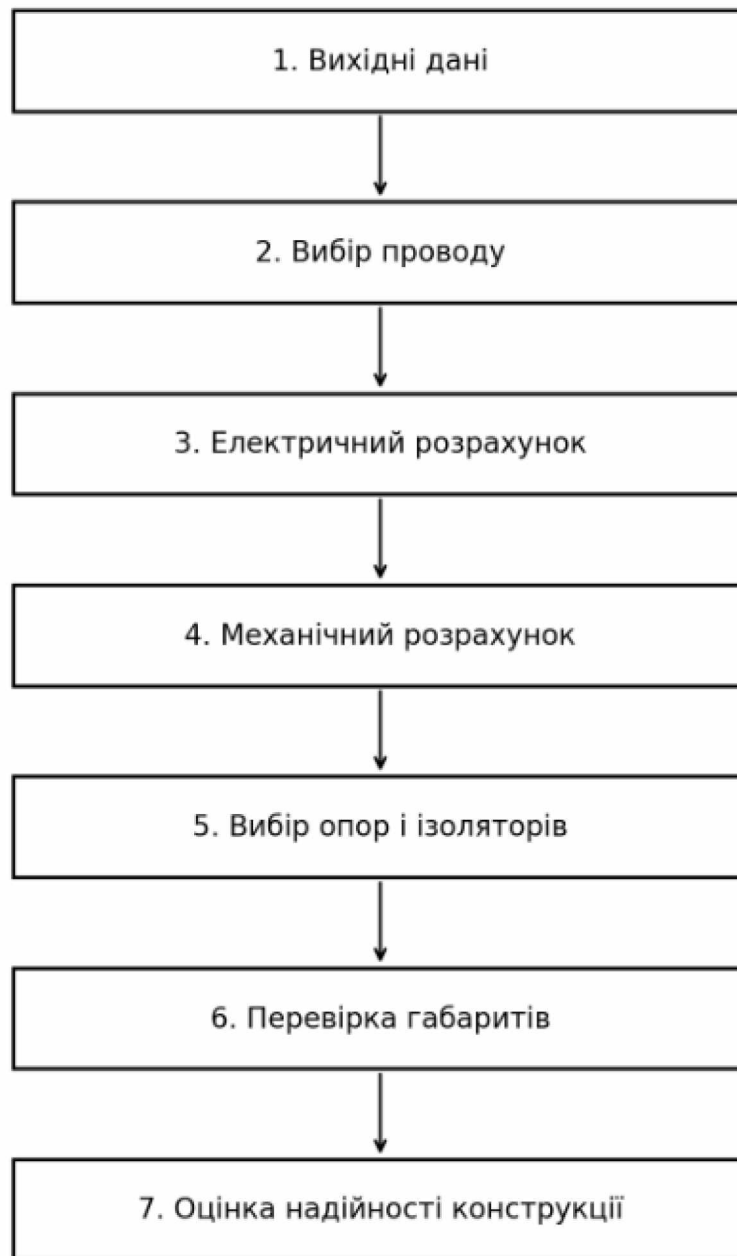


Рисунок 2.4 – Структура системи розрахунку повітряної лінії середньої напруги: 1 – вихідні дані; 2 – вибір проводу; 3 – електричний розрахунок; 4 – механічний розрахунок; 5 – вибір опор і ізоляторів; 6 – перевірка габаритів; 7 – оцінка надійності конструкції.

В табл. 2.2 здійснено порівняння окремих етапів розрахунку.

Таблиця 2.2 – Основні етапи розрахунку повітряної лінії середньої напруги

Етап розрахунку	Основна мета	Результат
-----------------	--------------	-----------

Вибір проводу	Забезпечення допустимого струму	Марка і переріз проводу
Електричний розрахунок	Визначення втрат та режимів роботи	Оцінка пропускну здатності
Механічний розрахунок	Перевірка міцності та стріли провисання	Умови роботи проводу
Вибір опори	Забезпечення стійкості конструкції	Тип і параметри опори
Вибір ізоляторів	Забезпечення електричної і механічної міцності	Тип і кількість ізоляторів
Перевірка габаритів	Дотримання норм безпеки	Підтвердження придатності конструкції

Суттєвою перевагою комплексного підходу до розрахунку є можливість оптимізувати конструкцію повітряної лінії. Наприклад, зміна марки проводу може впливати не лише на електричні втрати, а й на механічні навантаження, а отже – на вибір типу опори та ізоляції. Саме тому система розрахунку повинна розглядатися як послідовність взаємопов'язаних етапів, а не як набір окремих перевірок [8, 20, 21].

Узагальнені характеристики основних конструктивних елементів повітряної лінії середньої напруги наведено в таблиці 2.3. Порівняння різних варіантів виконання лінії дає змогу обґрунтувати раціональний вибір конструкції залежно від умов експлуатації [5, 21, 24].

Розрахунок повітряної лінії середньої напруги має проводитися комплексно, з урахуванням взаємного впливу електричних, механічних та експлуатаційних параметрів. Такий підхід дозволяє підвищити надійність роботи лінії, забезпечити безпечність її експлуатації та обґрунтувати вибір конструктивного рішення [20-22, 25].

Таблиця 2.3 – Порівняльна характеристика основних конструктивних елементів ПЛ середньої напруги

Елемент	Варіант 1	Варіант 2	Основна перевага
Проводи	алюмінієві	сталеалюмінієві	вища механічна міцність АС
Опори	залізобетонні	металеві	нижча вартість ЗБ опор
Ізолятори	штирові	композитні	менша маса композитних
Конструкція лінії	неізольована	із СП	вища безпека СП

Висновки до розділу 2

У розділі проведено аналіз об'єкта дослідження – повітряної лінії електропередачі середньої напруги – та визначено основні технічні вимоги до її конструкції й параметрів. Розглянуто структуру повітряної лінії, принцип її побудови та основні елементи, що забезпечують передавання електричної енергії в розподільчих мережах.

Встановлено, що ефективність і надійність роботи повітряної лінії значною мірою залежать від правильного вибору проводів, опор, ізоляторів та арматури, а також від урахування електричних, механічних і кліматичних навантажень. Показано, що при проєктуванні повітряних ліній недостатньо враховувати лише струмове навантаження, оскільки механічна міцність і нормативні габарити мають не менш важливе значення.

Обґрунтовано необхідність комплексного підходу до розрахунку повітряної лінії середньої напруги, який включає електричний розрахунок, механічний розрахунок, вибір опор та ізоляторів, а також перевірку габаритів і експлуатаційної придатності конструкції. Отримані результати є основою для подальшого виконання розрахункової частини роботи та обґрунтування технічних рішень у наступних розділах.

РОЗДІЛ 3 ТЕХНІКО-АНАЛІТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ КОНСТРУКТИВНИХ РІШЕНЬ І МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ ПОВІТРЯНОЇ ЛІНІЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ СЕРЕДНЬОЇ НАПРУГИ

3.1 Вибір основних параметрів повітряної лінії та конструктивних елементів

Одним із головних етапів проєктування повітряної лінії електропередачі середньої напруги є визначення її основних технічних параметрів і вибір конструктивних елементів. Правильний вибір проводів, опор, ізоляторів та арматури забезпечує надійну роботу лінії, допустимий рівень втрат електроенергії, механічну стійкість конструкції та безпечність експлуатації [1, 5, 20].

При проєктуванні повітряної лінії середньої напруги вихідними даними є:

- номінальна напруга лінії;
- довжина траси;
- розрахункове навантаження;
- коефіцієнт потужності;
- кліматичний район;
- тип місцевості;
- розрахункова довжина прогонів;
- вимоги до надійності та безпеки [1, 20].

Для подальшого аналізу приймемо такі вихідні дані:

- номінальна напруга лінії $U_n=10$ кВ;
- довжина лінії $L=2,8$ км;
- розрахункова повна потужність навантаження $S=1600$ кВА;
- коефіцієнт потужності $\cos\varphi=0,9$;
- середня довжина прогону $l=70$ м;
- район помірних кліматичних навантажень.

Розрахунковий струм лінії визначається за формулою:

$$I = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U}$$

де S – повна потужність навантаження, кВА; U – лінійна напруга, кВ.

Підставляючи значення, одержимо: $I \approx 92,4$ А

Отже, повітряна лінія повинна забезпечувати тривале передавання струму не менше 92,4 А без недопустимого нагрівання проводу.

Для такого струму в мережах середньої напруги доцільно застосувати сталевалюмінієвий провід типу АС, оскільки він поєднує достатню електропровідність і високу механічну міцність [7-9]. Сталевалюмінієві проводи визначено як найбільш придатні для повітряних ліній завдяки сталевому осерддю, яке сприймає механічне навантаження, та алюмінієвому зовнішньому шару, що забезпечує провідність.

Тому, на основі аналізу, використовуємо в роботі провід марки АС-50/8, який широко використовується на лініях 10 кВ. Його вибір обґрунтовується такими чинниками:

- достатньою пропускну здатністю;
- прийнятною механічною міцністю;
- широким поширенням у розподільчих мережах;
- придатністю до експлуатації в умовах відкритої місцевості [8, 20].

Для опор доцільно прийняти залізобетонні конструкції, оскільки вони є найбільш поширеними в мережах середньої напруги та характеризуються довговічністю, відносно невисокою вартістю та простотою обслуговування. На прямих ділянках траси застосовуються проміжні опори, а на кутах повороту, кінцях лінії та в місцях розподілу анкерних прогонів – анкерні та кутові опори [20].

Для ізоляції фазних проводів на лінії 10 кВ доцільно використати штирові або композитні ізолятори. Штирові ізолятори є традиційним рішенням для цього класу напруги, однак композитні ізолятори мають меншу масу, кращу стійкість до забруднення та зручніші в монтажі. Тому в сучасних умовах використання композитних ізоляторів є більш перспективним [10-15].

Основні прийняті параметри повітряної лінії наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Прийняті параметри повітряної лінії середньої напруги

Параметр	Значення
Номінальна напруга	10 кВ
Довжина лінії	2,8 км
Розрахункова потужність	1600 кВА
Розрахунковий струм	92,4 А
Довжина прогону	70 м
Тип проводу	АС-50/8
Тип опор	залізобетонні
Тип ізоляторів	штирові або композитні

На основі вихідних даних обрано основні конструктивні елементи повітряної лінії середньої напруги, які забезпечують необхідні електричні та механічні характеристики лінії [1, 20, 21].

3.2 Обґрунтування вибору конструкції повітряної лінії середньої напруги

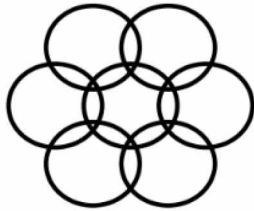
Після визначення основних параметрів лінії необхідно обґрунтувати вибір її конструктивного виконання. Для цього слід враховувати не лише допустимий струм навантаження, але й умови навколишнього середовища, довжину прогонів, характер траси, механічні навантаження та експлуатаційні вимоги [20, 21].

Для повітряної лінії середньої напруги найважливішими елементами конструкції є: проводи; опори; ізолятори; траверси; арматура; заземлювальні та захисні елементи [5, 19, 20].

Вибір проводу АС-50/8 пояснюється тим, що сталевалюмінієві проводи мають достатню міцність на розрив та одночасно забезпечують належну провідність. Це особливо важливо для ліній, які працюють в умовах вітрових навантажень та можливого утворення ожеледі. У порівнянні з алюмінієвими

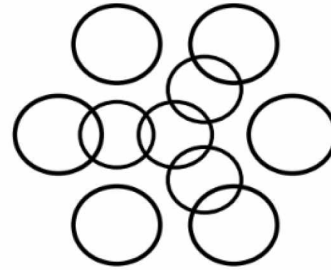
проводами сталеалюмінієві мають кращі механічні властивості, що дозволяє застосовувати їх на більших прогонах [7-9, 20].

На рисунку 3.1 подано порівняльну схему основних варіантів проводів для ПЛ середньої напруги.



а) Алюмінієвий провід

однорідна багатодротяна конструкція



б) Сталеалюмінієвий провід

сталеве осердя + зовнішній алюмінієвий шар

Рисунок 3.1 – Порівняння конструкції алюмінієвого та сталеалюмінієвого проводів

Перевагою залізобетонних опор є їхня довговічність, стійкість до корозії та відносно невеликі витрати на експлуатацію. Для лінії 10 кВ на прямих ділянках доцільно використовувати проміжні опори, а на кутах повороту – кутові або анкерні. Таке рішення дає змогу раціонально розподілити механічні навантаження й забезпечити стійкість конструкції [20, 21].

Композитні ізолятори доцільно розглядати як сучасну альтернативу порцеляновим або скляним. Вони краще працюють у забрудненій атмосфері, мають меншу масу та підвищену механічну стійкість. Це особливо важливо для розподільчих мереж, де простота монтажу та зниження навантаження на траверси є важливими факторами [14-18].

На практиці вибір конструкції повітряної лінії завжди є компромісом між вартістю, надійністю, технологічністю монтажу та експлуатаційними перевагами. Саме тому обґрунтування конструктивного рішення повинно спиратися на поєднання технічних і економічних чинників [20-22].

Для прийнятих умов найбільш доцільною є конструкція повітряної лінії 10 кВ із застосуванням сталевалюмінієвого проводу, залізобетонних опор та сучасних ізоляційних елементів [7, 14].

Для узагальнення порівняння конструктивних рішень наведено таблицю 3.2.

Таблиця 3.2 – Порівняльна характеристика конструктивних рішень для ПЛ середньої напруги

Елемент	Варіант 1	Варіант 2	Доцільність вибору
Провід	Алюмінієвий	Сталевалюмінієвий	вища механічна міцність АС
Опора	Залізобетонна	Металева	нижча вартість і простота обслуговування ЗБ
Ізолятор	Штировий	Композитний	менша маса та краща стійкість композитного
Конструкція лінії	Неізольована	Із СП	СП доцільний для підвищення безпеки

3.3 Розрахунок механічних характеристик проводу та навантажень на конструкцію

Одним із найважливіших етапів техніко-аналітичного обґрунтування повітряної лінії є механічний розрахунок проводу. Він дозволяє оцінити стрілу провисання, натяг проводу, а також механічні навантаження, що передаються на опори [8, 23].

Для сталевалюмінієвого проводу АС-50/8 прийmemo:

- довжину прогону $l=70$ м;
- питоме навантаження від власної ваги $q=12$ Н/м;
- горизонтальну складову тяжіння $T=2200$ Н.

Стріла провисання визначається за формулою:

$$f = \frac{gl^2}{8 \cdot T}$$

Підставимо значення: $f \approx 3,34$ м

Отже, стріла провисання проводу в прийнятому прогоні становить приблизно 3,34 м.

На рисунку 3.2 представлено залежність стріли провисання від довжини прогону.

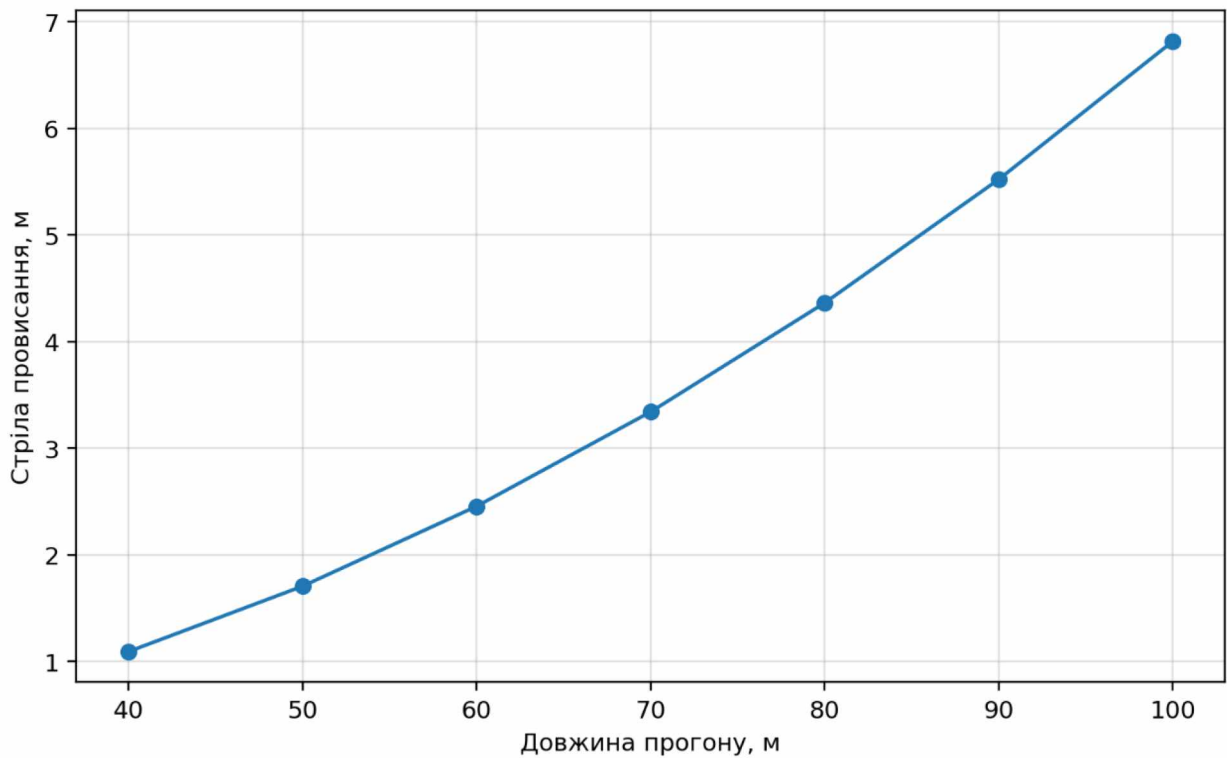


Рисунок 3.2 – Залежність стріли провисання проводу від довжини прогону

З аналізу механічної роботи проводу випливає, що зі збільшенням довжини прогону стріла провисання зростає непропорційно, а отже при великих прогонах необхідно або збільшувати натяг проводу, або змінювати тип проводу чи конструкцію опор [20, 23].

Крім власної ваги, на провід діють додаткові навантаження від вітру та ожеледі. У такому разі повне питоме навантаження можна подати як результуючу вертикальної та горизонтальної складових. Це навантаження передається на ізолятори, траверси та опори, що зумовлює необхідність перевірки їх механічної міцності.

Для приблизної оцінки механічного навантаження на опору можна врахувати сумарну силу від трьох фазних проводів:

$$F \approx 3 \cdot q \cdot l$$

Підставимо значення: $F=2520$ Н

Отже, лише від власної ваги проводів на опору передається навантаження близько 2,52 кН без урахування ожеледі, вітру та маси арматури [8, 20].

В табл. 3.3 представлені результати узагальнення механічних параметрів.

Таблиця 3.3 – Результати механічного розрахунку проводу

Параметр	Значення
Тип проводу	АС-50/8
Довжина прогону	70 м
Питоме навантаження	12 Н/м
Горизонтальна складова тяжіння	2200 Н
Стріла провисання	3,34 м
Орієнтовне навантаження на опору	2,52 кН

Як видно з розрахунку, обраний провід забезпечує прийнятні механічні характеристики для повітряної лінії середньої напруги. Разом з тим під час реального проєктування необхідно враховувати конкретний кліматичний район та розрахункові режими з урахуванням ожеледі та вітрового тиску [8, 20, 23].

3.4 Аналіз експлуатаційної надійності та оцінка ефективності прийнятого рішення

Надійність повітряної лінії електропередачі середньої напруги визначається не лише правильністю електричного й механічного розрахунку, але й придатністю конструкції до тривалої експлуатації. У процесі роботи лінія зазнає дії багатьох чинників, серед яких найбільш вагомими є: вітрові навантаження; ожеледь; температурні коливання; забруднення ізоляції; старіння матеріалів; механічні пошкодження; атмосферні перенапруги [15-18, 20-22].

Застосування сталевалюмінієвого проводу забезпечує достатню міцність на розрив та стійкість до механічних навантажень. Використання залізобетонних опор сприяє підвищенню довговічності лінії й зменшує витрати на антикорозійний захист. Сучасні композитні ізолятори дозволяють підвищити стійкість до забруднення та зменшити масу ізоляційних конструкцій [14-18].

На рис. 3.3 наведено основні чинники, що впливають на надійність ПЛ середньої напруги.

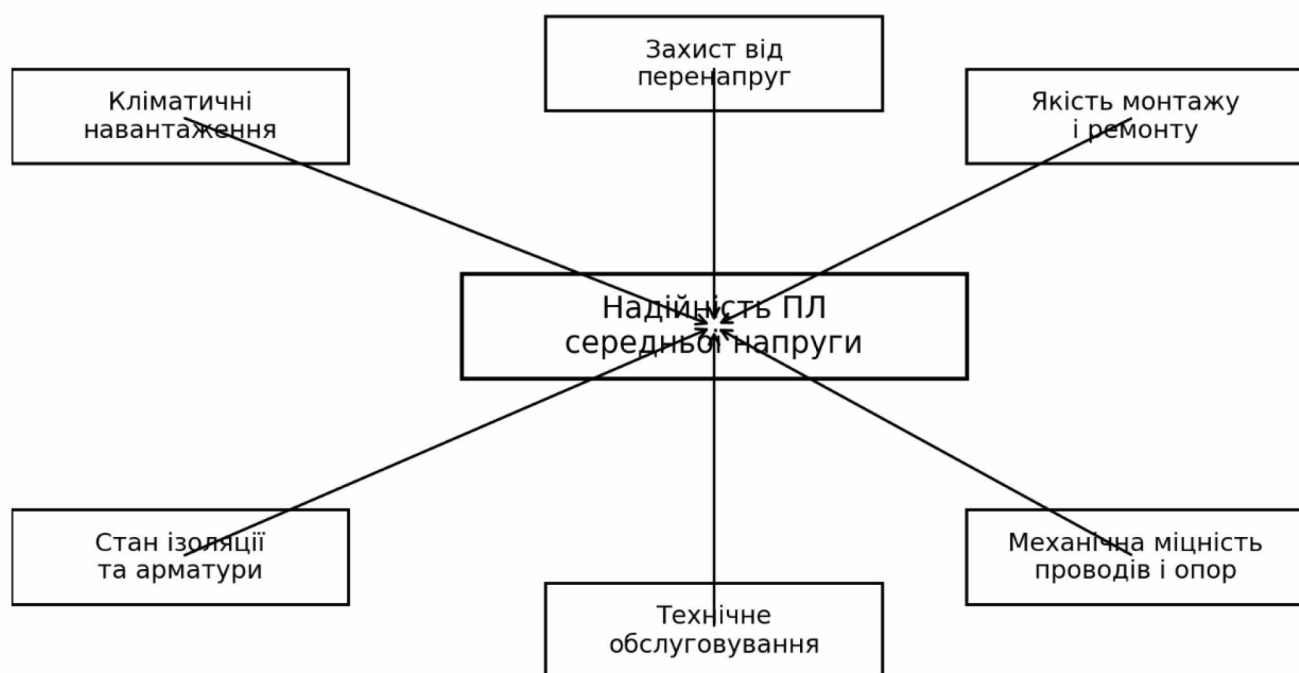


Рисунок 3.3 – Основні чинники, що впливають на надійність повітряної лінії середньої напруги

Експлуатаційна ефективність прийнятого рішення полягає в такому:

- зниження ймовірності аварій через механічні перевантаження;
- покращення стійкості конструкції до кліматичних впливів;
- зменшення витрат на обслуговування;
- підвищення довговічності основних елементів;
- спрощення монтажу та ремонту.

У сучасних умовах особливе значення має також можливість модернізації лінії. Наприклад, у разі необхідності підвищення рівня безпеки на окремих ділянках може бути доцільним перехід до самонесучих ізольованих проводів. Таким чином, СІП дозволяють зменшити аварійність, підвищити механічну міцність лінії та поліпшити умови експлуатації [5, 25, 26].

Проведений техніко-аналітичний аналіз підтверджує, що прийнята конструкція повітряної лінії середньої напруги відповідає основним вимогам надійності, механічної міцності та експлуатаційної придатності [20-22].

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

У розділі проведено техніко-аналітичне обґрунтування конструктивних рішень для повітряної лінії електропередачі середньої напруги. На основі заданих параметрів роботи лінії визначено розрахункове навантаження та обрано основні елементи конструкції: провід, опори та ізолятори.

За результатами аналізу прийнято сталеалюмінієвий провід АС-50/8, залізобетонні опори та сучасні ізоляційні елементи, що забезпечують необхідні електричні та механічні характеристики. Проведений вибір підтвердив доцільність застосування саме такої конструкції для повітряної лінії 10 кВ.

Виконано механічний розрахунок проводу, у результаті якого визначено стрілу провисання та орієнтовні навантаження на опори. Встановлено, що прийнята конструкція забезпечує допустимі параметри роботи в нормальному режимі та може бути використана як основа для подальшого детального розрахунку.

Проаналізовано чинники, що впливають на експлуатаційну надійність лінії. Показано, що застосування сучасних конструктивних рішень дозволяє підвищити довговічність, знизити аварійність та покращити умови експлуатації повітряної лінії середньої напруги.

Таким чином, результати розділу є основою для подальшого виконання розрахункової частини бакалаврської роботи та детального визначення параметрів повітряної лінії електропередачі середньої напруги.

РОЗДІЛ 4. РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА ПОВІТРЯНОЇ ЛІНІЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ СЕРЕДНЬОЇ НАПРУГИ

4.1 Вихідні дані для розрахунку повітряної лінії

Розрахунок основних параметрів повітряної лінії електропередачі середньої напруги спрямований на обґрунтування вибору проводу, оцінювання механічного стану прогону, перевірку стріли провисання та визначення навантаження на опори. Для забезпечення послідовності інженерного аналізу приймаються типові вихідні дані (табл. 4.1), характерні для розподільчої мережі 10 кВ [1, 20, 25].

Таблиця 4.1 – Вихідні дані для розрахунку розподільчої мережі 10кВ

Параметр	Позначення	Значення
Номінальна напруга лінії	U_n	10 кВ
Повна потужність навантаження	S	1600 кВА
Коефіцієнт потужності	$\cos \varphi$	0,90
Довжина лінії	L	2,8 км
Середня довжина прогону	l	70 м
Тип проводу	—	АС-50/8
Район експлуатації	—	помірні кліматичні навантаження

Прийняті вихідні дані відповідають типовим умовам роботи повітряних ліній розподільчих мереж та дають змогу виконати подальший електричний і механічний розрахунок [1, 5, 20].

4.2 Розрахунок струму навантаження та перевірка вибору проводу

Розрахунковий струм трифазної повітряної лінії визначається за повною потужністю навантаження. Цей параметр використовується для перевірки пропускної здатності проводу та оцінювання допустимого режиму його нагрівання [1, 25]:

$$I = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U}$$

де I – розрахунковий струм лінії, А; S – повна потужність навантаження, кВА; U – лінійна напруга, кВ.

Підставляючи прийняті значення, одержимо: $I = 92,4$ А

Отже, повітряна лінія повинна забезпечувати тривале передавання струму не менше 92,4 А. Для таких умов доцільно застосувати сталевалюмінієвий провід марки АС-50/8. Його вибір зумовлений достатньою пропускною здатністю, прийнятною механічною міцністю та широким використанням у мережах 10 кВ [7-9, 20].

Для додаткової оцінки допустимості обраного рішення можна виконати перевірку втрати напруги на лінії. У спрощеному вигляді падіння напруги визначають за виразом [1, 24]:

$$\Delta U = \sqrt{3} \cdot I \cdot (R \cdot \cos\varphi + X \cdot \sin\varphi)$$

Для орієнтовного розрахунку приймаємо активний опір лінії $R = 1,78$ Ом, індуктивний опір $X = 1,12$ Ом.

При $\sin \varphi = 0,436$ отримуємо: $\Delta U \approx 335$ В. Відносна втрата напруги становить: $\Delta U\% = 3,35\%$.

Отримане значення не перевищує допустимий рівень для розподільчих мереж, тому обраний провід АС-50/8 можна вважати придатним для подальших розрахунків [20, 24].

4.3 Розрахунок стріли провисання та механічних навантажень

Механічний розрахунок повітряної лінії дає змогу оцінити роботу проводу в прогоні, перевірити стрілу провисання та визначити навантаження, що передаються на опори [8, 20, 23]. Для наближеного розрахунку стріли провисання використовується залежність:

$$f = \frac{ql^2}{8 \cdot T}$$

де f – стріла провисання, м; q – питома навантаження на провід, Н/м; l – довжина прогону, м; T – горизонтальна складова тяжіння проводу, Н.

Для обраного проводу приймаємо питома навантаження від власної ваги $q = 12$ Н/м, а горизонтальну складову тяжіння $T = 2200$ Н. Тоді: $f = 3,34$ м.

Отже, розрахункова стріла провисання проводу становить 3,34 м. Розрахункова схема прогону повітряної лінії подана на рисунку 4.1.

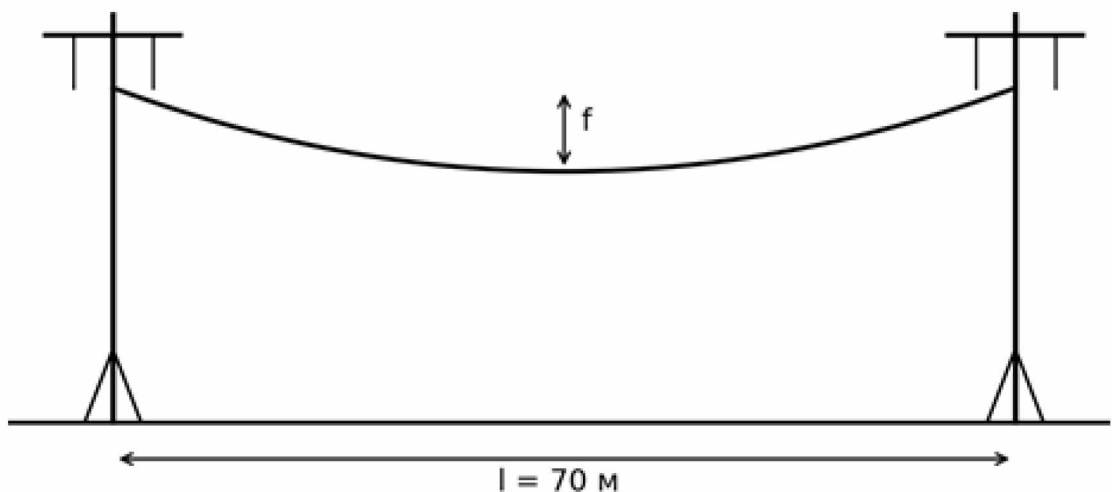


Рисунок 4.1 – Розрахункова схема прогону повітряної лінії

Крім власної ваги, на провід можуть діяти вітрове навантаження та навантаження від ожеледі. Складові навантаження на провід зручно розглядати

як векторні компоненти – вертикальну, горизонтальну та результуючу. Така схема подана на рисунку 4.2 [8, 20, 23].

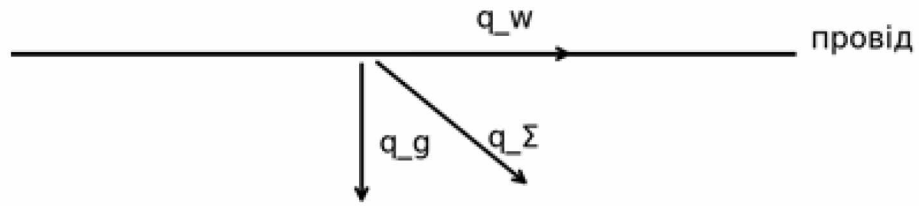


Рисунок 4.2 – Складові навантаження на провід

За відсутності ожеледі орієнтовне навантаження від трьох фазних проводів на опору від власної ваги становить: $F = 2,52$ кН

Таким чином, навіть без урахування вітру та ожеледі на опорі передається навантаження 2,52 кН, що підтверджує необхідність застосування міцних залізобетонних конструкцій та належного запасу механічної стійкості (табл. 4.2) [20, 21, 23].

Таблиця 4.2 – Параметри навантаження на опорі

Параметр	Позначення	Значення
Питоме навантаження проводу	q	12 Н/м
Довжина прогону	l	70 м
Горизонтальна складова тягіння	T	2200 Н
Стріла провисання	f	3,34 м
Навантаження від трьох фаз на опорі	F	2,52 кН

4.4 Перевірка габаритів і оцінка придатності прийнятого конструктивного рішення

Однією з обов'язкових вимог до повітряної лінії є забезпечення нормативних габаритів над поверхнею землі, дорогами, спорудами та іншими перешкодами [2-5]. Для перевірки приймаємо, що висота точки кріплення проводу на опорі становить 8,0 м.

Мінімальна висота проводу в середині прогону дорівнює:

$$h_{\text{мін}} = h_{\text{кр}} - f = 8,0 - 3,34 = 4,66 \text{ м}$$

Отримане значення необхідно співвіднести з нормативними вимогами для конкретної місцевості. Для типової ненаселеної або технологічної ділянки така висота є прийнятною, однак у разі перетину автомобільних доріг, проходження через населену територію або зон із підвищеними вимогами безпеки висоту кріплення проводу слід збільшити [2-5, 20]. В таблиці 4.3 наведено результати розрахунку.

Таблиця 4.3 – Результати розрахунку

Показник	Результат	Оцінка
Розрахунковий струм лінії	92,4 А	відповідає вибраному проводу
Втрата напруги	3,35 %	у допустимих межах
Стріла провисання	3,34 м	прийнятно для прогону 70 м
Мінімальна висота проводу	4,66 м	потребує зіставлення з місцевими нормами
Навантаження на опору	2,52 кН	потребує врахування запасу міцності

Проведені розрахунки підтверджують, що прийнята конструкція повітряної лінії забезпечує допустимі електричні та механічні показники. Разом з тим остаточне проєктне рішення повинно враховувати конкретний кліматичний район, категорію місцевості, тип опори, схему розташування проводів та реальні вимоги нормативних документів [5, 20-23, 25].

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4

У розділі виконано приклад розрахунку основних параметрів повітряної лінії електропередачі середньої напруги. На підставі вихідних даних визначено розрахунковий струм навантаження, виконано перевірку вибору проводу АС-50/8 та оцінено втрату напруги на лінії.

Проведено механічний розрахунок прогону, у результаті якого визначено стрілу провисання проводу та навантаження на опори. Встановлено, що при довжині прогону 70 м і прийнятих параметрах проводу стріла провисання становить 3,34 м, а орієнтовне навантаження від трьох фазних проводів на опорі дорівнює 2,52 кН.

Виконано перевірку мінімальної висоти проводу в середині прогону та встановлено, що одержані результати є прийнятними для типових умов експлуатації, але під час остаточного проєктування повинні уточнюватися відповідно до конкретних нормативних вимог і характеристик місцевості.

Отже, проведений розрахунок підтверджує технічну придатність обраного конструктивного рішення та може бути використаний як основа для подальшого детального проєктування повітряної лінії електропередачі середньої напруги.

РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ, ЕКОЛОГІЧНА ТА ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ПРОЕКТНОГО РІШЕННЯ

5.1 Заходи з охорони праці під час експлуатації повітряної лінії електропередачі середньої напруги

Безпечна експлуатація повітряних ліній електропередачі середньої напруги є одним із найважливіших аспектів організації робіт в електроенергетиці. Під час монтажу, технічного обслуговування, ремонту та експлуатації повітряних ліній персонал може зазнавати впливу небезпечних і шкідливих виробничих факторів, серед яких найбільш суттєвими є дія електричного струму, можливість падіння з висоти, механічні ушкодження, несприятливі метеорологічні умови та робота поблизу діючих електроустановок [2-4, 25].

Повітряні лінії середньої напруги експлуатуються на відкритому повітрі, тому на умови праці суттєво впливають вітер, дощ, сніг, ожеледь, підвищена вологість, грозові явища та сезонні зміни температури. У зв'язку з цим особлива увага має приділятися дотриманню правил електробезпеки, використанню засобів індивідуального захисту, організації безпечного виконання робіт на висоті та забезпеченню належного технічного стану лінії [2-4].

Потенційно небезпечні фактори

У процесі експлуатації повітряних ліній електропередачі середньої напруги можуть виникати такі небезпечні ситуації: ураження персоналу електричним струмом у разі наближення до струмоведучих частин на недопустимому відстань; поява напруги кроку або дотику при пошкодженні ізоляції чи падінні проводу на землю; короткі замикання, що супроводжуються електричною дугою; обрив проводів або руйнування елементів опори; падіння працівника з висоти під час обслуговування опор; травмування інструментом, елементами арматури або частинами конструкції; небезпека виконання робіт у складних погодних умовах [2-4].

Особливо небезпечними є аварійні режими, пов'язані з пошкодженням проводів, руйнуванням ізоляторів, ослабленням натягу в проводах,

перевантаженням конструкцій через ожеледь чи вітер, а також виникненням перенапруг під час грози [2, 3, 20].

Технічні заходи безпеки

Для запобігання нещасним випадкам і аварійним ситуаціям застосовують комплекс технічних заходів: захисне заземлення металевих елементів конструкції, що можуть опинитися під напругою; встановлення розрядників або обмежувачів перенапруг; забезпечення нормативних відстаней від проводів до землі, будівель, дерев і споруд; використання справних ізоляторів, затискачів, траверс і лінійної арматури; своєчасна заміна пошкоджених проводів, ізоляторів та елементів кріплення; влаштування попереджувальних знаків і позначення охоронної зони лінії; виконання періодичних оглядів стану опор, фундаментів, заземлювальних спусків і вузлів кріплення [2-5, 19, 25]. Під час технічного обслуговування особливе значення мають вимірювання опору заземлювальних пристроїв, перевірка цілісності проводів, контроль стану ізоляції та огляд місць з'єднання й анкерування [3, 4, 25].

Організаційні заходи

До організаційних заходів охорони праці належать: допуск до робіт лише працівників, які мають відповідну кваліфікацію та групу з електробезпеки; проведення вступного, первинного, повторного та позапланового інструктажу; оформлення наряду-допуску на роботи в діючих електроустановках; відключення лінії, перевірка відсутності напруги та накладання переносних заземлень перед початком ремонтних робіт; чітке розмежування відповідальності між членами бригади; огороження місця виконання робіт і вивішування заборонних та попереджувальних плакатів; заборона виконання робіт на висоті під час грози, сильного вітру, ожеледиці чи зливи [2-4]. Під час виконання робіт на опорах необхідно застосовувати страхувальні пояси, канати, кігті або лази, а також перевірений справний інструмент [3, 4].

Засоби індивідуального захисту

Під час обслуговування повітряної лінії персонал повинен використовувати: діелектричні рукавиці; діелектричне взуття; захисну каску;

запобіжний пояс; інструмент з ізольованими ручками; сигнальний жилет; захисні окуляри за потреби [3, 4].

На рис. 5.1 представлено структуру заходів охорони праці під час експлуатації повітряної лінії середньої напруги.



Рисунок 5.1 – Структура заходів охорони праці під час експлуатації повітряної лінії середньої напруги

На рис. 5.1 відображено основні напрями забезпечення безпечної експлуатації ПЛ: електробезпеку, механічну безпеку, роботи на висоті, організаційні заходи, засоби індивідуального захисту та технічне обслуговування [2-4, 25].

Дотримання комплексу технічних і організаційних заходів охорони праці дозволяє забезпечити безпечну експлуатацію повітряних ліній середньої напруги, зменшити ризик виробничого травматизму та підвищити надійність роботи електромережі [2-4, 21].

5.2 Екологічна оцінка проєктного рішення

У сучасних умовах оцінка впливу технічних рішень на довкілля є важливою складовою проєктування електроенергетичних об'єктів. Повітряні

лінії електропередачі середньої напруги, хоча й не створюють прямих викидів забруднювальних речовин під час нормальної експлуатації, все ж впливають на навколишнє середовище на етапах будівництва, експлуатації та ремонту [21, 25].

До основних екологічних аспектів експлуатації повітряної лінії належать: вплив на земельні ресурси в межах траси та охоронної зони; необхідність розчищення просік у зелених насадженнях; шумовий ефект за несприятливих погодних умов; вплив електромагнітного поля; використання матеріалів, що потребують періодичної заміни; ризик аварійних ситуацій, пов'язаних з обривом проводів або руйнуванням конструкцій [21, 25].

Разом з тим запропоноване в роботі технічне рішення, яке передбачає використання сучасних конструктивних елементів, дає змогу зменшити негативний вплив на довкілля. Зокрема, застосування сталевалюмінієвих проводів із достатньою механічною міцністю знижує ризик обривів [7-9]. Використання композитних ізоляторів дозволяє зменшити масу конструкції та покращити експлуатаційні характеристики в умовах забруднення атмосфери. Рациональний вибір опор і конструктивних рішень дає можливість знизити частоту ремонтних втручань і скоротити обсяги матеріалів, що витрачаються під час експлуатації [20, 21].

До основних екологічних переваг удосконалення конструкції повітряної лінії належать:

- підвищення надійності електропостачання;
- зменшення імовірності аварійних відключень;
- скорочення обсягів аварійно-відновлювальних робіт;
- зменшення потреби у частій заміні елементів конструкції;
- підвищення довговічності лінії;
- зменшення ризику пожежонебезпечних ситуацій [22, 25].

У разі застосування самонесучих ізольованих проводів на окремих ділянках додатково досягаються такі екологічні переваги:

- зниження ризику замикань через торкання гілок дерев;
- зменшення потреби в частому розчищенні траси;
- підвищення безпеки в межах населених пунктів;

- зниження аварійності в складних погодних умовах [5, 21, 26].

Важливим чинником екологічної доцільності є також збільшення терміну служби елементів лінії. Чим довше працюють проводи, опори та ізолятори без заміни, тим меншими є матеріальні витрати на їх виготовлення, транспортування та монтаж, а отже – нижчим є непрямий вплив на довкілля [21, 22].

Запропоноване проєктне рішення щодо вибору конструктивних елементів повітряної лінії середньої напруги є екологічно доцільним, оскільки сприяє підвищенню надійності мережі, зменшенню аварійності та скороченню експлуатаційних втручань, що в підсумку знижує негативний вплив на навколишнє середовище [21, 22, 26].

5.3 Економічна ефективність проєктного рішення

Економічна ефективність проєктного рішення визначається співвідношенням між витратами на реалізацію конструкції повітряної лінії та техніко-економічними перевагами, які досягаються в процесі експлуатації. У даній роботі економічне обґрунтування полягає в оцінюванні доцільності застосування обраної конструкції повітряної лінії середньої напруги з урахуванням її надійності, довговічності та зменшення витрат на обслуговування [21, 24].

Для оцінки економічної ефективності приймемо, що у порівнянні з умовною базовою конструкцією лінії застосування більш надійних елементів дозволяє зменшити середньорічні витрати на ремонт і технічне обслуговування. Основний економічний ефект досягається за рахунок: скорочення аварійних відключень; зменшення кількості ремонтних виїздів; зниження витрат на заміну пошкоджених елементів; збільшення міжремонтного періоду; зменшення експлуатаційних втрат [22, 24, 25].

Для прикладу приймемо такі вихідні дані: довжина лінії: $L=2,8$ км; орієнтовні витрати на спорудження базового варіанта: $C_1=980000$ грн; орієнтовні витрати на спорудження удосконаленого варіанта: $C_2=1060000$ грн; додаткові капітальні вкладення: $\Delta C=C_2-C_1=80000$ грн.

Прийmemo, що внаслідок застосування надійніших конструктивних елементів щорічні експлуатаційні витрати зменшуються: для базового варіанта: $E_1=62000$ грн/рік; для удосконаленого варіанта: $E_2=34000$ грн/рік. Тоді річна економія коштів становитиме: $\Delta E=E_1-E_2=28000$ грн/рік.

Термін окупності додаткових капітальних вкладень визначається за формулою:

$$T_{ок} = \Delta C / \Delta E$$

Підставляючи значення, одержимо: $T_{ок} \approx 2,86$.

На рис. 5.2 наведено порівняння щорічних експлуатаційних витрат для базового та удосконаленого варіантів повітряної лінії.

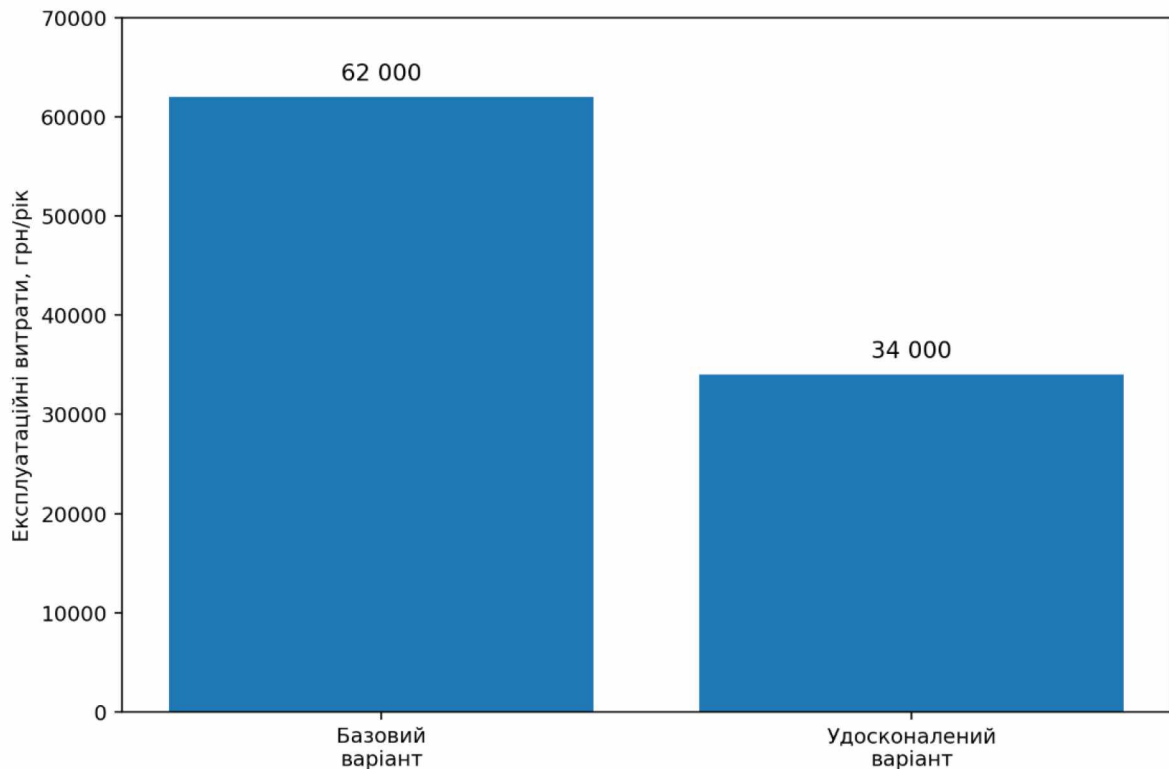


Рисунок 5.2 – Порівняння щорічних експлуатаційних витрат для двох варіантів конструкції повітряної лінії

Додаткові витрати на застосування удосконаленого конструктивного рішення окупаються приблизно за 2,9 роки.

Для узагальнення результатів економічного аналізу наведемо таблицю 5.1.

Таблиця 5.1 – Показники економічної ефективності проєктного рішення

Показник	Базовий варіант	Удосконалений варіант
Витрати на спорудження, грн	980000	1060000
Експлуатаційні витрати за рік, грн	62000	34000
Додаткові капітальні вкладення, грн	–	80000
Річна економія, грн	–	28000
Термін окупності, років	–	2,86

З економічної точки зору застосування більш надійних проводів, сучасних ізоляторів і довговічних опор є виправданим, оскільки хоча початкові капітальні витрати дещо зростають, у подальшому це компенсується зниженням витрат на ремонт, експлуатацію та аварійно-відновлювальні роботи.

Крім прямого економічного ефекту, важливе значення має також непрямий ефект, пов'язаний зі зменшенням перерв електропостачання споживачів. Надійніша робота повітряної лінії сприяє зменшенню збитків від недовідпуску електроенергії, особливо для об'єктів виробничого та комунального призначення.

Таким чином, прийняте проєктне рішення для повітряної лінії середньої напруги є економічно доцільним, оскільки забезпечує зниження експлуатаційних витрат, підвищення надійності мережі та прийнятний термін окупності додаткових капітальних вкладень [21, 22, 24].

Висновки до розділу 5

У п'ятому розділі розглянуто питання охорони праці, екологічної та економічної ефективності проєктного рішення для повітряної лінії електропередачі середньої напруги. Встановлено, що під час експлуатації лінії основними небезпечними факторами є дія електричного струму, можливість коротких замикань, падіння з висоти, механічні пошкодження конструкцій, а також несприятливі метеорологічні умови. Для забезпечення безпечної роботи запропоновано комплекс технічних та організаційних заходів, який включає захисне заземлення, використання справних ізоляторів і арматури, застосування засобів індивідуального захисту, виконання робіт за нарядом-допуском і регламентоване технічне обслуговування.

Проведена екологічна оцінка показала, що запропоноване конструктивне рішення має позитивний вплив на довкілля, оскільки забезпечує підвищення надійності лінії, зменшує частоту аварійних ситуацій і скорочує потребу в аварійно-відновлювальних роботах. Застосування сучасних матеріалів і конструкцій сприяє збільшенню терміну служби елементів повітряної лінії та зниженню непрямого екологічного навантаження.

У результаті економічного аналізу встановлено, що використання удосконалених конструктивних елементів повітряної лінії супроводжується збільшенням початкових витрат, проте забезпечує зниження щорічних експлуатаційних витрат. Річна економія становить 28000 грн, а термін окупності додаткових капітальних вкладень – близько 2,86 року.

Таким чином, запропоноване проєктне рішення для повітряної лінії електропередачі середньої напруги є безпечним в експлуатації, екологічно доцільним та економічно ефективним.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. У бакалаврській роботі досліджено конструкції повітряних ліній електропередачі середньої напруги та методи їх електричного і механічного розрахунку з метою обґрунтування технічних рішень, що забезпечують надійність, безпеку та ефективність експлуатації.

2. Встановлено, що повітряні лінії середньої напруги є важливою складовою розподільчих електричних мереж, а їх надійність і довговічність значною мірою визначаються правильним вибором проводів, опор, ізоляторів, лінійної арматури та умов експлуатації.

3. Показано, що під час проєктування повітряних ліній необхідно враховувати не лише електричні характеристики, а й механічну міцність, вплив вітрових і ожеледних навантажень, температурні зміни, нормативні габарити, умови монтажу та подальшого технічного обслуговування.

4. Обґрунтовано доцільність застосування сталелегюмінієвих проводів, залізобетонних опор і сучасних ізоляційних елементів як конструктивних рішень, що забезпечують достатню механічну міцність, належну пропускну здатність, довговічність та прийнятні експлуатаційні показники повітряної лінії середньої напруги.

5. Для заданих умов роботи прийнято повітряну лінію напругою 10 кВ, довжиною 2,8 км, з розрахунковим навантаженням 1600 кВА та середньою довжиною прогону 70 м. У результаті розрахунку визначено розрахунковий струм 92,4 А та обґрунтовано вибір проводу марки АС-50/8.

6. У процесі розрахунку визначено основні параметри роботи повітряної лінії, зокрема струмове навантаження, стрілу провисання проводу та механічні навантаження на конструкцію. Отримані результати підтвердили, що прийнята конструкція відповідає умовам надійної та безпечної експлуатації.

7. Встановлено, що комплексний підхід до розрахунку повітряної лінії, який включає вибір проводу, електричний розрахунок, механічний розрахунок, підбір опор та ізоляторів, а також перевірку габаритів, дозволяє забезпечити

узгодженість усіх параметрів конструкції та підвищити надійність електропостачання.

8. Доведено, що безпечна експлуатація повітряних ліній середньої напруги забезпечується за умови виконання комплексу технічних і організаційних заходів, зокрема застосування захисного заземлення, дотримання нормативних відстаней, використання справних елементів конструкції, засобів індивідуального захисту та виконання робіт відповідно до вимог електробезпеки.

9. Показано, що застосування сучасних конструктивних рішень для повітряних ліній середньої напруги має позитивний екологічний ефект, оскільки сприяє зниженню аварійності, зменшенню потреби в аварійно-відновлювальних роботах, підвищенню довговічності елементів та скороченню непрямого впливу на довкілля.

10. Економічна оцінка підтвердила доцільність прийнятого проєктного рішення, оскільки зменшення щорічних експлуатаційних витрат компенсує додаткові капітальні вкладення, а орієнтовний термін окупності становить близько 2,86 року.

11. Отримані результати підтверджують технічну, експлуатаційну, економічну та практичну доцільність використання запропонованих підходів під час проєктування, реконструкції та технічного переоснащення повітряних ліній електропередачі середньої напруги.