

Вінницький національний технічний університет

Факультет електроенергетики та електромеханіки

Кафедра електричних станцій і систем

Бакалаврська дипломна робота на тему:

**АНАЛІЗ МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ ОПОР ТА ПРОВІДІВ ПОВІТРЯНИХ
ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ**

Виконав: студент 4 курсу, групи 2ЕЕ-206
спеціальності 141 – «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
за ОП «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»

Немець А.В.

Керівник: к.т.н., доцент., доцент каф. ЕСС
Малогулко Ю.В.

«10» червня 2024 р.

Рецензент: к.т.н., проф. каф. ЕССЕН
(наук. ступінь, вч. звання, назва кафедри)

«17» червня 2024 р.

Допущено до захисту
завідувач кафедри ЕСС
д.т.н., професор Комар В. О.

«17» червня 2024 р.

Вінниця ВНТУ 2024 рік

Вінницький національний технічний університет
Факультет електроенергетики та електромеханіки
Кафедра електричних станцій та систем
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
Галузь знань – 14 «Електрична інженерія»
Спеціальність – 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
Освітньо-професійна програма – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ЕСС

д.т.н., професор Комар В. О.

«11» 03 2024 р.

ЗАВДАННЯ **НА БАКАЛАВРСЬКУ ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Немцу Андрію Васильовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи. «Аналіз методів розрахунку опор та проводів повітряних ліній електропередавання»

Керівник роботи к.т.н., доц., доцент каф. ЕСС Малогулко Ю.В.
затверджена наказом вищого навчального закладу від 11.03.2024 року № 80.

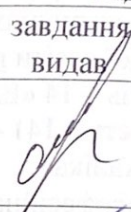
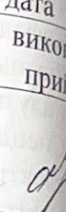
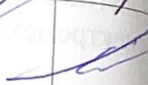
2. Термін подання студентом роботи 10 червня 2024 року.

3. Вихідні дані до роботи: Перелік літературних джерел за тематикою роботи. Посилання на періодичні видання.

4. Зміст текстової частини: Вступ. 1. Підхід до вибору проводів ПЛЕП 330 – 1150 кВ. 2. Розподіл напруженості електричного поля по поверхні розщеплених проводів. 3. Вибір площі перерізу проводів плеп 330 – 1150 кВ. 4. Оптимізація розташування проводів в просторі. Гранична натуральна потужність ПЛЕП 330 – 1150 кВ. 5. Охорона праці. Висновки. Список використаних джерел. Додатки.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) 1. Актуальність. 2. Ділянка повітряної лінії електропередавання. 3. Конструктивні розміри повітряних ліній електропередач. 4. Схеми розташування проводів на опорах. 5. Підхід до вибору проводів плеп 330 – 1150 кВ. 6. Метод граничних станів. 7. Висновок.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	виконав прийняв
Спеціальна частина	Керівник роботи Малогулко Ю.В., к.т.н., доц., доцент кафедри ЕСС		
Охорона праці	Кобилянський О. В. д.п.н., проф., завідувач каф. БЖДПБ		

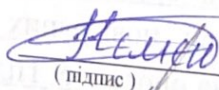
7. Дата видачі завдання 16 січня 2024 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

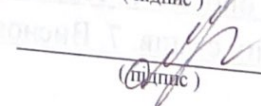
№ з/п	Назва та зміст етапів	Термін виконання етапів роботи	
		початок	кінець
1	Вступ. Огляд літературних джерел	21.01.24	15.02.24
2	Підхід до вибору проводів ПЛЕП 330 – 1150 кВ (розділ 1 БДР)	16.02.24	15.03.24
3	Розподіл напруженості електричного поля по поверхні розщеплених проводів (розділ 2)	16.03.24	10.04.24
4	Вибір площі перерізу проводів плеп 330 – 1150 кВ. Оптимізація розташування проводів в просторі. Гранична натуральна потужність ПЛЕП 330 – 1150 кВ. (розділи 3, 4 БДР)	11.04.24	11.05.24
5	Охорона праці (розділ 5 БДР)	12.04.24	19.05.24
6	Формування висновків по роботі. Оформлення пояснювальної записки	20.05.24	24.05.24
7	Виконання ілюстративної частини та оформлення презентації	25.05.24	04.06.24
	Перевірка БДР на плагіат. Попередній захист БДР	05.06.24	07.06.24
	Рецензування БДР	08.06.24	0.06.24
	Захист БДР	За графіком	

Студент

Керівник роботи


(підпис)

А. В. Немец


(підпис)

Ю.В. Малогулко

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ	3
ANNOTATION	4
ВСТУП	5
1 ПІДХІД ДО ВИБОРУ ПРОВОДІВ ПЛЕП 330 – 1150 КВ	7
1.1 Параметри повітряних ліній електропередавання з розщепленими проводами	22
2 РОЗПОДІЛ НАПРУЖЕНОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ ПО ПОВЕРХНІ РОЗЩЕПЛЕНИХ ПРОВОДІВ	35
2.1 Коронний розряд. Характеристики втрат на корону і радіоперешкод	42
3 ВИБІР ПЛОЩІ ПЕРЕРІЗУ ПРОВОДІВ ПЛЕП 330 – 1150 КВ	58
3.1 Вибір площі поверхні проводів ПЛ 330 – 1150 кВ	64
4 ОПТИМІЗАЦІЯ РОЗТАШУВАННЯ ПРОВОДІВ В ПРОСТОРІ. ГРАНИЧНА НАТУРАЛЬНА ПОТУЖНІСТЬ ПЛЕП 330 – 1150 КВ	74
5 ОХОРОНА ПРАЦІ	81
5.1 Технічні рішення з безпечної експлуатації об'єкта	81
5.1.1 Технічні рішення з безпечної організації робочих місць	81
5.1.2 Електробезпека	85
5.2 Технічні рішення з гігієни праці і виробничої санітарії	87
5.2.1 Мікроклімат	87
5.2.2 Склад повітря робочої зони	87
5.2.3 Виробниче освітлення	88
5.2.4 Виробничий шум	89
5.2.5 Виробничі вібрації	90
5.3 Пожежна безпека	91
ВИСНОВКИ	94
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	96
ДОДАТКИ	99

АНОТАЦІЯ

Немец Андрій Васильович «Аналіз методів розрахунку опор та проводів повітряних ліній електропередавання». Бакалаврська дипломна робота за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. Вінниця : ВНТУ. 2024. 99 с.

Українською мовою. Бібліогр.: 31 назв; рис.: 28; табл. 14.

В бакалаврській дипломній роботі розглядався підхід до вибору проводів ПЛЕП напругою 330-1150 кВ. Виконано розподіл напруженості електричного поля по поверхні розщеплених проводів. Вибрано площі перерізу проводів ПЛЕП 330 – 1150 кВ. Здійснена оптимізація розташування проводів в просторі та граничної натуральної потужності ПЛЕП 330 – 1150 кВ.

В розділі «Охорона праці» виконано технічні рішення щодо безпечного виконання дослідження; технічні рішення з гігієни праці і виробничої санітарії; розрахунок виробничого освітлення та шуму і пожежної безпеки.

Ключові слова: повітряні лінії електропередавання, високовольтні лінії електропередавання, розщеплення проводів.

ABSTRACT

Andriy Nemets "Analysis of calculation methods for supports and wires of overhead power lines". Bachelor's thesis on specialty 141 - Electric power engineering, electrical engineering and electromechanics. Vinnytsia: VNTU. 2024. 99 p.

In ukrainian. Bibliography: 31 titles; Fig.: 28; table 14.

The bachelor thesis considered the approach to the selection of 330-1150 kV PLEP wires. The distribution of the electric field intensity over the surface of the split wires is performed. The cross-sectional area of the plep wires was selected 330 - 1150 kV. Optimization of the location of wires in space and the maximum natural power of PLEP 330 – 1150 kV.

In the "Occupational safety" section, technical decisions regarding the safe execution of the research were made; technical solutions for occupational hygiene and industrial sanitation; calculation of industrial lighting and noise and fire safety.

Key words: repeated power transmission lines, high-voltage power transmission lines, split wires.

ВСТУП

Безперервне зростання концентрації виробництва електричної енергії, різке збільшення відновлювальних електростанцій у структурі генерувальних потужностей, злиття окремих енергосистем у найбільші національні енергетичні об'єднання, необхідність передавати величезні обсяги потужності та енергії з віддалених районів з потужними енергоресурсами в промислово розвинені райони з високою концентрацією населення – усі ці чинники зумовлюють потребу у спорудженні нових ліній електропередач.

Електричні повітряні лінії електропередач (ПЛЕП) призначені для передачі і розподілу електричної енергії по проводах, розташованих на відкритому повітрі і прикріплених до різних опорних конструкцій. Повітряні лінії електропередавання можуть бути з напругою до 1 кВ включно і вище 1 кВ (3, 6, 10 В і вище за шкалою стандартних напруг). Повітряні лінії складаються з наступних основних конструктивних елементів: опор різного типу для підвіски проводів і грозозахисних тросів; проводів різних конструкцій і перетинів для передачі по ним електричного струму; грозозахисних тросів для захисту ліній від грозових розрядів; ізоляторів, зібраних в гірлянди, для ізоляції проводів від заземлених частин опори; лінійної арматури для кріплення проводів і тросів до ізоляторів і опор, а також для з'єднання проводів і тросів; заземлюючих пристроїв для відведення струмів грозових розрядів або короткого замикання в землю.

Проектування і спорудження ПЛЕП ведеться відповідно до ПУЕ. ПУЕ встановлюють вимоги до ліній з різною напругою виходячи з їх призначення: чим вища напруга, що передається, і потужність лінії, тим більшої шкоди приносить її пошкодження, тому до ліній з більш високою напругою висуваються більш суворі вимоги. Об'єднання енергетичних систем, збільшення потужності електричних станцій в цілому супроводжується збільшенням потоків потужності, що передаються по лініях електропередавання. Без потужних ліній електропередавання високої напруги неможлива передача

електроенергії від сучасних великих електростанцій, а також неможливе створення об'єднаних енергосистем.

Стан магістральних електричних мереж рік у рік погіршується, 34% повітряних ліній електропередач (ПЛ) напругою 220-330 кВ експлуатуються понад 40 років, з них 1,7 тис. км ПЛ-330 кВ (13% від загальної протяжності) та 1,6 тис. км ПЛ-220 (52%) потребують реконструкції, 76% основного обладнання трансформаторних електропідстанцій відпрацювало свій розрахунковий технічний ресурс.

Значні проблеми виникають у зв'язку з недостатньою пропускною спроможністю ліній електропередавання для видачі потужностей АЕС (Рівненська, Хмельницька, Запорізька, Южноукраїнська); недостатнім рівнем надійності енергопостачання Криму, півдня Одеської області, Східного Донбасу; унеможливленням передачі надлишкової енергії Західного регіону до центру і на схід країни; некомпенсованістю електромережі ОЕС України за реактивною потужністю та забезпеченням необхідного рівня напруги (Західна, Центральна, Південна енергосистеми).

На перспективу до 2030 року в ОЕС України зберігається стратегія розвитку основних електричних мереж, відповідно до якої системоутворюючі функції видачі потужності електростанцій та забезпечення паралельної роботи з енергосистемами інших країн залишаються за мережами 330 і 750 кВ з послідовним зростанням ролі мережі 750 кВ. Таким чином дослідження методів розрахунку опор та проводів ПЛЕП є актуальною задачею.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є аналіз методів розрахунку опор та проводів повітряних ліній електропередавання.

Об'єктом дослідження бакалаврської дипломної роботи є повітряні лінії електропередавання, а **предметом дослідження** — методи механічного розрахунку опор та проводів повітряних ліній електропередавання.

РОЗДІЛ 1 ПІДХІД ДО ВИБОРУ ПРОВОДІВ ПЛЕП 330 – 1150 КВ

В Україні на повітряних лініях високої напруги застосовуються сталевалюмінієві проводи з перерізом алюмінієвої частини (активним перерізом) 150 мм^2 і більше. Вони мають сталевий сердечник і алюмінієву частину з декількох шарів (рис. 1.1). При одному проводі в центрі і рівному діаметрі всіх дротів перший шар має шість дротів, а кожний подальший – на шість дротів більше, ніж попередній. Тому при одному шарі сталевий сердечник складається з семи дротів, при двох шарах – з 19, при трьох – з 37. Всі дроти одного шару мають однаковий діаметр, в різних шарах діаметри дротів можуть розрізнятися.

Провід АС 300/39 (рис. 1.1) має сталевий сердечник з одного шару, на який накладені два шари алюмінієвих дротів. При непарному числі алюмінієвих шарів збільшуються втрати в проводі через наявність магнітного потоку, що не компенсується. Тому ПУЕ (Правила улаштування електроустановок) рекомендують застосовувати проводи з парним числом алюмінієвих шарів.

Оскільки, відповідно до викладеного, поперечний переріз проводу використовується далеко не повністю, тому що складається із сталевого осердя і пусток між алюмінієвими дротами. Активний переріз проводу відрізняється від площі круга, що охоплює весь провід з радіусом r_o і визначається за формулою:

$$F_{oa} = \pi r_o^2 \chi_z \quad (1.1)$$

де χ_z – коефіцієнт заповнення проводу алюмінієм.

Проводи, що випускаються в Україні, можна розділити за конструктивними і механічними характеристикам на наступні групи:

1. Найпоширеніші на повітряних лініях високої напруги проводи з відношенням перерізів алюмінію і сталі $F_{oa} : F_{oc} \approx 8$. Для них коефіцієнт заповнення χ_z змінюється у вузьких межах $0,66 \leq \chi_z \leq 0,67$. Середнє значення для цих проводів $\chi_z \approx 0,67$. До цієї групи відносяться проводи марок: АС 150/19, АС 185/24, АС 240/32, АС 300/39, АС 330/43, АС 400/51, АС 500/64.

2. Проводи марок АС 150/34, АС 185/43, АС 240/56, АС 300/66, АС 400/93 з відношенням $F_{oa} : F_{oc} \approx 4,3$ і $\chi_z \approx 0,61$ застосовуються переважно в районах з сильною ожеледдю.

3. Проміжне положення займають проводи марок АС 150/24, АС 185/29, АС 240/39, АС 300/48 і АС 400/64 з відношенням $F_{oa} : F_{oc} \approx 6,2$ і $\chi_z \approx 0,65$.

4. Спеціальні проводи для великих механічних навантажень мають відношення $F_{oa} : F_{oc} \approx 1$ і $\chi_z \approx 0,45$. Марки цих проводів АС 185/128, АС 300/204 і АС 500/336. Вони призначені для переходів через великі річки і водні перешкоди. Проводи з $\chi_z \approx 0,35$ марок АС 70/72 і АС 95/141, призначені для грозозахисних тросів.

Істотне зниження коефіцієнта заповнення проводу активним матеріалом досягається в конструкціях проводів, що одержали назву розширених (рис. 1.2). Особливістю розширених проводів є наявність внутрішньої порожнини, яка утворюється «каркасною» спіраллю з алюмінієвих дротів, намотаних на сталеве осердя звичайної конструкції. У цих проводів як поверхня, так і активний переріз збільшуються пропорційно радіусу проводу r_o :

$$\begin{aligned} F_{оп} &= 2\pi r_o \\ F_{oa} &= \pi(r_o^2 - r_{oo}^2) \chi_{zo} = \pi\Delta(2r_o - \Delta) \chi_{zo} = \\ &= 2\pi r_o \left(1 - \frac{\Delta}{2r_o}\right) \chi_{zo}, \end{aligned}$$

де r_{oo} – внутрішній радіус алюмінієвого шару; $\chi_z \approx 0,75$ – коефіцієнт заповнення алюмінієвого шару; $\Delta = r_o - r_{oo}$ – товщина алюмінієвого шару (рис. 1.3); $F_{оп}$ – площа поверхні проводу на одиницю довжини лінії.

Наприклад, при двох алюмінієвих шарах незалежно від діаметру проводу $\Delta = const$ і при $\Delta / 2r_o \ll 1$ активний переріз проводу пропорційний радіусу проводу r_o .

Такі проводи були розроблені, виготовлені і випробувані в США і в СРСР.

Проте використовувалися такі проводи для будівництва ліній тільки в США.

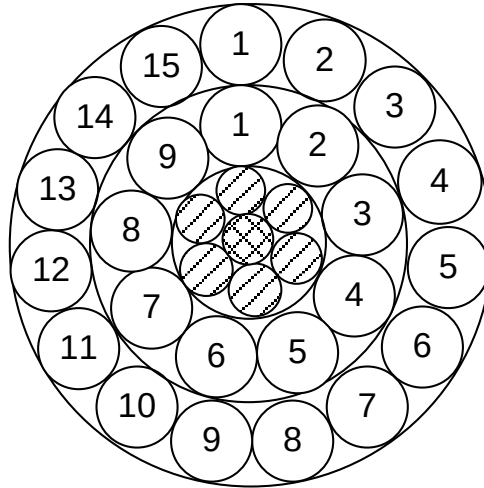


Рисунок 1.1 – Сталеалюмінієвий повід АС 300/39

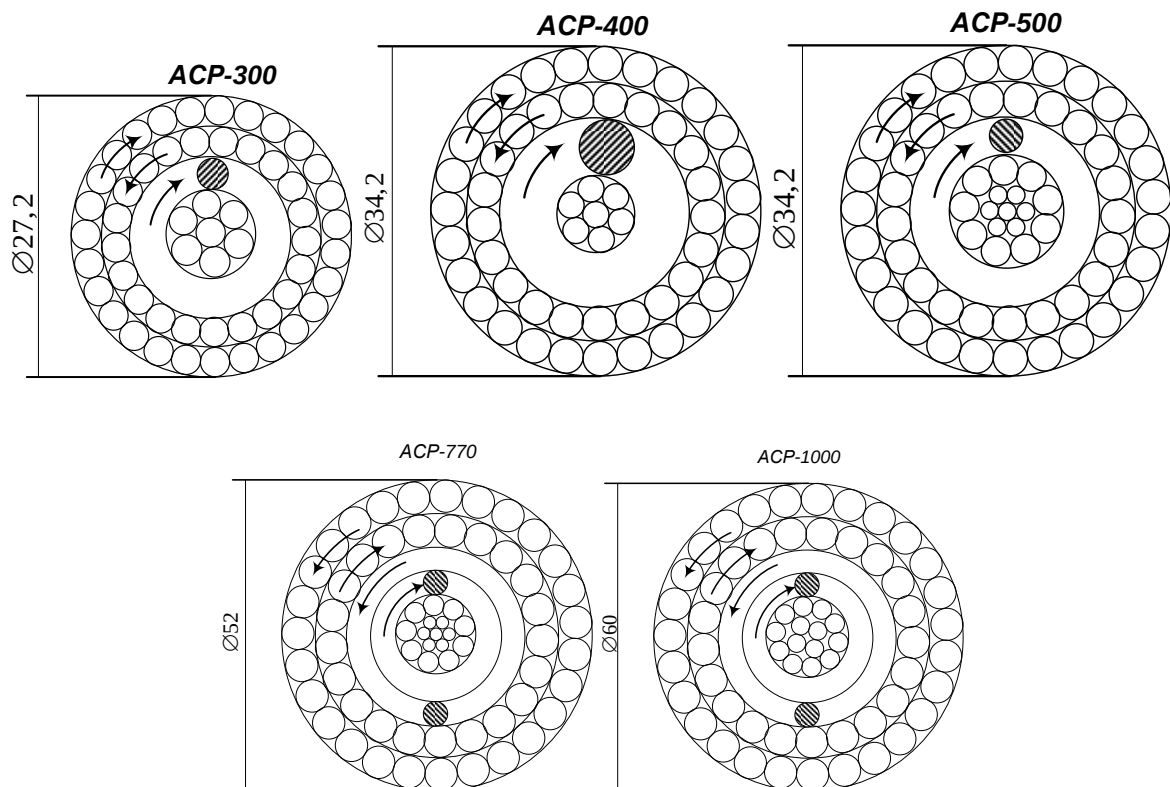


Рисунок 1.2 – Розширені проводи

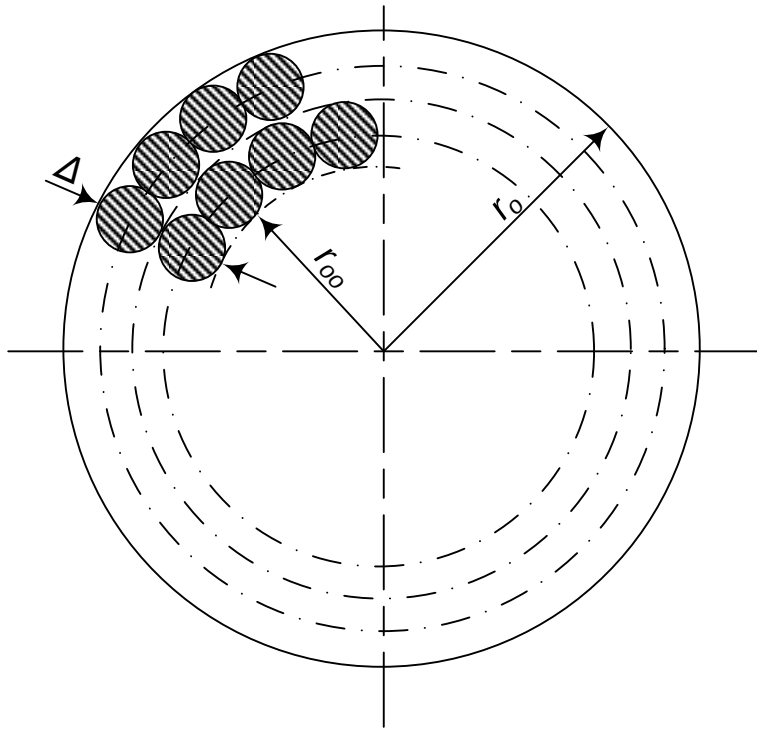


Рисунок 1.3 – Провідний шар витого проводу

Якщо повітряна лінія електропередавання працює на навантаження, еквівалентний опір якого дорівнює хвильовому опору лінії:

$$z_{\epsilon} = \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{1}{v_{\epsilon} C} = v_{\epsilon} L, \quad (1.1)$$

то такий режим її роботи називають натуральним. У цих формулах L і C – індуктивність і ємність одиниці довжини лінії;

$$v_{\epsilon} = 1/\sqrt{LC} \quad (1.2)$$

– швидкість розповсюдження електромагнітної хвилі вздовж лінії. Відповідно до визначення натуральний струм лінії

$$I_n = U_{\phi.n} / z_{\epsilon} = U_{\phi.n} / v_{\epsilon} L = U_{\phi.n} v_{\epsilon} C = q v_{\epsilon}, \quad (1.3)$$

де $U_{\phi.n}$ – номінальна фазна напруга; q – заряд одиниці довжини лінії, який для одного проводу у фазі згідно теоремі Гауса дорівнює

$$q = q_o = 2\pi\varepsilon_o r_o E = CU_{\phi.n} \quad (1.4)$$

де r_o – радіус проводу; $2\pi r_o$ – площа поверхні одиниці довжини проводу; E – напруженість електричного поля на поверхні проводу; $\varepsilon_o = 1/4\pi \cdot 9 \cdot 10^9$ – електрична стала. Таким чином, натуральний струм лінії

$$I_n = qv_e = 2\pi\varepsilon_o r_o E \approx \frac{1}{60} r_o E \quad (1.5)$$

тобто чисельно дорівнює добутку заряду одиниці довжини лінії і швидкості розповсюдження електромагнітної хвилі і визначається тільки радіусом проводу і напруженістю поля на його поверхні.

При протіканні натурального струму енергія, що запасається магнітним і електричним полями, однакова. У цьому можна переконатися, підставивши у формулу для середньої за період напруги енергії магнітного поля на одиницю довжини однієї фази лінії вираз (2.3) для I_n і використавши формулу (1.2):

$$W_m = LI_n^2 = LC^2 v_e^2 U_{\phi.n}^2 = CU_{\phi.n}^2 = W_{эл}, \quad (1.6)$$

де $W_{эл}$ – середня за період енергія електричного поля.

Однакові і миттєві значення енергій магнітного і електричного полів лінії, яка працює в натуральному режимі:

$$\frac{1}{2} Li_n^2 = \frac{1}{2} Cu_{\phi.n}^2,$$

що визначає повністю збалансований режим роботи лінії, при якому не потрібні додаткові пристрої для передачі активної потужності по лінії (натуральної потужності P_n).

При струмі в лінії $I = 0$ (режим холостого ходу) магнітне поле відсутнє, а електричне поле, яке визначається напругою на лінії, таке ж, як і при $I = I_n$. У зв'язку з цим в режимі холостого ходу лінія є джерелом реактивної потужності, яка повинна бути поглинена приймаючою системою, або розподілена вздовж

лінії індуктивним навантаженням такої ж потужності, як і потужність електричного поля лінії завдовжки l (на три фази):

$$Q_{эл} = 3\omega C U_{ф.н}^2 l.$$

Пристроями для поглинання зарядної потужності лінії можуть бути шунтувальні реактори, які включаються між проводом і землею, трансформатори, а також генератори, які працюють в режимі недозбудження.

При струмі в лінії, який перевищує струм в натуральному режимі $I > I_n$, середня за період енергія магнітного поля буде більше енергії електричного поля

$$LI^2 > CU_{ф.н}^2,$$

причому ця відмінність збільшується пропорційно квадрату струму. В результаті енергія магнітного поля може значно перевищувати енергію електричного поля. Це означає, що працююча в такому режимі лінія еквівалентна індуктивному навантаженню (реактору), потужність якого Q визначається потужністю магнітного поля лінії. Для трифазної лінії завдовжки l з урахуванням формули (1.9)

$$\begin{aligned} Q &= 3\omega LI^2 l - 3\omega C U_{ф.н}^2 l = 3\omega L (kI_n)^2 l - 3\omega C U_{ф.н}^2 l = \\ &= 3\omega C U_{ф.н}^2 (k^2 - 1) l = 3\nu_{\epsilon} C U_{ф.н}^2 (k^2 - 1) \frac{\omega l}{\nu_{\epsilon}} = P_n (k^2 - 1) \lambda, \end{aligned} \quad (1.7)$$

де $k = I/I_n$; $\lambda = \omega l/\nu_{\epsilon}$ – хвильова довжина лінії; $P_n = U_{ф.н}^2 \nu_{\epsilon} C$ – натуральна потужність лінії.

У цій ситуації, коли потужність магнітного поля більше електричного, лінія потребує джерела реактивної потужності, яка збалансує її споживання магнітним полем лінії. Таким джерелом може бути батарея конденсаторів, синхронний компенсатор, який працює в режимі упереджувального фазового зсуву струму по відношенню до фази напруги на 90° , а також синхронний генератор в режимі перезбуджування.

Споживана лінією реактивна потужність Q швидко збільшується при

зростанні відношення потужності P , яка передається, до натуральної потужності P_n (табл. 1.1) і може складати суттєву частину потужності P , що передається по лінії.

Таблиця 1.1

P/P_n	Q/P при довжині лінії l , км, рівної					
	100	200	300	400	500	600
1	0	0	0	0	0	0
2	0,05	0,30	0,45	0,60	0,75	0,87
3	0,27	0,53	0,80	1,07	—	—
4	0,38	0,75	1,13	—	—	—

Ось чому вироблення додаткової реактивної потужності в енергосистемі для компенсації її споживання лінією вимагає великих додаткових капітальних вкладень. З викладеного виходить, що оптимальним є натуральний режим роботи лінії, який не вимагає додаткових джерел реактивної потужності. Натуральний режим передачі електроенергії характеризується ще однією цікавою властивістю, яка безпосередньо виходить з рівняння передачі, записаного в символічній формі при нехтуванні активним опором і активною провідністю лінії (лінії без втрат):

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 \cos \lambda + jI_n z_0 \sin \lambda$$

де $\dot{U}_1$ і $\dot{U}_2$ – напруга на початку і в кінці лінії; $\lambda = \omega l \sqrt{LC} = \omega l / v_0 \approx \approx 314l / 3 \cdot 10^8 = 1,05 \cdot 10^{-3} l$ – хвильова довжина лінії, рад; l – довжина лінії, км; $\sin \lambda \approx 10^{-3} l$.

Суміщення $\dot{U}_2$ з дійсною віссю координат і урахування $U_2 = U_{\phi.n}$, а також

підставлення струму I_n згідно (2.3) дає

$$\dot{U}_1 = U_{\phi.n} (\cos \lambda + j \sin \lambda) = U_{\phi.n} e^{j\lambda}.$$

Отже, в натуральному режимі лінії без втрат напруга на початку і в кінці лінії однакова по модулю, але зсунута по фазі на кут λ . Таким чином, в натуральному режимі лінія без втрат працює без втрати напруги. Активний опір проводів реальних ліній визначає втрату напруги і в натуральному режимі роботи лінії, проте значно меншу, ніж при $I > I_n$ (рис. 1.4).

У зв'язку з викладеним за основу аналізу умов роботи проводів ПЛ приймемо натуральний режим роботи ліній. Потужність, яка передається по лінії в цьому режимі

$$\begin{aligned} P_n &= 3U_{\phi.n} I_n = 3 \frac{U_{\phi.n}^2}{Z_g} = \frac{U_n}{Z_g} = \frac{3U_{\phi.n}^2}{v_g L} = 3U_{\phi.n}^2 v_g C = \\ &= 3U_{\phi.n} q v_g = 6\pi \varepsilon_o v_g r_o U_{\phi.n} E \end{aligned} \quad (1.8)$$

називається натуральною потужністю.

З формул (2.5), (2.8) витікає, що натуральний струм і натуральна потужність лінії пропорційні площі поверхні одиниці довжини проводу $F_n = 2\pi r_o$ і напруженості електричного поля на ній.

Ось чому на лініях 330 – 1150 кВ доцільно забезпечувати максимально можливу напруженість $E = E_{доп}$, яка обмежується втратами коронного розряду. Оскільки напруженість, що допускається, не може бути перевищена при середній експлуатаційній напрузі, при номінальній напрузі напруженість поля менше за допустиму

$$E_{доп.n} = E_{доп} \frac{U_{\phi.n}}{U_{\phi.ср.э}}.$$

Отже, натуральний струм і натуральна потужність лінії (обчислювані при номінальній напрузі)

$$I_n = 2\pi\varepsilon_o r_o \nu_\varepsilon E_{\partial on.n} = \varepsilon_o \nu_\varepsilon F_{on} E_{\partial on.n} = CU_{\phi.n} \nu_\varepsilon; \quad (1.9)$$

$$P_n = 6\pi\varepsilon_o r_o \nu_\varepsilon E_{\partial on.n} U_{\phi.n} = 3\varepsilon_o \nu_\varepsilon F_{on} E_{\partial on.n} U_{\phi.n} = \frac{1}{20} r_o U_{\phi.n} E_{\partial on.n}. \quad (1.10)$$

Активний переріз одиночного проводу при $\chi_z = const$ збільшується пропорційно квадрату радіусу проводу. Тому густина струму в проводах лінії, що працює в натуральному режимі (натуральна густина струму)

$$J_n = \frac{I_n}{F_{oa}} = \frac{2\pi\varepsilon_o r_o E_{\partial on.n} \nu_\varepsilon}{\pi r_o^2 \chi_z} = \frac{2\varepsilon_o E_{\partial on.n} \nu_\varepsilon}{r_o \chi_z} = \frac{1}{60\pi} \frac{E_{\partial on.n}}{r_o \chi_z}, \quad (1.11)$$

зменшується обернено пропорційно до радіусу проводу незалежно від класу напруги лінії (рис. 1.5).

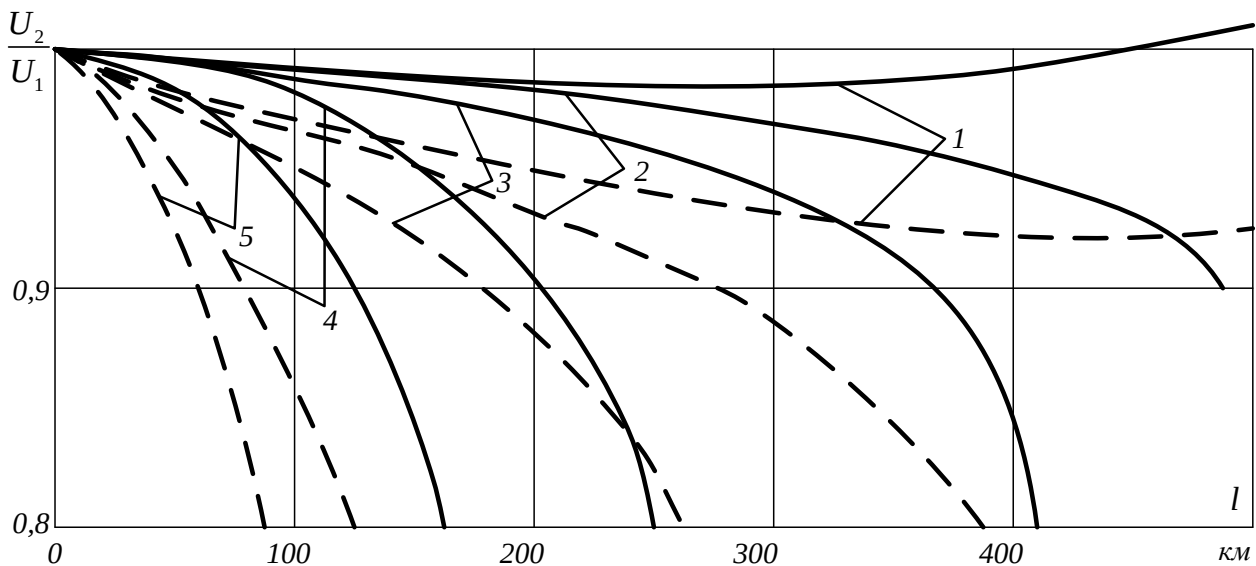


Рисунок 1.4 – Залежності відношення напруг в кінці і на початку ПЛ 500 кВ від довжини лінії при різних відношеннях $I/I_n = 0,75$ (крива 1); $I/I_n = 1,0$ (крива 2), $I/I_n = 1,25$ (крива 3); $I/I_n = 2,0$ (крива 4) і $I/I_n = 3,0$ (крива 5) при чисто активному навантаженні (суцільні лінії) і при коефіцієнті потужності навантаження 0,85 (штрихові лінії)

Оптимальна (економічна) густина струму залежно від умов експлуатації

енергосистеми змінюється в широких межах $1,0 \leq J_e \leq 1,5$ А/мм². Кожному значенню оптимальної густини струму з цього діапазону згідно формулі (1.11) відповідає певний радіус проводу, що змінюється в діапазоні $1,1 \leq r_o \leq 1,6$ см. З другого боку, згідно формулі (1.4) при збільшенні номінальної напруги радіус проводу.

$$r_o = \frac{C}{2\pi\epsilon_o} \frac{U_{\phi.n}}{E_{доп.н}} \quad (1.12)$$

повинен збільшуватися пропорційно номінальній напрузі (рис. 2.3), що приводить до зменшення натуральної густини струму. Дійсно, підставляючи формулу (1.12) в (1.11), одержуємо

$$J_n = \frac{(2\epsilon_o)^2 \pi \nu_\epsilon E_{доп.н}^2}{C U_{\phi.н} \chi_z} = \frac{(2\epsilon_o \nu_\epsilon)^2 \pi z_\epsilon E_{доп.н}^2}{U_{\phi.н} \chi_z}, \quad (1.13)$$

тобто при заданому коефіцієнті χ_z натуральна густина струму обернено пропорційна номінальній напрузі (див. рис. 2.2), оскільки робоча ємність і хвильовий опір лінії з одиночним проводом мало змінюються при зміні радіусу проводу. Ця несприятлива закономірність визначила скептичне відношення до перспективи підвищення номінальної напруги електропередач змінного струму, починаючи з мінімального рівня 220 кВ. Кожний наступний клас напруги освоювався після ретельних техніко-економічних обґрунтувань, не дивлячись на очевидну ефективність підвищення номінальних напруг електропередач. Можливі декілька варіантів розв'язання цієї проблеми. Наприклад, можна збільшити струм в лінії більше ніж натуральний (перший варіант)

$$I = k I_n = 2\pi\epsilon_o \nu_\epsilon r_o E_{доп.н} k, \quad (1.14)$$

підбираючи кратність відношення $I/I_n = k$ так, щоб густина струму була рівноекономічною. Тоді відповідно до формул (1.11), (1.13)

$$J_e = kI_n = \frac{k}{60\pi} \frac{E_{\text{доп.н}}}{r_o \chi_3} = \frac{k}{U_{\text{ф.н}}} \frac{(2\varepsilon_o \nu_g)^2 \pi z_g E_{\text{доп.н}}^2}{\chi_3} \quad (1.15)$$

З останньої формули видно, що для утримання густини струму на рівні економічної, кратність струму k повинна змінюватись пропорційно радіусу проводу або класу напруги (рис. 1.7). Як видно, з рис. 1.7, при $J_e = 1 \text{ А/мм}^2$ вже при $U_{\text{л.н}} = 500 \text{ кВ}$ кратність $k = I/I_n \approx 2,5$, а при $U_{\text{л.н}} = 750 \text{ кВ}$ $k = 3$.

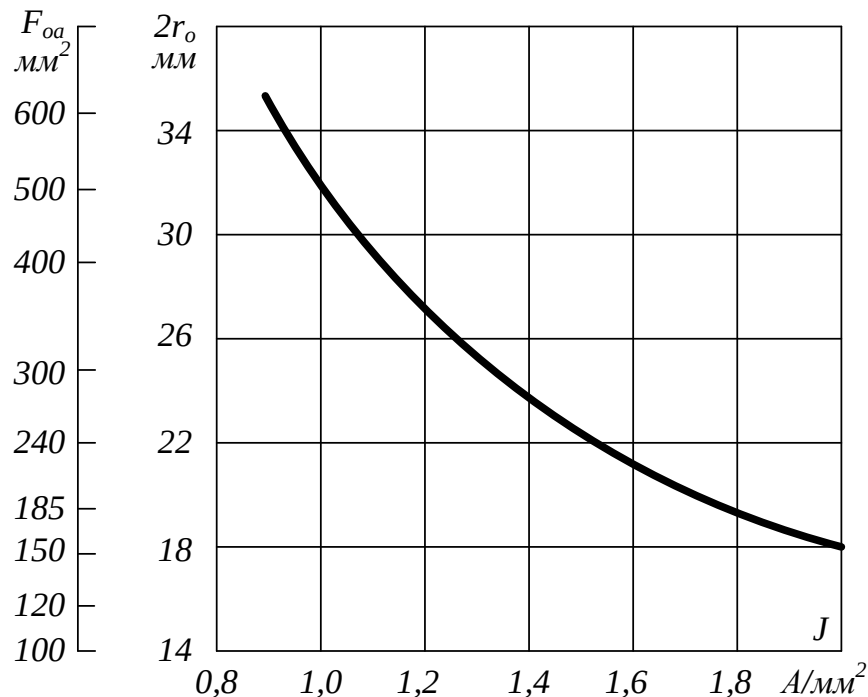


Рисунок 1.5 – Залежність натуральної густини струму ПЛ від радіусу одиночного проводу при $E = 0,9E_{\text{нач}}$

Такі кратності струму викликають необхідність використання джерел реактивної потужності (ДРП), наприклад синхронних компенсаторів, батарей конденсаторів, генераторів, що працюють в режимі перезбуджування, для компенсації споживання реактивної потужності лінією.

У зв'язку з цим істотно збільшуються капітальні витрати на спорудження електропередавання і витрати на її експлуатацію.

Другий варіант узгодження вимог, що пред'являються до проводів, за умовою обмеження коронного розряду і за умовою оптимальності густини струму забезпечують розширені проводи. Дійсно, з формули (1.11) виходить, що якщо коефіцієнт заповнення перерізу проводів χ_3 змінюється обернено пропорційно до радіусу проводу так, що їх добуток зберігається незмінним $r_o \chi_3 = const$, то натуральна густина струму не залежить від радіусу проводу і, отже, згідно рис. 1.6 від класу напруги.

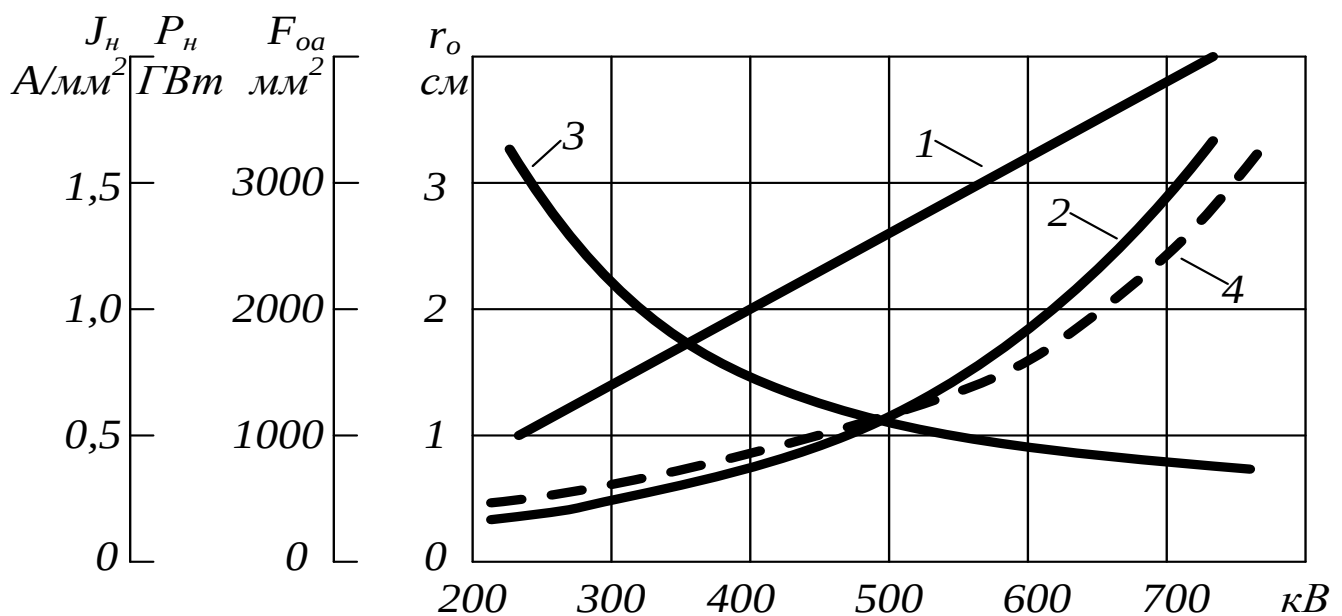


Рисунок 1.6 – Залежності від класу напруги ПЛ необхідного по умові обмеження коронного розряду радіусу проводу r_o (крива 1), відповідного активного перерізу проводу F_{oa} (крива 2) при $\chi_3 = 0,65$, натуральної густини струму J_n при $E = 0,9E_{noch}$

При роботі лінії з одиночними проводами в натуральному режимі збільшення напруги до 500 кВ призводить до зменшення коефіцієнта заповнення до $\chi_3 \approx 0,3$ (рис. 1.8). Створити розширені проводи з $\chi_3 < 0,3$ важко через складнощі забезпечення стійкої конструкції проводів з багатоходовою каркасною спіраллю. При цьому слід враховувати деяке збільшення вартості

розширених проводів в порівнянні з суцільними проводами того ж перерізу (в межах 5–10%). Пов'язане з цим подорожчання електропередавання НВН виявляється, як правило, меншим, ніж при використуванні ДРП для компенсації споживаною лінією реактивної потужності при реалізації розглянутого вище першого варіанту.

Зміна натуральної потужності лінії з одиночними проводами, обчисленої по формулі (1.10), залежно від класу напруги приведена на рис. 1.6. Як видно, для ПЛ 500 кВ натуральна потужність складає 620 МВт.

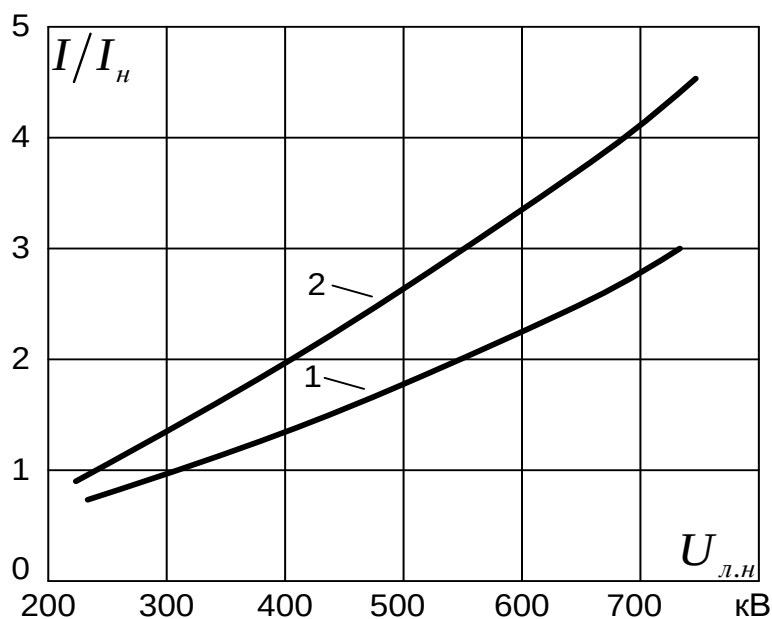


Рисунок 1.7 – Залежності кратності струму I/I_n від класу напруги при $J = 1$ А/мм² (крива 1) і $J = 1,5$ А/мм² (крива 2) для ПЛ з одиночними проводами у фазі

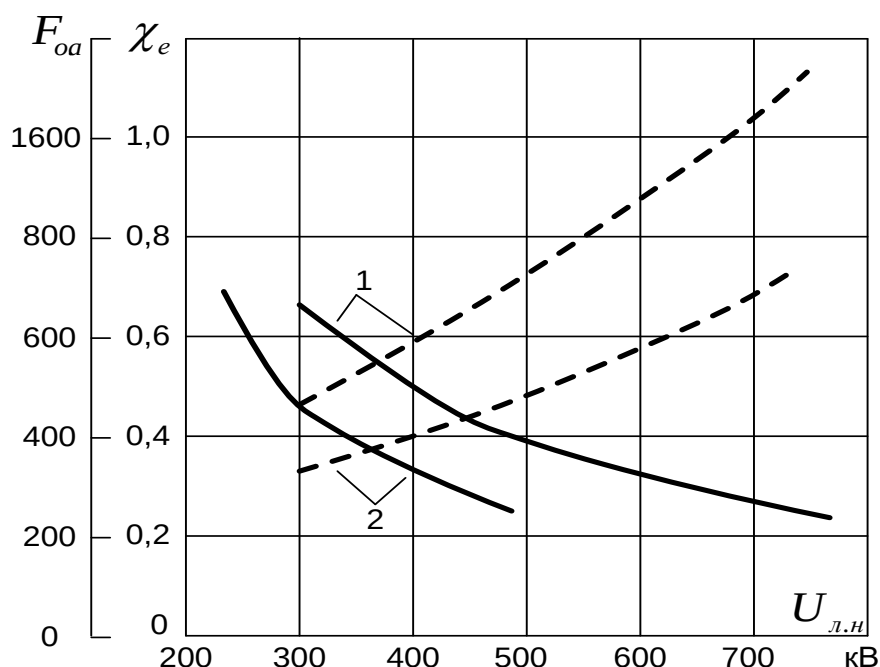


Рисунок 1.8 – Залежності коефіцієнта заповнення (суцільні лінії) і активного перерізу (штрихові лінії) одиночних розширених проводів від класу напруги лінії, що працює в натуральному режимі, при $J = 1 \text{ А/мм}^2$ (криві 1) і $J = 1,5 \text{ А/мм}^2$ (криві 2)

Існує третій шлях вирішення проблеми узгодження вимог до проводів ПЛ 330 – 1150 кВ за умов обмеження коронного розряду і ефективного використання активного перерізу проводів.

Можна не збільшувати радіус окремого проводу при збільшенні напруги або робочої ємності лінії, але збільшувати число проводів n у фазі. В цьому випадку формули (1.2) – (1.4) приймають вигляд

$$q = 2\pi\epsilon_o n r_o E_{\text{дод.н}} k_{\text{вук}} = C U_{\phi}; \quad (1.16)$$

$$I_n = 2\pi\epsilon_o \nu n r_o E_{\text{дод.н}} k_{\text{вук}} \approx \frac{1}{60} n r_o E_{\text{дод.н}} k_{\text{вук}} = \nu C U_{\phi} = U_{\phi} / z_{\epsilon}; \quad (1.20)$$

$$J_n = \frac{I_n}{F_a} = \frac{I_n}{n\pi r_o^2 \chi_z} = \frac{2\epsilon_o \nu E_{\text{дод.н}} k_{\text{вук}}}{r_o \chi_z}, \quad (1.17)$$

де F_a – активний переріз проводів фази; $k_{\text{вук}}$ – коефіцієнт ефективності

використання поверхні розщепленого проводу

$$k_{\text{вик}} = \frac{\sum_{i=1}^{3n} q_{i \text{ макс}}}{3 \cdot 2\pi \varepsilon_o n r_o E_{\text{дод.н}}} = \frac{E_{\text{макс}}}{E_{\text{дод.н}}} \frac{1}{k_n}; \quad (1.18)$$

k_n – коефіцієнт нерівномірності, що враховує нерівномірність розподілу напруженості поля по кожному складовому проводу фази, по складових фази і по фазах.

При такій конструкції проводу ($r_o = \text{const}$) струм в лінії відповідно до формули (1.18) може бути в багато разів збільшений при збільшенні числа складових у фазі при незмінній густині струму. Відповідно натуральна потужність лінії становить

$$\begin{aligned} P_n &= 3I_n U_{\text{ф.н}} = 6\pi \varepsilon_o \nu E_{\text{дод.н}} k_{\text{вик}} U_{\text{ф.н}} = \\ &= 3\nu F_n \varepsilon_o E_{\text{дод.н}} k_{\text{вик}} U_{\text{ф.н}} \approx 0,05 n r_o E_{\text{дод.н}} k_{\text{вик}} U_{\text{ф.н}} = \\ &= 3\nu C U_{\text{ф.н}}^2 = 3 \frac{U_{\text{ф.н}}^2}{\nu L} = 3 \frac{U_{\text{ф.н}}^2}{Z_g} = \frac{U_{\text{л.н}}^2}{Z_g} \end{aligned} \quad (1.19)$$

І може бути довільно збільшена при збільшенні числа складових у фазі незалежно від класу напруги (рис.1.8).

При заданому числі складових у фазі натуральна потужність лінії збільшується пропорційно робочій напрузі. При цьому підбором відповідного радіусу проводів густина струму може бути доведена до оптимальної незалежно від числа складових у фазі.

Струм в лінії, густина струму в проводах і натуральна потужність лінії залежать від $k_{\text{вик}}$. Відповідно до формул (1.17), (1.18) необхідно прагнути до максимального значення цього коефіцієнта.

Складові розщепленого проводу можуть бути розташовані в просторі довільно. Граничні варіанти розташування складових фази – по колу і в одній площині. Ці варіанти охоплюють безліч конфігурацій розщеплених проводів, складові яких розташовуються по різних криволінійних поверхнях.

Проте у всіх варіантах для ефективного використання поверхні проводів необхідно виконати умову $E_{\max} = E_{\text{доп.н}}$. Для виконання цієї умови необхідно розрахувати заряди на проводах фаз і їх складових, а також розподіл напруженості електричного поля по складових.

1.1 Параметри повітряних ліній електропередавання з розщепленими проводами

Заряди на проводах і їх складових (рисунок 1.9) визначаються в результаті рішення системи потенційних рівнянь:

$$U_j = \sum_{i=1}^{3n} \alpha_{ji} q_i \quad (j = 1, 2 \dots 3n), \quad (1.20)$$

де

$$a_{ii} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{2H_{ie}}{r_{oi}} \quad (1.21)$$

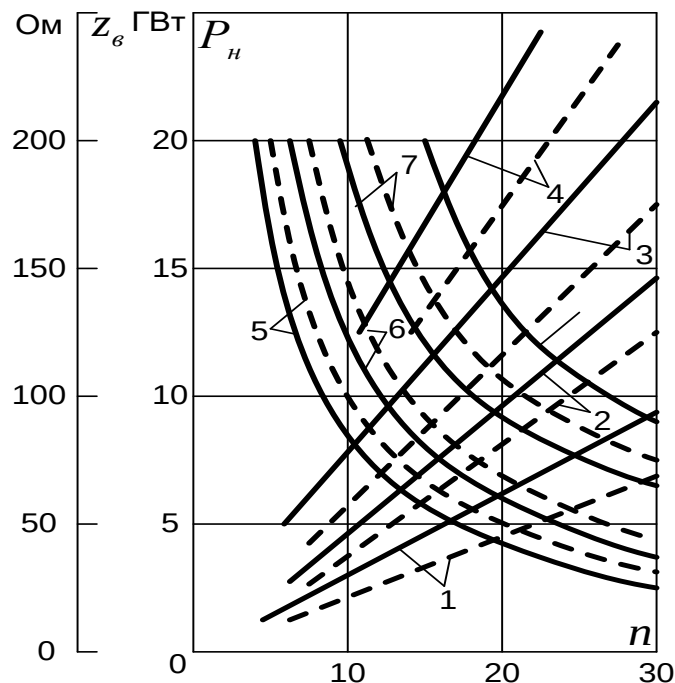


Рисунок 1.9 – Залежності від числа складових у фазі натуральної потужності (криві 1 – 4) і хвильового опору (криві 5 – 8) ПЛ класу напруги 330 кВ (криві 1, 5); 500 кВ (криві 2, 6); 750 кВ (криві 3, 7) і 1150 кВ (криві 4, 8) з проводами АС 240/56 (штрихові лінії) і АС 400/51 (суцільні лінії)

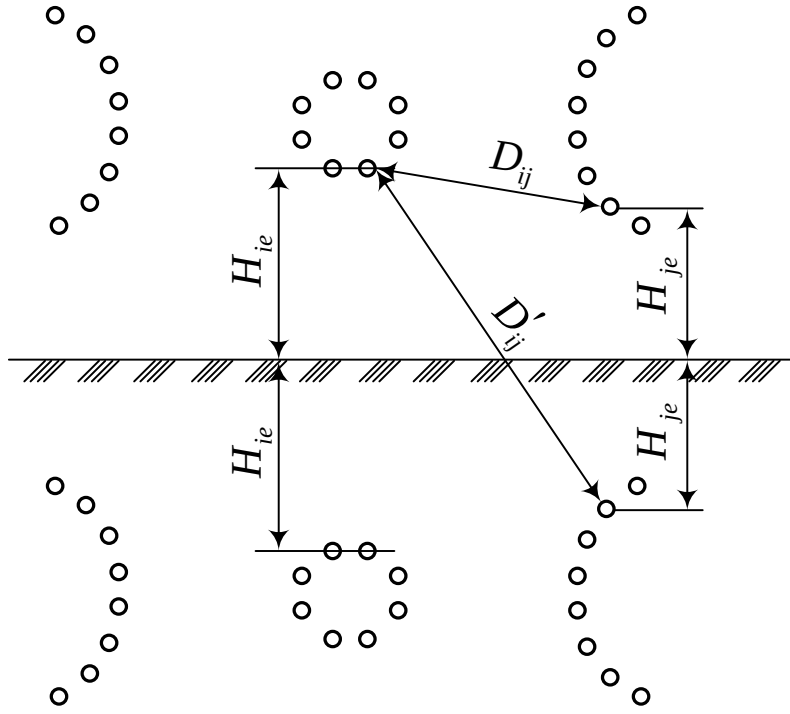


Рисунок 1.10 – До обчислення потенційних коефіцієнтів

$$\alpha_{ij} = \frac{1}{2\pi\epsilon_o} \ln \frac{D'_{ij}}{D_{ij}} = \frac{1}{2\pi\epsilon_o} \cdot \ln \frac{\sqrt{(H_{ie} + H_{je})^2 + D_{ij}^2} - (H_{ie} - H_{je})}{D_{ij}} =$$

$$= \frac{1}{2\pi\epsilon_o} \ln \sqrt{1 + 4 \frac{H_{ie} H_{je}}{D_{ij}^2}} \quad (1.22)$$

– власні ($i = j$) і взаємні ($i \neq j$) потенційні коефіцієнти проводів; r_{oi} – радіус i -го складового,

$$H_{ie} = H_{imin} + \frac{1}{3} f_i \quad (1.23)$$

– еквівалентна висота підвіски i -го проводу; H_{imin} – мінімальна висота i -го проводу над землею; f_i – стріла провисання проводу.

У системі рівнянь (1.20) потенціали всіх складових, що належать одній фазі, однакові. Якщо заряди на всіх складових однієї фази також однакові $q_i = q_k/n$ ($k=1,2,3$ – номер фази), то розв'язок системи рівнянь (1.20) істотно спрощується. В цьому випадку число потенційних рівнянь скорочується до

трьох:

$$\begin{cases} U_1 = \frac{1}{n} q_1 \sum_{i=1}^n \alpha_{1i} + \frac{1}{n} q_2 \sum_{i=n+1}^{2n} \alpha_{1i} + \frac{1}{n} q_3 \sum_{i=2 \cdot n+1}^{3n} \alpha_{1i}; \\ U_2 = \frac{1}{n} q_1 \sum_{i=1}^n \alpha_{n+1,i} + \frac{1}{n} q_2 \sum_{i=n+1}^{2n} \alpha_{n+1,i} + \frac{1}{n} q_3 \sum_{i=2 \cdot n+1}^{3n} \alpha_{n+1,i}; \\ U_3 = \frac{1}{n} q_1 \sum_{i=1}^n \alpha_{2n+1,i} + \frac{1}{n} q_2 \sum_{i=n+1}^{2n} \alpha_{2n+1,i} + \frac{1}{n} q_3 \sum_{i=2 \cdot n+1}^{3n} \alpha_{2n+1,i}; \end{cases} \quad (1.24)$$

При цьому в деяких випадках для відповідних сум потенційних коефіцієнтів можуть бути знайдені прості вирази. Наприклад, при розташуванні складових трьох фаз по колах (рис. 1.10) за умови, що $r_p \ll H_{1e}$ і $r_p \ll D_{ij}$ (i і j належать різним фазам):

$$\begin{aligned} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \alpha_{1i} &\approx \frac{1}{n} \frac{1}{2\pi\epsilon_o} \left[\ln \frac{2H_{1e}}{r_o} + \sum_{i=2}^n \ln \frac{2H_{1e}}{2r_p \sin(i-1)\pi/n} \right] = \\ &= \frac{1}{2\pi\epsilon_o} \left[n \ln 2H_{1e} - \ln r_o - \sum_{i=2}^n \ln 2r_p \sin(i-1)\pi/n \right] = \quad , \quad (1.25) \\ &= \frac{1}{2\pi\epsilon_o} \ln \frac{2H_{1e}}{\sqrt[n]{r_o (2r_p)^{n-1} \prod_{i=2}^n \sin(i-1)\pi/n}}, \end{aligned}$$

де відстань між проводом, на поверхні якого обчислюється потенціал, і по черзі іншими дорівнює

$$d_{1i} = 2r_p \sin(i-1) \frac{\pi}{n} \quad (i = 2 \dots n); \quad (1.26)$$

$$\prod_{i=2}^n \sin(i-1) \frac{\pi}{n} = \frac{2}{2^{n-1}}. \quad (1.27)$$

Перепишемо формулу (3.6) у вигляді

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \alpha_{1i} \approx \frac{1}{2\pi\epsilon_o} \ln \frac{2H_{1e}}{\sqrt[n]{nr_o r_p^{n-1}}} = \frac{1}{2\pi\epsilon_o} \ln \frac{2H_{1e}}{r_p \sqrt[n]{\frac{nr_o}{r_p}}} \quad (1.28)$$

Порівняння формул (1.21) і (1.28) дозволяє зробити наступний висновок. Власний потенційний коефіцієнт розщепленого проводу при відносно малих його розмірах може бути обчислений в припущенні, що заряд всіх його складових розташований на одному проводі, вісь якого співпадає з віссю симетрії розщепленого проводу і з радіусом

$$r_e = \sqrt[n]{nr_o r_p^{n-1}} = r_p \sqrt[n]{\frac{nr_o}{r_p}}. \quad (1.29)$$

Цей радіус має назву еквівалентного радіусу розщепленого проводу. Слід спеціально відзначити, що такий одиночний провід є еквівалентним розщепленому тільки за електромагнітними характеристиками лінії. Наприклад, поверхня еквівалентного одиночного проводу на одиницю довжини лінії.

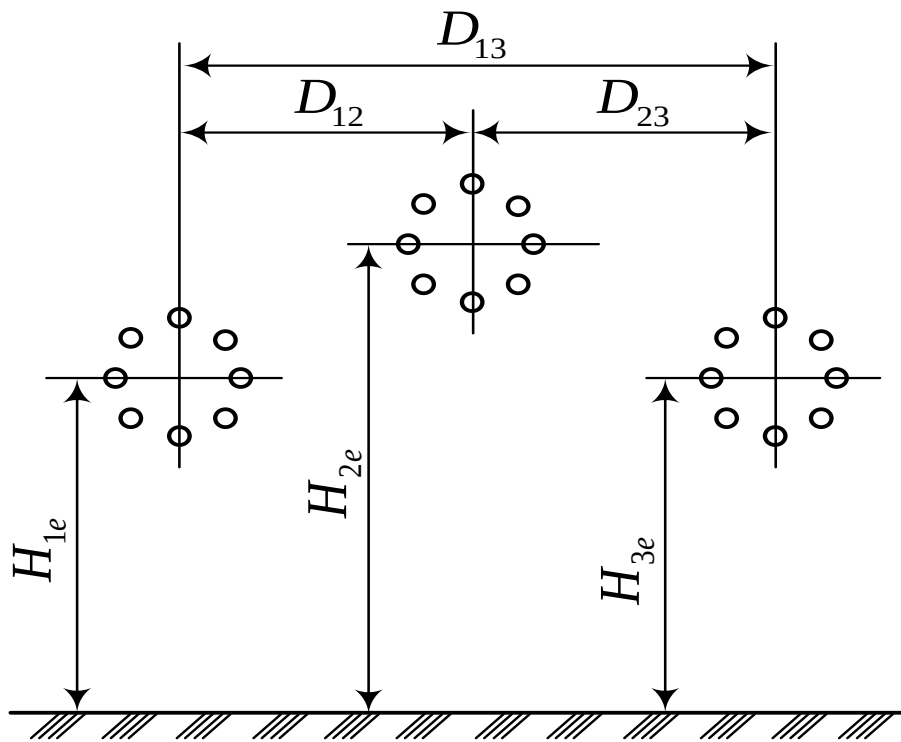


Рисунок 1.11 – До обчислення еквівалентного власного потенційного коефіцієнта розщепленого проводу

$$F_{n.e} = 2\pi r_e = 2\pi r_p \sqrt[n]{\frac{nr_o}{r_p}} \quad (1.30)$$

значно більша сумарної поверхні розщепленого проводу $F_n = 2\pi nr_o$. Дійсно,

радіус розщеплення $r_p \gg 3,3nr_0$, при цьому

$$F_{n,e} > 2\pi r_0 \cdot 3,3^{1-1/n} = 3,3^{1-1/n} F_{n,p},$$

тобто поверхня еквівалентного проводу перевищує сумарну поверхню розщепленого проводу більш ніж в $3,3^{1-1/n}$ рази. Тому тиск вітру, навантаження від ожеледі, початкова напруга корони на еквівалентному одиночному і розщепленому проводі істотно різні.

Замінивши всі розщеплені проводи еквівалентними одиночними проводами, можемо переписати систему потенційних рівнянь (1.20) у вигляді

$$U_k = \sum_{i=1}^n \alpha_{ki} q_i \quad (k=1, 2, 3), \quad (1.31)$$

де власний потенційний коефіцієнт α_{ij} обчислюється за формулою 1.32) при радіусі, обчисленому за формулою (1.29), а взаємний потенційний коефіцієнт обчислюється за формулою (1.22), де D_{ij} – відстані між осями симетрії даних розщеплених проводів.

Для трифазних ліній електропередавання розв'язок системи рівнянь одержуємо у вигляді

$$\dot{q}_1 = \left[(\alpha_{22}\alpha_{33} - \alpha_{23}^2) \dot{U}_1 + (\alpha_{23}\alpha_{13} - \alpha_{33}\alpha_{12}) \dot{U}_2 + (\alpha_{12}\alpha_{23} - \alpha_{22}\alpha_{13}) \dot{U}_3 \right] \Delta^{-1}; \quad (1.32)$$

$$\dot{q}_2 = \left[(\alpha_{23}\alpha_{13} - \alpha_{33}\alpha_{12}) \dot{U}_1 + (\alpha_{11}\alpha_{33} - \alpha_{13}^2) \dot{U}_2 + (\alpha_{12}\alpha_{13} - \alpha_{11}\alpha_{23}) \dot{U}_3 \right] \Delta^{-1}; \quad (1.33)$$

$$\dot{q}_3 = \left[(\alpha_{12}\alpha_{23} - \alpha_{22}\alpha_{13}) \dot{U}_1 + (\alpha_{12}\alpha_{13} - \alpha_{11}\alpha_{23}) \dot{U}_2 + (\alpha_{11}\alpha_{12} - \alpha_{12}^2) \dot{U}_3 \right] \Delta^{-1}; \quad (1.34)$$

$$\text{де} \quad \Delta = \alpha_{22}(\alpha_{12}\alpha_{22} - \alpha_{13}^2) + 2\alpha_{12}\alpha_{23}\alpha_{13} - \alpha_{11}\alpha_{23}^2 - \alpha_{33}\alpha_{12}^2. \quad (1.35)$$

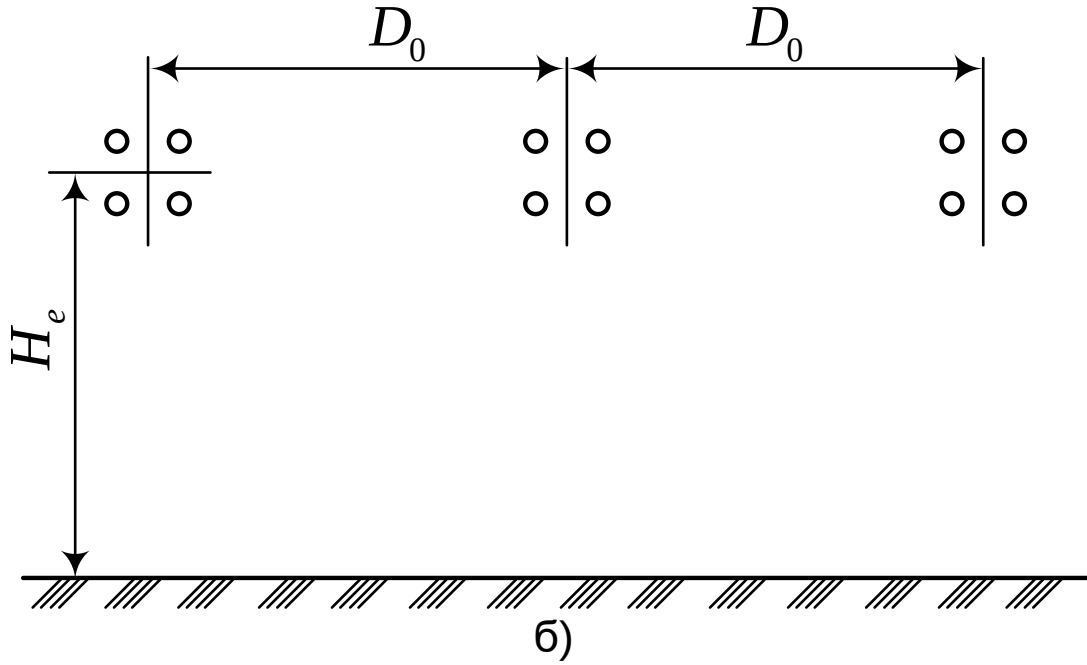


Рисунок 1.12 – Поперечний профіль лінії з горизонтальним розташуванням проводів

Для симетричного трифазного режиму система може бути написана в символічній формі. При цьому відношення комплексних величин заряду і напруги кожної з фаз згідно формулам (1.32) – (1.35) дорівнює:

$$\frac{\dot{g}_1}{\dot{U}_1} = \frac{1}{\Delta} \left[\alpha_{22}\alpha_{33} - \alpha_{23}^2 + \left(\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) (\alpha_{12}\alpha_{33} - \alpha_{23}\alpha_{13}) + \left(\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) (\alpha_{22}\alpha_{13} - \alpha_{12}\alpha_{23}) \right]; \quad (1.36)$$

$$\frac{\dot{g}_2}{\dot{U}_2} = \frac{1}{\Delta} \left[\alpha_{11}\alpha_{33} - \alpha_{13}^2 + \left(\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) (\alpha_{11}\alpha_{23} - \alpha_{12}\alpha_{13}) + \left(\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) (\alpha_{33}\alpha_{12} - \alpha_{23}\alpha_{13}) \right]; \quad (1.37)$$

$$\frac{\dot{g}_3}{\dot{U}_3} = \frac{1}{\Delta} \left[\alpha_{11}\alpha_{22} - \alpha_{12}^2 + \left(\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) (\alpha_{22}\alpha_{13} - \alpha_{12}\alpha_{23}) + \left(\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) (\alpha_{11}\alpha_{23} - \alpha_{12}\alpha_{13}) \right]; \quad (1.38)$$

Дійсні частини відносин $\dot{g}_k / \dot{U}_k$ є робочими ємностями відповідних фаз ПЛ. Уявні їх частини визначають складові струмів зсуву, що знаходяться у фазі і в протифазі з напругою.

При розташуванні проводів трьох фаз на однаковій відстані до землі (рис.

1.12) і однакових конструкціях всіх проводів всі власні потенційні коефіцієнти однакові ($\alpha_{11} = \alpha_{22} = \alpha_{33}$). Однакові також два взаємні потенційні коефіцієнти ($\alpha_{11} = \alpha_{22} = \alpha_{33}$). Тому для середньої фази згідно виразу (1.37) уявний член відсутній, і відношення $\dot{g}_2 / \dot{U}_2$ є робочою ємністю середньої фази:

$$C_2 = \frac{\alpha_{22} + \alpha_{12} + \alpha_{13}}{\alpha_{22}(\alpha_{22} + \alpha_{13}) - 2\alpha_{12}^2} = \frac{2\pi\epsilon_0 \ln \left[\frac{2H_e}{r_e} \sqrt{1 + \left(\frac{2H_e}{D_o} \right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{H_e}{D_o} \right)^2} \right]}{\ln \frac{2H_e}{r_e} \ln \left[\frac{2H_e}{r_e} \sqrt{1 + \left(\frac{H_e}{D_o} \right)^2} \right] - 2 \left[\ln \sqrt{1 + \left(\frac{2H_e}{D_o} \right)^2} \right]^2} \quad (1.39)$$

Робочі ємності крайніх фаз:

$$C_1 = C_3 = \frac{1}{2} \frac{\alpha_{11} - \alpha_{12}}{\alpha_{11} - \alpha_{13}} \frac{2\alpha_{11} + 3\alpha_{12} + \alpha_{13}}{\alpha_{11}(\alpha_{11} + \alpha_{13}) - 2\alpha_{12}^2} =$$

$$= \pi\epsilon_0 \frac{\ln \left[\frac{2H_e}{r_e} \frac{1}{\sqrt{1 + (2H_e/D_o)^2}} \right] \ln \left\{ \left(\frac{2H_e}{r_e} \right)^2 \left[1 + \left(\frac{2H_e}{r_e} \right)^2 \right]^{3/2} \sqrt{1 + \left(\frac{H_e}{D_o} \right)^2} \right\}}{\ln \left[\frac{2H_e}{r_e} \frac{1}{\sqrt{1 + (H_e/D_o)^2}} \right] \ln \frac{2H_e}{r_e} \ln \left[\frac{2H_e}{r_e} \sqrt{1 + \left(\frac{H_e}{D_o} \right)^2} \right] - 2 \left[\ln \sqrt{1 + \left(\frac{H_e}{D_o} \right)^2} \right]^2} \quad (1.40)$$

Активні провідності крайніх фаз

$$\frac{g_1}{\omega} = -\frac{g_3}{\omega} = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{\alpha_{11} + \alpha_{12}}{\alpha_{11} - \alpha_{13}} \frac{\alpha_{23} - \alpha_{13}}{\alpha_{11}(\alpha_{11} + \alpha_{13}) - 2\alpha_{12}^2} =$$

$$= \frac{\sqrt{3}\pi\epsilon_0}{\omega} \frac{\ln \frac{2H_e}{r_e} \sqrt{1 + \left(\frac{2H_e}{D_o} \right)^2} \ln \sqrt{\frac{1 + (2H_e/D_o)^2}{1 + (H_e/D_o)^2}}}{\ln \frac{2H_e}{r_e} \sqrt{1 + \left(\frac{H_e}{D_o} \right)^2} \ln \frac{2H_e}{r_e} \ln \left[\frac{2H_e}{r_e} \sqrt{1 + \left(\frac{H_e}{D_o} \right)^2} \right] - 2 \left[\ln \frac{2H_e}{r_e} \sqrt{1 + \left(\frac{2H_e}{D_o} \right)^2} \right]^2} \quad (1.41)$$

Таким чином, на лінії вказаної конструкції модулі зарядів крайніх фаз

$$q_{1m} = q_{3m} = \sqrt{C_1^2 + \left(\frac{g_1}{\omega}\right)^2} U_{1m} = C_1 U_m \sqrt{1 + \left(\frac{g_1}{\omega C_1}\right)^2} \quad (1.42)$$

перевершують амплітуду заряду робочої ємності фази. Активні провідності різних знаків на крайніх фазах означають, що в третій фазі відбувається втрата енергії в результаті передачі її першій фазі, яка повертає цю енергію джерелу. Іншими словами, в цьому випадку відбувається обмін енергіями між крайніми фазами. Цю обставину необхідно враховувати при значній відмінності взаємних потенційних коефіцієнтів, коли обмін енергіями між фазами може привести до протікання значного додаткового струму по проводах лінії і відповідно до додаткових втрат енергії на лінії.

Обчислення показують, що при відношенні $D_o/H_e < 1,3$ з достатньою точністю робоча ємність середньої фази лінії з горизонтальним розташуванням проводів ($H_{1e} = H_{2e} = H_{3e}$) може бути визначена за спрощеною формулою:

$$C_2 = 1,2 \cdot 2\pi\epsilon_o \left[\frac{1}{\ln \sqrt[3]{2} D_o/r_e} - 0,018 \right]. \quad (1.43)$$

Середня робоча ємність трифазної лінії

$$\bar{C} = (C_1 + C_2 + C_3)/3. \quad (1.44)$$

Наближена формула для середньої робочої ємності трифазної лінії з горизонтальним розташуванням проводів може бути одержана з системи рівнянь, припускаючи рівність всіх власних потенційних коефіцієнтів їх середньому геометричному значенню і аналогічно всіх взаємних потенційних коефіцієнтів

$$\bar{C} = \frac{2\pi\epsilon_o}{\ln \left\{ \frac{\sqrt[3]{2}D_o}{r_e} \frac{1}{\sqrt[3]{1 + \left(\frac{D_o}{2H_e}\right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{D_o}{H_e}\right)^2}} \right\}} \quad (1.45)$$

Якщо число складових і розміри всіх фаз однакові, то при рівності висоти їх підвіски робоча ємність середньої фази значно більше, ніж крайніх. Для вирівнювання робочих ємностей необхідно збільшити розміри крайніх фаз по відношенню до розмірів середньої фази або збільшити висоту підвіски середньої фази по відношенню до крайніх.

Для визначення індуктивності повітряної лінії візьмемо до уваги, що в кожній складовій проводу індукується не тільки ЕРС самоіндукції від струму, що протікає по проводу, але і ЕРС взаємоіндукції від струмів, що протікають по сусідніх проводах.

Індуктивність проводу з радіусом r_o завдовжки l з урахуванням внутрішньої індуктивності

$$Ll = \frac{\mu_o l}{2\pi} \left(\ln \frac{2l}{r_o} - 1 + \frac{\mu}{4\mu_o} \right). \quad (1.46)$$

Взаємна індуктивність двох проводів завдовжки l

$$M_{ik}l = \frac{\mu_o l}{2\pi} \left(\ln \frac{2l}{D_{ik}} - 1 \right), \quad (1.47)$$

де D_{ik} – відстань між проводами (див. рис. 3.1); $\mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7}$ – магнітна постійна; μ – магнітна проникність матеріалу проводів.

Падіння напруги вздовж i -ої складової проводу завдовжки l з урахуванням формул (1.46), (1.47)

$$\Delta U_i = R_i I_i + j\omega l \sum_{k=1}^{3n} M_{ik} I_k, \quad (i = 1 \dots 3n), \quad (1.48)$$

де при $i = k$ індуктивність M_{ii} треба визначати за формулою (3.29).

Падіння напруги вздовж всіх проводів однієї фази однакове ($\Delta U_1 = \Delta U_2 = \dots = \Delta U_n; \Delta U_{n+1} = \Delta U_{n+2} = \dots = \Delta U_{2n}$ і т.д.). Тому в загальному випадку струми в складових одного діаметру неоднакові через відмінність їх індуктивного зв'язку з сусідніми проводами. При цьому слід мати на увазі, що при передачі натуральної потужності між зарядом на одиницю довжини проводу і струмом в них існує певне співвідношення (2.3). Відмінність зарядів складових визначає і відмінність струмів в них.

Якщо в результаті розрахунків знайдено таке розташування складових, коли заряди і відповідно струми в них розподілені рівномірно, формула (1.48) може бути істотно спрощена. Приймаючи, наприклад, $I_i = I_1/n$ (I_1 – струм в першій фазі), згідно формулі (1.48) одержуємо падіння напруги в першій фазі ($R_1 = R_i/n$):

$$\begin{aligned} \Delta U_1 &= R_1 I_1 l + j \frac{\omega \mu_o l}{2\pi n} I_1 \left[\ln \frac{2l}{r_o} - 1 + \frac{\mu}{4\mu_o} + \sum_{i=2}^n \left(\ln \frac{2l}{D_{1i}} - 1 \right) \right] = \\ &= I_1 \left\{ R_1 l + j \frac{\omega \mu_o l}{2\pi n} \left[\ln \frac{(2l)^n}{r_o \prod_{i=2}^n D_{1i}} - n + \frac{\mu}{4\mu_o} \right] \right\} \end{aligned} \quad (1.49)$$

При розташуванні складових фази по колу з урахуванням співвідношень, які розглянули вище:

$$\Delta U_1 = I_1 l + \left\{ R_1 + j \frac{\omega \mu_o l}{2\pi n} \left[\ln \frac{2l}{r_p^n \sqrt[n]{\frac{n r_o}{r_p}}} - 1 + \frac{\mu}{4n\mu_o} \right] \right\} = I_1 l (R_1 + j\omega L_1). \quad (1.50)$$

Аналогічний вираз може бути одержаний і для двох інших фаз лінії. Порівняння виразу в квадратних дужках з формулою (1.46) дозволяє написати формулу для власної індуктивності лінії з розщепленими проводами:

$$Ll = \frac{\mu_o l}{2\pi} \left(\ln \frac{2l}{r_e} - 1 + \frac{\mu}{4\mu_o n} \right). \quad (1.51)$$

Як видно, внутрішня індуктивність розщепленого проводу обернено пропорційна числу складових у фазі n . Таким чином, розщеплений провід може бути замінений еквівалентним одиночним і при обчисленні індуктивності лінії.

Середня робоча індуктивність трифазної лінії може бути обчислена за формулою

$$\bar{L} = \frac{\mu_o}{2\pi} \left(\ln \frac{D_{cp.z}}{r_e} + \frac{\mu}{4\mu_o n} \right). \quad (1.52)$$

В формулі (1.52) для розщеплених проводів $\mu/4\mu_o n$ менше порівняно з логарифмічним членом. Нехтуючи цим виразом і використовуючи формулу (1.45) для середньої робочої ємності трифазної лінії, одержуємо формулу для середнього хвильового опору лінії:

$$z_e = \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_o}{\epsilon_o} \ln \frac{\sqrt[3]{2}D}{r_e} \ln \frac{\sqrt[3]{2}D}{r_e \sqrt[3]{1 + \left(\frac{D}{2H_e}\right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{D}{H_e}\right)^2}}}. \quad (1.53)$$

Врахування у формулі (1.53) впливу землі на хвильовий опір дає незначну поправку (в межах 2–3%). Тому для наближеної оцінки хвильового опору трифазної лінії з однаковою відстанню проводів до землі може бути одержана спрощена формула:

$$z_e \approx \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_o}{\epsilon_o}} \ln \frac{\sqrt[3]{2}D}{r_e} \approx 60 \ln \frac{\sqrt[3]{2}D}{\sqrt[n]{n r_o r_p^{n-1}}}. \quad (1.54)$$

З формул (1.53), (1.54) витікає, що хвильовий опір лінії зменшується при зменшенні відстані між фазами і при збільшенні радіусу розщеплення, числа і радіусу складових, причому найменший вплив має радіус складових.

Відповідно натуральна потужність лінії

$$P_n = \frac{3U_{\phi.n}^2}{z_\epsilon} \approx 6\pi \sqrt{\frac{\epsilon_o}{\mu_o}} \frac{U_{\phi.n}^2}{\ln \frac{\sqrt[3]{2}D}{r_e}} = \frac{U_{\phi.n}^2}{20 \ln \frac{\sqrt[3]{2}D}{r_e}} = \frac{U_{\phi.n}^2}{20 \ln \frac{\sqrt[3]{2}D}{\sqrt[n]{nr_o r_p^{n-1}}}} \quad (1.55)$$

збільшується при зменшенні відстані між фазами, збільшенні числа складових у фазі і радіусу розщеплення проводів.

Порівняння формул (2.20) і (3.38) дозволяє встановити необхідні значення D і r_p при яких забезпечується оптимальне використання поверхні проводів ($E_{\text{макс}} = E_{\text{дод.н}}$) при розташуванні їх складових по колу:

$$nr_o E_{\text{дод.н}} k_{\text{вик}} = \frac{U_{\phi.n}}{\ln \frac{\sqrt[3]{2}D}{\sqrt[n]{nr_o r_p^{n-1}}}} \quad \text{або} \quad r_p = \frac{1}{(nr_o)^{1/n-1}} \left[\sqrt[3]{2}D \exp\left(-\frac{U_{\phi.n}}{nr_o E_{\text{дод.н}} k_{\text{вик}}}\right) \right]^{n/n-1} \quad (1.56)$$

Звідси витікає, що для забезпечення оптимального використання поверхні проводів необхідно, щоб радіус розщеплення проводів швидко збільшувався при збільшенні числа складових у фазі (рис. 1.13). При зменшенні робочої напруги необхідний радіус розщеплення при заданому числі складових зменшується (рис. 1.13). При достатньо великих n радіус розщеплення пропорційний міжфазній відстані D . Така залежність необхідного значення r_p від n визначається збільшенням взаємного електростатичного впливу складових при збільшенні їх числа. Для його ослаблення необхідно істотно збільшити відстань між складовими. Оцінка швидкості розповсюдження електромагнітної хвилі вздовж трифазної лінії:

$$v_\epsilon = \frac{1}{\sqrt{LC}} \approx \frac{1}{\sqrt{\mu_o \epsilon_o}} \sqrt{\frac{\ln \left\{ \frac{\sqrt[3]{2}D}{r_e} \frac{1}{\sqrt[3]{1 + (D/2H_e)^2 \sqrt{1 + (D/H_e)^2}}} \right\}}{\ln \frac{\sqrt[3]{2}D}{r_e}}}. \quad (1.57)$$

Підкорінний вираз менше одиниці при будь-яких можливих відношеннях

D/H_e через різний вплив землі на електричне і магнітні поля лінії. Тому швидкість розповсюдження електромагнітної хвилі вздовж лінії v_e менша швидкості світла $v_e = 1/\sqrt{\mu_o \epsilon_o} \approx 3 \cdot 10^8$ м/с. Наприклад, для лінії класу напруги 750 кВ з проводом 5×АС 300/39 при $D_o = 17,5$ м і $H_e = 14$ м маємо $v_e = 0,97 v_c$.

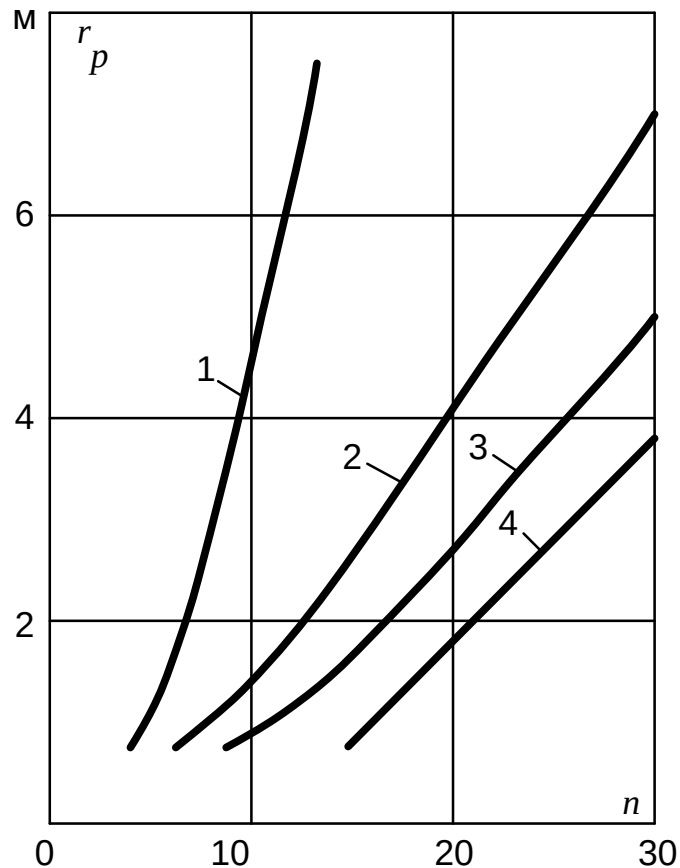


Рисунок 1.13 – Залежності необхідного для ефективного використання поверхні проводів радіусу розщеплювання r_p від числа складових у фазі при заданій відстані D_o між осями сусідніх фаз; 1 – ПЛ 330 кВ при $D_o = 9$ м; 2 – ПЛ 500 кВ при $D_o = 12$ м; 3 – ПЛ 750 кВ при $D_o = 17,5$ м; 4 – ПЛ 1150 кВ при $D_o = 23$ м

РОЗДІЛ 2 РОЗПОДІЛ НАПРУЖЕНОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ ПО ПОВЕРХНІ РОЗЩЕПЛЕНИХ ПРОВОДІВ

Вплив однойменних зарядів складових розщепленої фази призводить до нерівномірності розподілу зарядів і напруженості поля по поверхні складових.

При внесенні циліндричної поверхні в зовнішнє плоскопаралельне поле нормальна до поверхні складова напруженості поля подвоюється в порівнянні з напруженістю поля за відсутності циліндра. Тому напруженість поля на одному із n складових розщепленої фази може бути визначена як сума напруженості від власного заряду q_n і подвоєного значення нормальної до поверхні проводу (у довільній її точці) складової напруженості поля від всіх інших проводів фази

$$E = \frac{1}{2\pi\epsilon_0 r_o} \left[q_n - 2 \sum_{k=1}^{n-1} q_k \left(\frac{r_o}{d_{nk}} \right) \cos(\varphi - \psi_k) \right], \quad (2.1)$$

де φ – кут, відлічуваний від будь-якого напрямку вектора напруженості поля E ; ψ_k – кут між цим напрямком E і прямою, яка сполучає вісь n -го проводу, який розглядається, і k -го проводу (рис. 2.1).

Формула (2.1) дозволяє отримати розподіл напруженості поля по поверхні будь-якої складової (якому за бажанням може бути приписаний індекс n) в пучку довільно розташованих складових. Максимум складових напруженості поля від кожного з сусідніх складових досягається при $\varphi - \psi_k = \pi$. Проте при довільному числі і розташуванні складових напрям максимуму сумарного значення E передбачити не можна.

Для системи проводів, вісі яких розташовані в одній площині на однаковій відстані d (рис. 2.2) напрям максимальної напруженості наперед відомий – в площині розташування вісей. Приймаючи його за початок відліку кутів φ і ψ_k , одержуємо $\psi_k = \pi$ і

$$E = \frac{1}{2\pi\epsilon_0 r_o} \left[q_n + 2 \sum_{k=1}^{n-1} \frac{q_k r_o}{(n-k)d} \cos \varphi \right]. \quad (2.2)$$

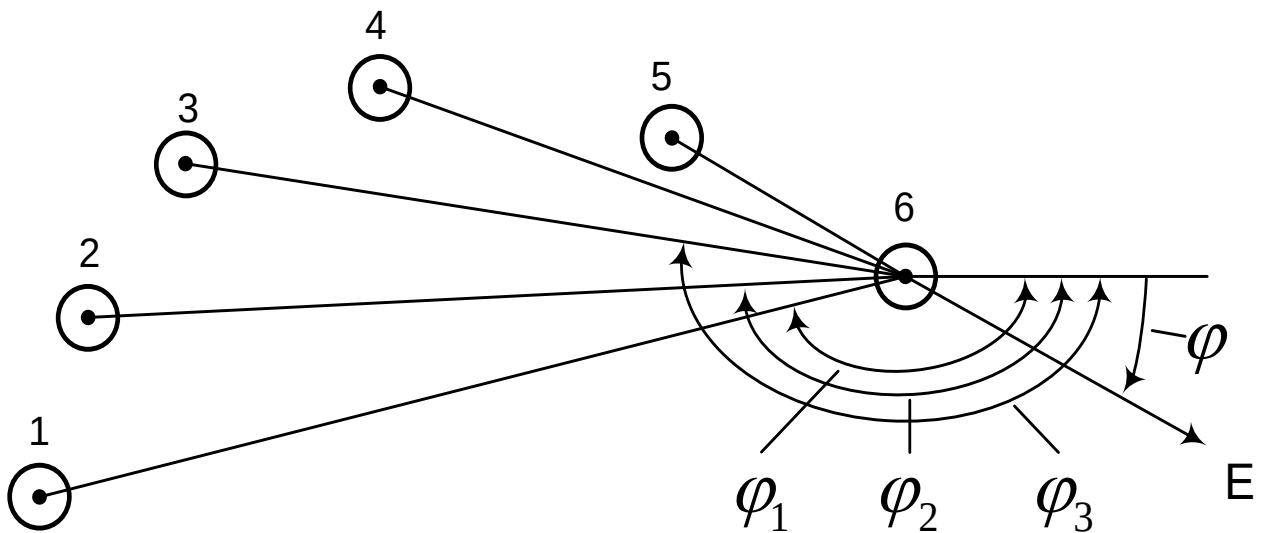


Рисунок 2.1 – До обчислення розподілу напруженості поля по поверхні складових розщепленого проводу

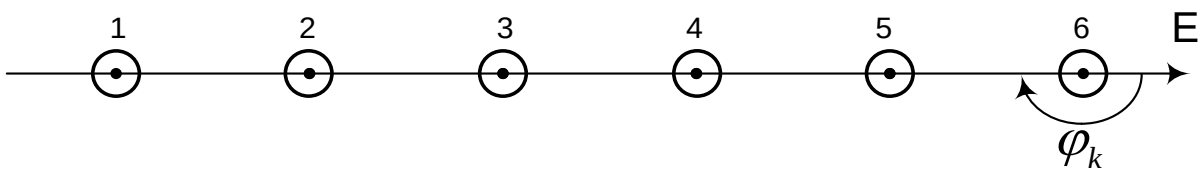


Рисунок 2.2 – Плоска фаза

Як видно, чим далі розташовані складові (чим більше $n - k$), тим менший вплив на напруженість поля вони мають. У іншому окремому випадку розташування проводів фази по колу останній висновок виявляється несправедливим. В цьому випадку напрям максимальної напруженості також відомий – в площині, проведеній через вісь симетрії фази і вісь кожного проводу. Приймаючи його за початок відліку кутів для n -ї складової, одержуємо (рис. 2.3)

$$\psi_k = \pi - \left(\frac{\pi}{2} - \frac{k\pi}{n} \right) = \frac{\pi}{2} + \frac{k\pi}{n}.$$

З рис. 4.3 виходить також, що $d_{nk} = 2r_p \sin(kn/n)$. (2.3)

Для будь-якого k -го проводу є симетричний щодо даного k -го проводу з кутом $\psi'_k = -\psi_k$. Складову напруженості поля від цієї пари проводів одержуємо згідно формулі (2.1):

$$2E(k) = -\frac{2q_k}{2\pi\epsilon_o} \frac{\cos(\varphi - \psi_k) + \cos(\varphi + \psi_k)}{2r_p \sin(k\pi/n)} = -\frac{2q_k}{2\pi\epsilon_o} \frac{\cos\varphi \cos\psi_k}{r_p \sin(k\pi/n)} = \\ = \frac{2q_k}{2\pi\epsilon_o} \frac{\cos\varphi}{r_p},$$

оскільки

$$\cos\psi_k = \cos\left(\frac{\pi}{2} + \frac{k\pi}{n}\right) = -\sin\frac{k\pi}{n}.$$

Складову напруженості на поверхні n -го проводу фази від одного k -го проводу

$$E(k) = \frac{q_k}{2\pi\epsilon_o r_p} \cos\varphi \quad (2.4)$$

не залежить від положення проводу по відношенню до того, що розглядається. Тому при розташуванні довільного числа проводів по колу розподіл напруженості поля описується формулою

$$E = \frac{q_o}{2\pi\epsilon_o r_o} \left[1 + (n-1) \frac{r_o}{r_p} \cos\varphi \right], \quad (2.5)$$

яка справедлива при однакових зарядах q_o на всіх складових.

Коефіцієнт нерівномірності, рівний відношенню максимальної напруженості до середньої

$$k_{np} = \frac{E_{\max}}{E_{cp}} = 1 + (n-1) \frac{r_o}{r_p}, \quad (2.6)$$

поступово наближається до одиниці при збільшенні радіусу розщеплення і

обмеженому числі складових n . Якщо ж збільшувати число складових n при незмінній відстані між сусідніми складовими

$$d = 2r_p \sin \frac{\pi}{n} \approx 2\pi \frac{r_p}{n}, \quad (2.7)$$

коефіцієнт нерівномірності

$$k_{np} = 1 + \frac{2\pi}{d} \frac{n-1}{n} \approx 1 + \frac{2\pi}{d} \quad (2.8)$$

мало залежить від числа складових у фазі.

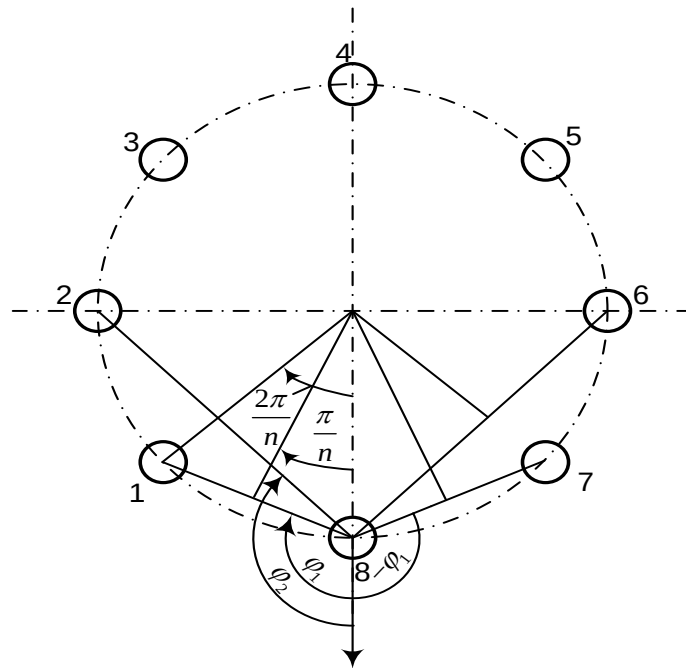


Рисунок 2.3 – До обчислення розподілу напруженості поля при розташуванні складових проводів по колу

Прирівнюючи максимальну напруженість на поверхні проводу початкової напруженості корони $E_{поч}$, одержуємо заряд на проводі, який відповідає початковій напрузі корони. Зокрема, при розташуванні проводів по колу

$$q_{oноч} = \frac{2\pi\varepsilon_o E_{ноч} r_o}{1 + (n-1)\frac{r_o}{r_p}} = \frac{2\pi\varepsilon_o E_{ноч} r_o}{k_{нр}}. \quad (2.9)$$

Звідси початкова напруга корони:

$$U_{ноч} = \frac{nq_{оноч}}{C} = \frac{2\pi\varepsilon_o n r_o E_{ноч}}{k_{нр} C} = \frac{2\pi\varepsilon_o v_\theta z_\theta r_o E_{ноч}}{k_{нр}}, \quad (2.10)$$

де C – робоча ємність фази; z_θ – хвильовий опір лінії.

Аналогічна формула може бути одержана для плоскої фази з формули (2.1):

$$E_{макс} = E_{ноч} = \frac{q_{ноч}}{2\pi\varepsilon_o r_o} \left[1 + 2 \sum_{k=1}^{n-1} \left(\frac{q_k}{q_n} \right) \frac{r_o}{(n-k)d} \right]; \quad (2.11)$$

$$q_{ноч} = \frac{2\pi\varepsilon_o r_o E_{ноч}}{1 + 2 \sum_{k=1}^{n-1} \left(\frac{q_k}{q_n} \right) \frac{r_o}{(n-k)d}} = \frac{2\pi\varepsilon_o r_o E_{ноч}}{k_{нр}} \quad (2.12)$$

$$U_{ноч} = \frac{q_{ноч} \left(1 + \sum_{k=1}^{n-1} \left(\frac{q_k}{q_n} \right) \right)}{C} = \frac{2\pi\varepsilon_o r_o E_{ноч} \left(1 + \sum_{k=1}^{n-1} \left(\frac{q_k}{q_n} \right) \right)}{k_{нр} C} \quad (2.13)$$

Відношення q_k/q_n визначаються для всіх проводів фази з рішення потенційних рівнянь.

У загальному випадку $1 + \sum_{k=1}^{n-1} \left(\frac{q_k}{q_n} \right) < n$. Проте, якщо розташувати складові на різних відстанях один від одного (рідше – у середині, густіше – до країв) і допустити зсув крайніх проводів щодо загальної площини розташування складових, можна добитися рівності $1 + \sum_{k=1}^{n-1} \left(\frac{q_k}{q_n} \right) = n$.

В цьому випадку формула (2.11) справедлива і для плоскої фази при підстановці відповідних значень k_{np} і C .

З формули (2.11) виходить, що початкова напруга корони пропорційна поверхні проводу $2\pi nr_o$ і обернено пропорційно до коефіцієнта нерівномірності і робочої ємності лінії. Величини k_{np} і C також залежать від параметрів проводів n, r_o . Як видно з формули (2.6), при збільшенні радіусу розщеплення r_p коефіцієнт нерівномірності k_{np} зменшується, досягаючи межі одиниці. З другого боку, робоча ємність лінії монотонно збільшується. Тому добуток $k_{np}C$ має мінімум при деякому радіусі розщеплення r_p^* .

Мінімум добутку $k_{np}C$ визначається згідно з формулою (2.11) максимум добутку nr_o при незмінній початковій напрузі корони $U_{поч}$ при радіусі розщеплення r_p^* . Причому незалежно від конструкції лінії і класу напруги відношення r_p^* до відповідного мінімального добутку nr_o виявляється постійним:

$$r_p^* / nr_o = 3,3. \quad (2.14)$$

Мінімальна поверхня проводу $F_n = 2\pi r_o$ при r_p^* визначає мінімальні вітрові і ожеледні навантаження від проводів на опори. Тому маса і вартість опор лінії з радіусом розщеплення $r_p^* = 3,3 nr_o$ мінімальні. Відповідно при заданому перерізі проводів досягається мінімальна вартість лінії в цілому.

Еквівалентний радіус розщепленого проводу мінімальної поверхні:

$$r_e = \frac{r_p}{\sqrt[n]{3,3}} = (3,3)^{1-1/n} nr_o. \quad (2.15)$$

В неявному вигляді залежність мінімального значення добутку nr_o від класу напруги і параметрів лінії:

$$(nr_o)_{\min} = \frac{(1+n-1/3,3n)U_{\phi.n}}{E_{\text{доп.н}} \ln \frac{\sqrt[3]{2D_o}}{3,3^{1-1/n}(nr_o)_{\min}} \frac{1}{\sqrt[3]{\left[1+(D_o/2H_o)^2\right]} \sqrt{1+(D_o/H_o)^2}}}. \quad (2.16)$$

Ця формула може бути використана для оцінки залежності мінімального числа складових у фазі заданого радіусу r_o від класу напруги (рис. 2.2). Нижня межа області значень $n_{\min} = f(U_{\text{л.н}})$ відповідає найпоширенішим в Україні конструкціям опор (портальні або V-подібні на відтяжках), верхня межа – мінімальним міжфазним відстаням, які визначаються умовою надійної роботи міжфазної ізоляції при виключенні можливості несинхронного гойдання проводів шляхом установки міжфазних ізоляційних розпірок. Як видно з рис. 2.5, залежно від міжфазної відстані D_o мінімальне число складових у фазі змінюється в широких межах. Відповідно в широких межах змінюється мінімальна натуральна потужність лінії (рис. 2.5), яка може бути одержана шляхом підстановки $(nr_o)_{\min}$ згідно (2.16):

$$P_{\text{н.мін}} = \frac{0,05U_{\phi.n}^2}{\ln \frac{\sqrt[3]{2D_o}}{3,3^{1-1/n}nr_o} \frac{1}{\sqrt[3]{\left[1+\left(\frac{D_o}{2H_e}\right)^2\right]} \sqrt{1+\left(\frac{D_o}{H_e}\right)^2}}}. \quad (2.17)$$

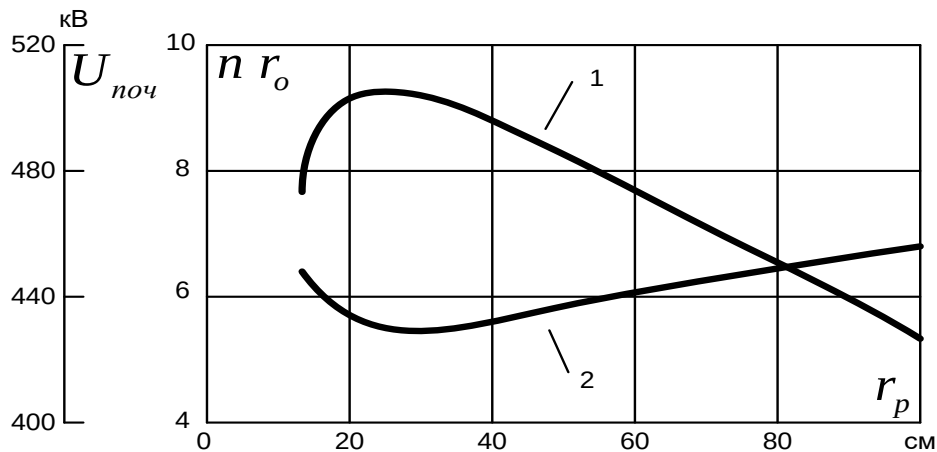


Рисунок 2.4 – Залежності від радіусу розщеплення початкової напруги корони (крива 1) при $nr_o = 6$ і добутку nr_o (крива 2) при $U_{поч} = 1,1U_{ф.поч} = 477$ кВ для ПЛ 750 кВ традиційного виконання ($D_o = 16,5$ м, $H_e = 17$ м)

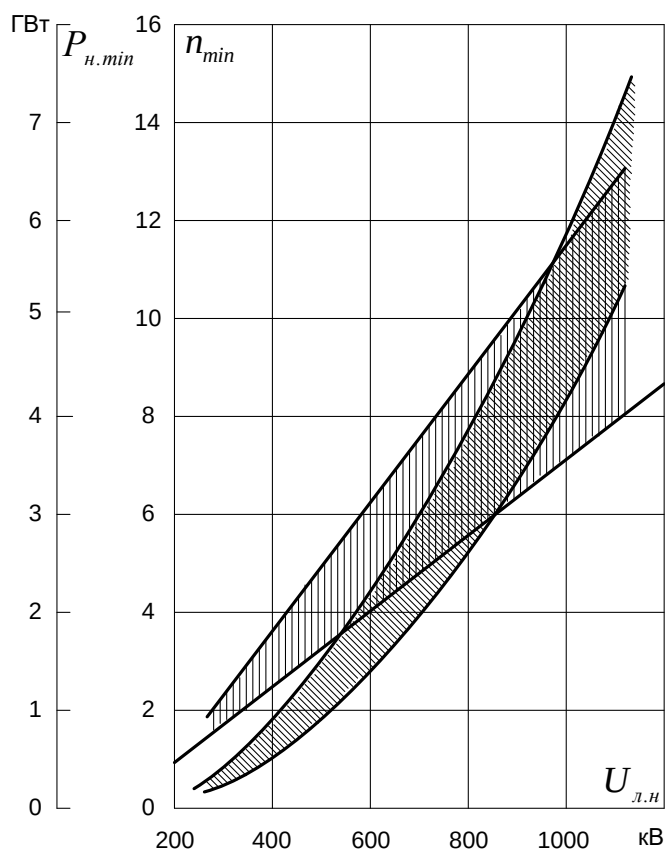


Рисунок 2.5 – Залежності мінімального числа складових n у фазі (крива 1) і мінімальної натуральної потужності (крива 2) від класу напруги при ефективному використуванні поверхні проводів мазкі АС 240/39

2.1 Коронний розряд. Характеристики втрат на корону і радіоперешкод

Іонізаційні процеси біля поверхні проводів повітряних ліній при робочій напрузі виникають у вузькій області значень напруженості поля при виконанні умови самостійності розряду. Ця форма розряду одержала назву коронного за чисто зовнішньою ознакою – блакитному ореолу, що слабо світиться в темноті,

поблизу проводів. Як правило, проводи ПЛ вибираються так, щоб максимальна напруженість на поверхні проводу при найбільшій робочій напрузі не перевершувала початкової напруженості коронного розряду. Проте нерівності на поверхні проводу через механічні пошкодження (скрутки, подряпини), забруднення (краплі мастила, тверді частинки), опадів (краплі дощу, роси, сніг, паморозь, ожеледь, іній) приводять до місцевого збільшення напруженості електричного поля. В результаті коронний розряд на проводах повітряних ліній виникає при напрузі, значно меншій, ніж початкова напруга самостійного розряду на чистих проводах з непошкодженою поверхнею. Такого типу коронний розряд одержав назву місцевого (місцева корона). Специфічна особливість місцевої корони – випадковість числа, форми і розмірів утворень на поверхні проводу, що є джерелом коронного розряду, виключає можливість строго математичного аналізу явища і визначення його характеристик розрахунковим шляхом. Ця обставина визначила необхідність ретельного експериментального дослідження місцевої корони на реальних проводах ліній, накопичення обширного експериментального матеріалу.

Утворення поблизу поверхні проводу і рух в його полі об'ємного заряду іонів призводить до втрат енергії. Втрати енергії визначаються передачею енергії прискорюваними полем іонами нейтральним молекулам газу, тобто мають теплову природу. Іншими словами, утворення і переміщення іонів поблизу проводів приводить до нагріву газу, незначному, зважаючи на малу густину струму в газі. Проте переміщення іонів за період напруги на відстань близько 1 м в сильному полі проводу викликає втрати, рівні десяткам кіловат на 1 км довжини лінії.

У роботі узагальнені результати виконаних в Україні експериментальних досліджень втрат від коронного розряду на дослідних прогонах лінії з одиночними і розщепленими проводами. Все різноманіття погодних умов ділиться на чотири групи: гарна погода (без опадів), дощ (включаючи мокрий сніг і мряку), сухий сніг і паморозь (включаючи ожеледь і іній). Середньорічні

втрати на корону для ліній електропередавання визначаються підсумовуванням втрат по групах погоди з урахуванням тривалості кожного виду погоди уздовж траси лінії:

$$\Delta P_k = \sum_{i=1}^4 \Delta P_{ki} \Psi_i, \quad (2.18)$$

де Ψ_i – відносна тривалість i -ї групи погоди за рік; ΔP_{ki} – середньорічна потужність втрат при i -й групі погоди.

Дані про тривалість різних груп погоди в годинах для України приведені в роботі.

Тривалість паморозі відносно мала. Проте надзвичайно великі втрати при цьому виді погоди призводять до того, що втрати при паморозі складають значну частину середньорічних втрат (до 50%). Тому облік паморозі є обов'язковим при визначенні середньорічних втрат на корону.

Місцева корона на проводах ПЛ виникає при напрузі, значно меншій, ніж початкова напруга корони U_{noch} . Проте початкова напруга коронного розряду на проводах є важливим параметром, який дозволяє узагальнити результати експериментальних досліджень втрат від коронного розряду на проводах різної конструкції і забезпечити можливість використання єдиної методики для оцінки середньорічних втрат на корону. При цьому по вимірних значеннях початкової напруги корони на одиночних проводах визначається умовне (розрахункове) значення початкової напруженості корони:

$$E_{noch} = \frac{CU_{noch}}{2\pi\epsilon_0 r_o} \quad (2.19)$$

де C – ємність проводу; r_o – його зовнішній радіус.

Ця величина E_{noch} відповідає реальній фізичній величині тільки для ідеально

гладкого і чистого проводу. У всіх інших випадках істинне значення максимальної напруженості (з урахуванням нерівності витих проводів, пошкоджень і забруднень) значно більше визначуваної за формулою (2.19).

Величина E_{noch} залежить від зовнішнього радіусу проводу, густини повітря і ступеня негладкості проводу:

$$E_{noch} = 17m_{не} \delta \left(1 + \frac{0,62}{\delta^{0,3} \delta_o^{0,38}} \right), \quad (2.20)$$

де $m_{не}$ – коефіцієнт негладкості поверхні проводу; E_{noch} – кВ/см.

Відносна густина повітря

$$\delta = \frac{p}{p_o} \frac{T}{T_o}, \quad (2.21)$$

де p і T – тиск і абсолютна температура повітря, $p_o = 760$ мм рт. ст. і $T_o = 293$ К – базові їх значення.

Для найпоширеніших сталевалюмінієвих проводів, зовнішня поверхня яких утворюється рядом алюмінієвих дротів круглого перерізу діаметром 3 – 4мм, $m_{не} = 0,82$.

Зв'язок між початковою напругою і початковою напруженістю корони на розщеплених проводах дещо ускладнюється через взаємний електростатичний вплив складових розщепленого проводу.

Для порівняння втрат на корону на проводах різної конструкції можна скористатися теорією подібності, згідно якої зв'язок між втратами на корону і напругою на лінії в критеріальній формі має вигляд:

$$\frac{\varepsilon_o \Delta P_k}{\omega q_{noch}^2} \approx \Theta \left(\frac{\varepsilon_o U}{q_{noch}} \right), \quad (2.22)$$

де $q_{noch} = CU_{noch}$ – заряд фази при початковій напрузі корони; ω – кутова частота

напруги; $\varepsilon_o = 1/4\pi \cdot 9 \cdot 10^9$ – електрична стала. Ліва частина залежності (2.22) є відносною величиною втрат на корону ΔP_k , однаковою в будь-якій коронуючій системі при незмінній величині правої частини, яка є відносною величиною напруги.

Підставляючи у формулу (2.22) заряд, одержуємо:

$$\frac{\varepsilon_o \Delta P_k}{\omega (C U_{поч})^2} \approx \Theta \left(\frac{\varepsilon_o}{C} \frac{U}{U_{поч}} \right), \quad (2.23)$$

звідки витікає, що за основу порівняння характеристик корони може бути прийняте відношення робочої напруги на лінії до початкової напруги корони.

Для геометрично подібних коронуючих систем ємність фази на одиницю довжини C однакова. В цьому випадку співвідношення (2.23) може бути переписане в спрощеній формі:

$$\frac{\Delta P_k}{\varepsilon_o \omega U_{поч}^2} \approx \Theta \left(\frac{U}{U_{поч}} \right), \quad (2.24)$$

Насправді повітряні лінії змінного струму створюються зовсім не за принципом геометричної подібності. Робочі ємності фаз ліній різного типу і класу розрізняються в 1,5–2 рази і більше. В цих умовах більш обґрунтованим є запис співвідношення між ΔP_k і U у формі (2.22), (2.23). Остаточний вибір форми запису критеріального співвідношення може бути створений тільки на основі обробки експериментальних даних з використанням критерію мінімуму розкиду узагальнених експериментальних даних. Обробка великого числа експериментальних даних, при обмеженні зміни відношення U/U_n межами $0,75 \leq U/U_{поч} \leq 0,95$, не дозволила виявити переваги форми узагальнення експериментальних даних, оскільки коефіцієнт варіації σ^* вимірянних значень від середнього в обох випадках приблизно однаковий (для гарної погоди, для сухого

снігу – 0,13, для дощу і мокрого снігу – 0,12, для паморозі 0,18 – 0,21). У зв'язку з цим будемо робити узагальнення експериментальних даних у формі (2.24), як простішої і апробованої.

Обробка експериментальних даних, дозволила встановити залежність для кожного з видів погоди у формі, зручній для використання при оптимізації конструкції проводів:

$$\frac{\Delta P_{ki}}{\varepsilon_o \omega U_{noch}^2} \approx A_i \left(\frac{U}{U_{noch}} \right)^{N_i}, \quad (2.25)$$

де, N – числові параметри.

Експериментальні дані про втрати на корону відносяться до області $U/U_{noch} < 0,85$. При цьому експериментальні дані для $0,60 \leq U/U_{noch} \leq 0,75$ істотно впливають на параметри A_i і N_i залежності (1.92), які визначаються методом найменших квадратів. Оскільки практичне значення мають дані про втрати в діапазоні зміни відношення U/U_{noch} : $0,75 \leq U/U_{noch} \leq 0,95$ – при визначенні параметрів A_i і N_i ; були використані експериментальні дані, одержані тільки в цьому діапазоні зміни U/U_n (рис. 2.6).

В таблиці 2.1 приведені параметри A_i і N_i апроксимуючих функцій.

Ці функції дозволяють визначити середньорічні втрати на корону за формулою (2.18) з урахуванням тривалості погоди кожної групи для заданого кліматичного району:

$$\begin{aligned} \Delta P_{ki} &= \varepsilon_o \omega U_{noch}^2 A_i \left(\frac{U}{U_{noch}} \right)^{N_i} = \frac{2\pi \cdot 50}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9} A_i \left(\frac{\overline{U}_\phi}{U_{noch}} \right)^{N_i-2} \overline{U}_\phi^2 = \\ &= 27,8 \cdot 10^{-10} A_i \overline{U}_\phi^2 \left(\frac{\overline{U}_\phi}{U_{noch}} \right)^{N_i-2}, \end{aligned} \quad (2.26)$$

де $\overline{U}_\phi$ – середня експлуатаційна фазна напруга.

Отже, середньорічні втрати на корону, віднесені до одиниці довжини однієї фази лінії:

$$\Delta P_k = 27,8 \cdot 10^{-10} \overline{U}_\phi^2 \sum_{i=1}^4 A_i \left(\frac{\overline{U}_\phi}{U_{noc}} \right)^{N_i-2} \Psi_i. \quad (2.27)$$

Формула (2.27) визначає середні річні втрати на корону на холодних проводах (без струму). При протіканні по проводах струму виникає різниця температур проводу і навколишнього повітря, що приводить до значного зменшення утворення неоднорідностей на поверхні проводів (голок паморозі, крапель дощу і т.п.). У зв'язку з цим втрати на корону зменшуються. Це зменшення може бути враховане множителем, який залежить від густини струму:

$$\Delta P_k = 27,8 \cdot 10^{-10} \overline{U}_\phi^2 \sum_{i=1}^4 A_i \left(\frac{\overline{U}_\phi}{U_{noc}} \right)^{N_i-2} \Psi_i \left[1 - 0,35(\overline{J} - 0,2) \right], \quad (2.28)$$

де $\overline{J}$ – середня густина струму в проводах лінії.

Таблиця 2.1 - Параметри A_i і N_i апроксимуючих функцій

Група погоди	A_i	N_i
Гарна погода	0,0201	9
Паморозь	0,2680	5
Дощ і мокрий сніг	0,1780	8
Сухий сніг	0,1010	13

При створенні уніфікованих конструкцій ліній доцільно орієнтуватися на усереднені дані втрат на корону. Середня тривалість різних груп погоди для України приведена в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 - Середня тривалість різних груп погоди для України

Група погоди	Середня тривалість групи погоди за рік, ч	Відносна тривалість групи погоди за рік, Ψ_{icp}
Гарна погода	7120	0,813
Сухий сніг	800	0,091
Дощ і мокрий сніг	500	0,057
Паморозь	340	0,039

При обчисленнях за усередненими тривалостями груп погоди доцільно перетворити апроксимуючі функції так, щоб для всіх груп погоди показник ступеня N був однаковий. Методом найменших квадратів підібрані такі апроксимуючі функції при показнику ступеня $N = 7$ (див. табл. 2.3).

Таблиця 2.3 - Апроксимуючі функції при показнику ступеня $N = 7$

Група погоди	A_i	$A_i \Psi_{icp}$	$\frac{A_i \Psi_{icp}}{\sum_{i=1}^4 A_i \Psi_{icp}}$
Гарна погода	0,012	0,010	0,30
Сухий сніг	0,030	0,0027	0,08
Дощ і мокрий сніг	0,130	0,0074	0,22
Паморозь	0,350	0,0136	0,40
$\sum_{i=1}^4 A_i \Psi_{icp} = 0,0337$			

З урахуванням даних таблиці 1.4. формулу (2.28) можна переписати:

$$\Delta P_k \approx 10^{-10} \overline{U_\phi^2} \left(\overline{U_\phi} / U_{ноч} \right)^5 \left[1 - 0,35 (\overline{J} - 0,2) \right]. \quad (2.29)$$

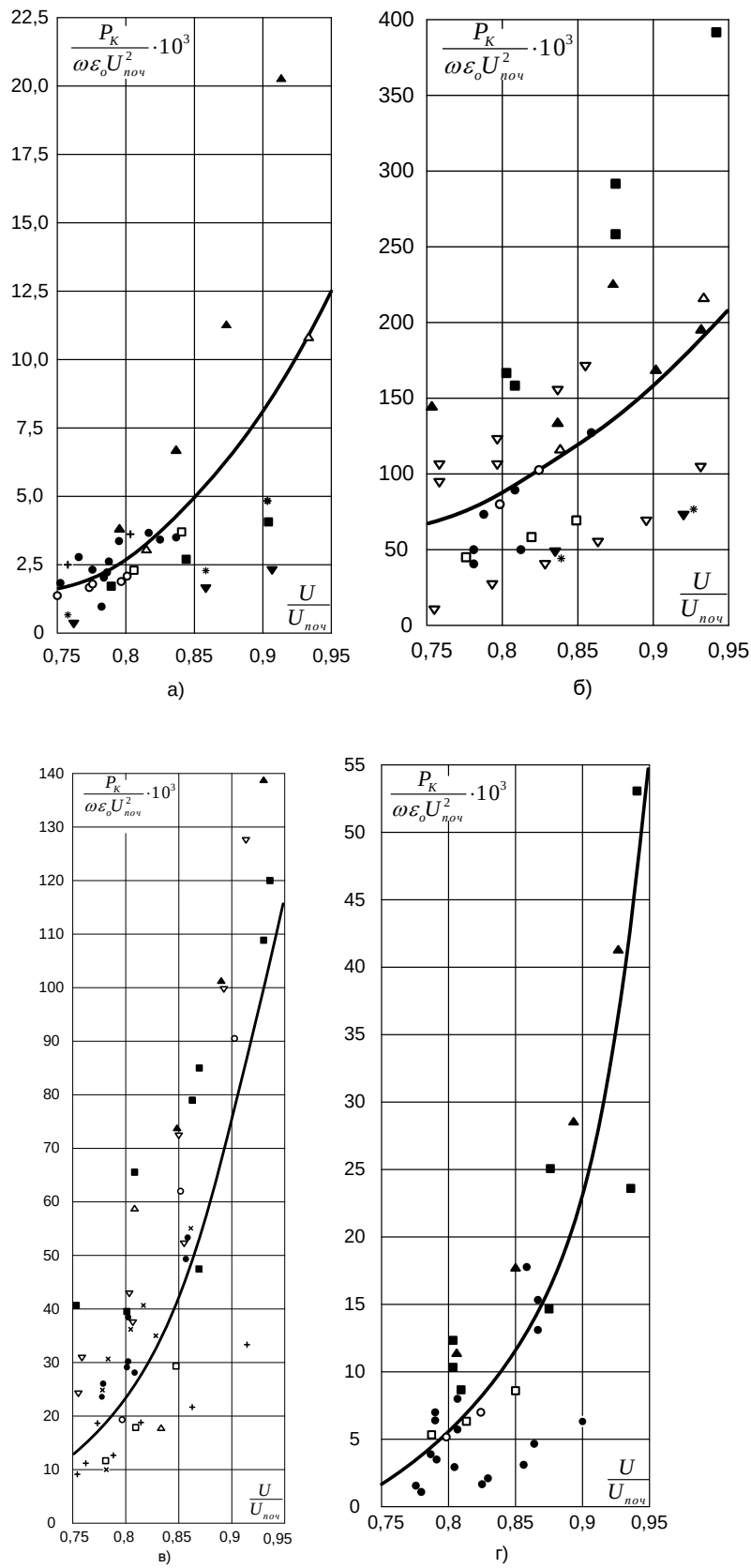


Рисунок 2.6 – Експериментальні точки і розрахункові залежності (суцільні

лінії) втрат на корону у відносних одиницях по відношенню напруги на проводі до початкової напруги корони: а – при гарній погоді; б – при паморозі; у – при дощі і мокрому снігу; г – при сухому снігу; для різних конструкцій проводів: АС 400/93 (▲); АС 700/86 (▲); 2хАС 330/43/400 (□); 2хАС 400/93/400 (■); 3хАС 330/43/400 (○); 3хАС 400/93/400 (●); 3хАС 400/93/600 (✕); 4хАС 400/93/600 (+); 4хАС 700/86/600 (▼); 4хАС 400/93/600 (▼); 5хАС 240/56/300 (*)

Для трифазної лінії середньорічна потужність втрат на корону визначається підсумовуванням втрат трьох фаз ліній з відповідними значеннями $U_{поч}$. З достатньою для практики точністю середньорічна потужність може бути обчислена виходячи з середньої за трьома фазами початкової напруги корони:

$$\bar{U}_{поч} = \frac{1}{3}(U_{поч1} + U_{поч2} + U_{поч3}). \quad (2.30)$$

Тоді середньорічні втрати на корону трифазної лінії

$$\Delta P_k \approx 3 \cdot 10^{-10} \bar{U}_\phi^2 \left(\bar{U}_\phi / \bar{U}_{поч} \right)^5 \left[1 - 0,35(\bar{J} - 0,2) \right]. \quad (2.31)$$

Як видно, середньорічні втрати на корону збільшуються пропорційно квадрату фазної напруги і при заданій робочій напрузі – пропорційно п'ятому ступеню відношення $\bar{U}_\phi / \bar{U}_{поч}$ (рис. 2.7). При збільшенні густини струму втрати на корону зменшуються, що пов'язано з нагріванням проводів.

Оскільки натуральна потужність ліній також збільшується пропорційно квадрату робочої напруги, відносні втрати на корону для лінії завдовжки l (у метрах)

$$\frac{\Delta P_k l}{P_n} \approx 10^{-10} z_\epsilon l \left(\bar{U}_\phi / \bar{U}_{поч} \right)^5 \left[1 - 0,35(\bar{J} - 0,2) \right]. \quad (2.32)$$

не залежать від класу напруги лінії (z_ϵ – хвильовий опір лінії).

Для ПЛ 330 – 1150 кВ з розщепленими проводами $z_{\epsilon} \leq 300$ Ом, тому для оцінки відносних втрат на корону приймемо $z_{\epsilon} = 250$ Ом. Відношення $\bar{U}_{\phi} / \bar{U}_{поч}$ приймається згідно ПУЕ рівним 0,9. Густина струму $\bar{J}$ приймемо рівною 1 А/мм², а довжину лінії підставлятимемо в тисячах кілометрів і позначимо l' . При цьому формула (2.31) набуває вигляду

$$\frac{\Delta P_k l'}{P_n} \approx 0,01 l'. \quad (2.33)$$

Помноживши чисельник і знаменник лівої частини цього співвідношення на потужність, що передається по лінії, одержуємо відношення середньорічних втрат на корону до переданої потужності:

$$\frac{\Delta P_k l'}{P_n} \approx 0,01 l' \frac{P_n}{P}, \quad (2.34)$$

звідки витікає, що відносні втрати на корону складають приблизно 1% від переданої потужності на кожну тисячу кілометрів лінії. При зменшенні відношення $\bar{U}_{\phi} / \bar{U}_{поч}$ від 0,9 до 0,8 (при збільшенні поверхні проводів всього на 15%) відносні втрати на корону згідно формулі (2.31) зменшуються до 0,5% переданої потужності на 1000 км довжини лінії.

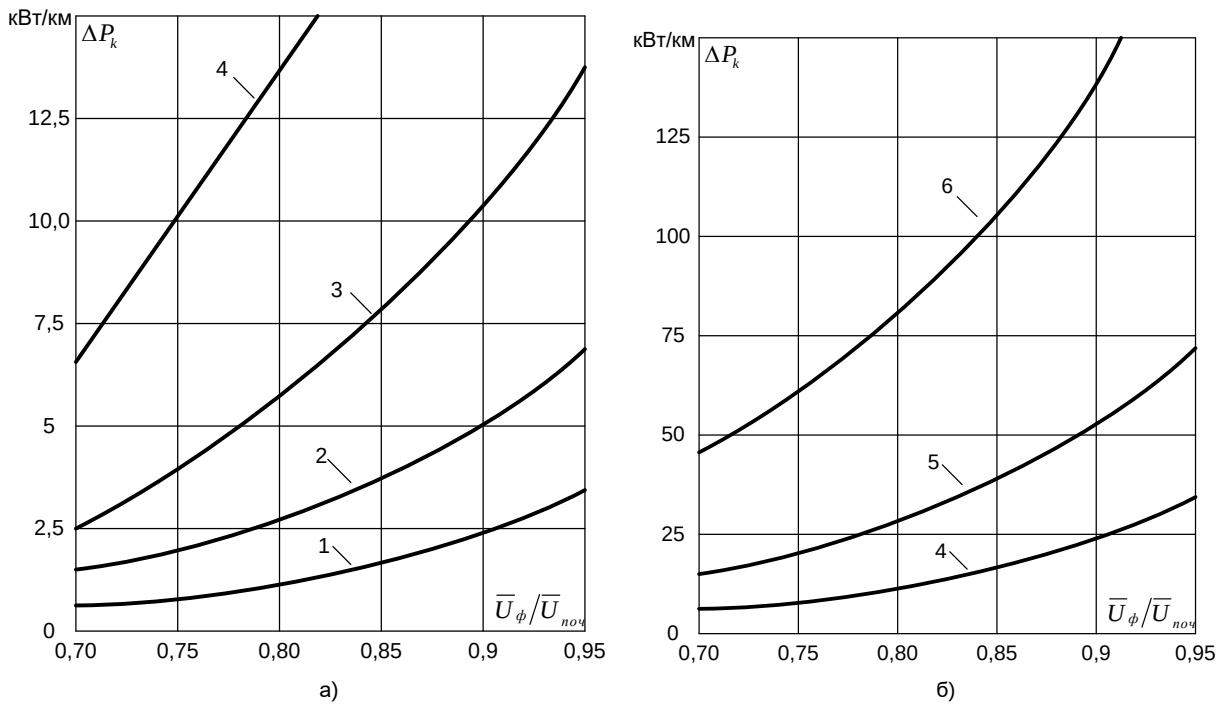


Рисунок 2.7 – Залежності середньорічних втрат на корону від $\bar{U}_\phi / \bar{U}_{\text{ноч}}$ для України при густині струму 1 А/мм² на ПЛ різних класів напруги: а – 220 – 750 кВ; б – 750 – 1800 кВ 1 – 220 кВ; 2 – 330 кВ, 3 – 500 кВ, 4 – 750 кВ, 5 – 1150 кВ, 6 – 1800 кВ

Втрати на корону мають один порядок величин з втратами на нагрівання проводів

$$\Delta P_{\text{наг}} = 3I^2 R = 3 \frac{\bar{U}_\phi^2}{z_g^2} \frac{\rho l}{F} \left(\frac{P}{P_n} \right)^2, \quad (2.35)$$

де ρ – питомий опір проводів; F – їх активний переріз;

$$I = \frac{U_\phi}{z_g} \frac{P}{P_n}$$

Відношення втрат на корону [формула (2.31)] до втрат на нагрівання проводів [формула (2.34)] не залежить від довжини лінії:

$$\frac{\Delta P_k}{\Delta P_{наг}} = 10^{-10} \frac{z_g^2 F}{\rho} \left(\frac{P_n}{P} \right)^2 \left(\frac{\bar{U}_\phi}{\bar{U}_{ноч}} \right)^5 \left[1 - 0,35(\bar{J} - 0,2) \right]. \quad (2.36)$$

Це відношення пропорційне квадрату хвильового опору і перерізу проводу F . Наприклад, для ПЛ 500 кВ традиційного виконання ($z_g = 270 \text{ Ом}$, 1000 мм^2) при $\rho = 28,3 \cdot 10^{-3} \text{ Ом.мм}^2/\text{м}$

$$\frac{\Delta P_k}{\Delta P_{наг}} = 0,26 \left(\frac{P_n}{P} \right)^2 \left(\frac{\bar{U}_\phi}{\bar{U}_{ноч}} \right)^5 \left[1 - 0,35(\bar{J} - 0,2) \right]. \quad (2.37)$$

При відношенні $P/P_n = 1$; $\bar{U}_\phi/\bar{U}_{ноч} = 0,9$ і $J = 1 \text{ А/мм}^2$ відношення втрат на корону до втрат на нагрівання складе 0,11 або 11%.

Слід зазначити, що потужність втрат на корону розподіляється протягом доби різко нерівномірно. Найбільші втрати відповідають інтервалу часу від 22 до 6 годин. На цей інтервал, що становить одну третю частину доби, доводиться половина втрат енергії за добу. Відбувається це через підвищену вогкість повітря вночі, сповільненого випаровування вологи з проводів, що сприяє утворенню і збереженню протягом тривалого часу крапель вологи на поверхні проводів.

Оскільки вночі споживання енергії (як промисловими підприємствами, так і в побуті) істотно зменшується, збільшення втрат на корону не вимагає збільшення встановленої потужності електростанцій, а тільки деякого збільшення вироблення на них енергії в години зменшення навантаження, тобто деякого збільшення споживання палива. Ця обставина враховується при визначенні вартості втрат енергії, внаслідок чого вартість втрат енергії на нагрів проводів і на корону виявляється різною.

Локальні розряди на поверхні проводів ПЛ не стабільні, але відбуваються у вигляді послідовних один за одним спалахів, що викликають протікання імпульсів струму розряду. При негативній полярності напруги ці спалахи мають тривалість порядку 10^{-8} с і амплітуду 10^{-2} А . При позитивній полярності напруги разом з аналогічними імпульсами спостерігаються і імпульси з амплітудою

порядку десятих часток ампера і тривалістю порядку десятих часток мікросекунди, що викликаються розвитком стримерів. Стримери розвиваються в сильному полі проводу із швидкістю 10^6 – 10^7 м/с і досягають довжини 3–5 см. Число позитивних і негативних зарядів (позитивних іонів і електронів) в стримері однакове за винятком кінчика стримеру, який містить невеликий позитивний заряд (рис. 2.8). Електрони рухаються вздовж стримеру з швидкістю приблизно 10^5 м/с, що призводить до утворення надмірного позитивного заряду, який як би просувається від кінчика стримеру до поверхні проводу (рис. 2.8). При вказаній довжині стримерів час утворення надмірного позитивного заряду складає 0,3–0,5 мкс.

Поява надмірного позитивного заряду пов'язана з протіканням струму зсуву в просторі, що оточує місце розвитку стримеру, і з протіканням струму вздовж проводу, що є причиною виникнення і розповсюдження вздовж лінії електромагнітної хвилі.

Позитивний об'ємний заряд, що утворився, переміщається від поверхні проводу із швидкістю $v \approx 2 \cdot 10^{-4}$ с, що поблизу поверхні проводу складає $(2 \div 6) \cdot 10^2$ м/с. Наступний стример розвивається тільки після усунення цього заряду із зони високої напруженості поблизу проводу.

Спектр електромагнітних хвиль, що розповсюджуються вздовж лінії (із загасанням), визначається інтегральним ефектом від усіх джерел стримерної корони. Він надзвичайно широкий (від сотень кілогерц до десятків мегагерц), що і є причиною виникнення проблеми радіоперешкод і перешкод у високочастотних каналах зв'язку ПЛ.

На рівень радіоперешкод впливає ряд чинників, основні з яких: радіус проводів, погодні умови, стан поверхні проводів.

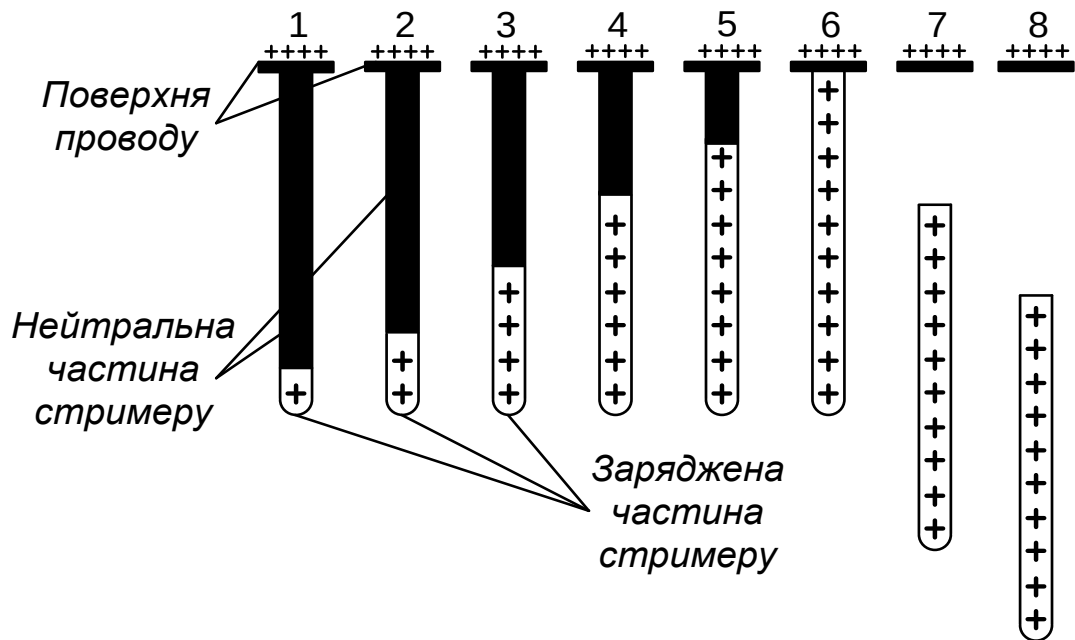


Рисунок 2.8 – Спрощена картина утворення об'ємного заряду в полі коронуючого проводу в послідовні моменти часу, відлічувані від моменту початку розвитку стримеру 1 – 0,05 мкс; 2 – 0,1 мкс; 3 – 0,2 мкс; 4 – 0,3 мкс; 5 – 0,4 мкс; 6 – 0,5 мкс; 7 – 50 мкс; 8 – 150 мкс

На практиці за даними досвіду експлуатації ПЛ напругою до 500 кВ включно скарги на ПЛ як джерело радіоперешкод виникають достатньо рідко і, як правило, при проходженні ПЛ безпосередньо по території населених пунктів. Лінії 750 і 1150 кВ взагалі не повинні наближатися до меж населених пунктів ближче, ніж на 300 м, тому у виняткових випадках, наприклад, при перетині трасою ПЛ протяжних населених пунктів, в проекти повинні закладатися засоби на пристрій виносних приймальних антен. Залежність діючого значення допустимої напруженості поля на поверхні проводів (кВ/см), при якій задовольняються вимоги по рівню радіоперешкод (при горизонтальному розташуванні фаз), від радіусу проводу r_o (см) має вигляд

$$E_{\text{дон. п. н.}} = 32 - 17,4 \ln gr_o. \quad (2.39)$$

При висоті місцевості над рівнем моря $H > 500$ м з величини $E_{\text{дон. п. н.}}$,

визначуваної формулою (2.39), виходить відняти величину $H/690$ (H – в метрах).

Збільшення числа однакових складових проводів у фазі приводить до збільшення сумарної поверхні проводу і відповідно числа джерел стримерної корони. Це явище повинне було б викликати збільшення рівня радіоперешкод. Проте наявність сусідніх складових приводить до придушення радіоперешкод від кожного з проводів внаслідок індукції в сусідніх проводах струмів, направлених проти струму, що викликав збурення електромагнітного поля (електромагнітне екранування). Сумарний ефект цих явищ і визначає незалежність рівня радіоперешкод від числа складових проводів у фазі, що підтверджене порівняльними вимірюваннями радіоперешкод на дослідних прогонах ПЛ з числом складових від 1 до 18. Цей результат має надзвичайно велике значення, оскільки означає, що при застосуванні на лініях електропередавання різних класів напруги однакових проводів при різному їх числі у фазі рівень радіоперешкод від лінії при збільшенні класу напруги не збільшується, якщо максимальна напруженість на поверхні проводів зберігається незмінною.

РОЗДІЛ 3 ВИБІР ПЛОЩІ ПЕРЕРІЗУ ПРОВОДІВ ПЛЕП 330 – 1150 КВ

При виборі конструкції розщепленого проводу необхідно виходити в основному з двох вимог – обмеження напруженості поля на поверхні проводу і передачі енергії при оптимальній густині струму. При заданому коефіцієнті заповнення перерізу χ_3 рівняння визначає оптимальний радіус проводів

$$r_o = 2\varepsilon_o \nu_\varepsilon \frac{E_{\text{доод.н}} k_{\text{вук}}}{J \chi_3} = \frac{1}{60\pi} \frac{E_{\text{доод.н}} k_{\text{вук}}}{J \chi_3}, \quad (3.1)$$

а отже, і площу перерізу складових

$$F_{oa} = \pi r_o^2 \chi_3 = \frac{1}{3600\pi} \frac{E_{\text{доод.н}}^2 k_{\text{вук}}^2}{J^2 \chi_3}. \quad (3.2)$$

З цих формул виходить, що оптимальний радіус проводу обернено пропорційний густині струму і збільшується пропорційно, а площа перерізу складових обернено пропорційна до квадрата оптимальної густини струму і збільшується пропорційно $k_{\text{вук}}^2$.

Необхідне число складових у фазі визначається з умови ефективного використання поверхні проводів з оптимальним радіусом складових:

$$\begin{aligned} n &= \frac{\bar{C} U_{\text{ф.н}}}{2\pi \varepsilon_o r_o E_{\text{доод.н}} k_{\text{вук}}} = \frac{U_{\text{ф.н}}}{2\pi \nu_\varepsilon} \frac{\bar{C}}{2\pi \varepsilon_o} \frac{J \chi_3}{(E_{\text{доод.н}} k_{\text{вук}})^2} \approx \frac{1}{(2\varepsilon_o \nu_\varepsilon)^2} \frac{U_{\text{ф.н}} J \chi_3}{\pi z_\varepsilon E_{\text{доод.н}}^2 k_{\text{вук}}^2} \approx \\ &\approx 1200\pi \frac{P_n}{U_{\text{ф.н}}} \frac{J \chi_3}{E_{\text{доод.н}}^2 k_{\text{вук}}^2}. \end{aligned} \quad (3.3)$$

Тут використана формула для виключення середньої робочої ємності, яка визначається геометричними параметрами лінії.

З формули (3.3) виходить, що число складових у фазі пропорційне робочій напрузі, середній робочій ємності лінії $\bar{C}$, оптимальної густини струму, коефіцієнту заповнення перерізу проводів, відношення натуральної потужності

до номінальної напруги лінії. Чим менше коефіцієнт використання поверхні проводів, тим більше потрібно складових проводів n .

Формули (3.1), (3.3) одержані з умов, справедливих при передачі по лінії натуральної потужності P_n . При передачі по лінії потужності P , відмінної від натуральної, повинен бути врахований додатковий множник P/P_n . При цьому

$$I = 2\pi\varepsilon_o\nu_enr_oE_{\text{дод.н}}k_{\text{вик}}\frac{P}{P_n} \approx \frac{1}{60\pi}nr_oE_{\text{дод.н}}k_{\text{вик}}\frac{P}{P_n}; \quad (3.4)$$

$$J = \frac{2\varepsilon_o\nu_e}{r_o\chi_3}E_{\text{дод.н}}k_{\text{вик}}\frac{P}{P_n} \approx \frac{1}{60\pi}\frac{E_{\text{дод.н}}k_{\text{вик}}}{r_o\chi_3}\frac{P}{P_n}. \quad (3.5)$$

З урахуванням (3.5) формули (3.1) – (3.3) приймуть вигляд

$$r_o = \frac{1}{60\pi}\frac{P}{P_n}\frac{E_{\text{дод.н}}k_{\text{вик}}}{J\chi_3}; \quad (3.6)$$

$$F_{oa} = \frac{1}{3600\pi}\left(\frac{P}{P_n}\right)^2\frac{E_{\text{дод.н}}^2k_{\text{вик}}^2}{J^2\chi_3}; \quad (3.7)$$

$$\begin{aligned} n &= 60U_{\phi.н}\frac{P}{P_n}\frac{\bar{C}}{2\varepsilon_o}\frac{J\chi_3}{E_{\text{дод.н}}^2k_{\text{вик}}^2} = \frac{60}{2\varepsilon_o\nu_B}\frac{U_{\phi.н}}{z_B}\frac{P}{P_n}\frac{J\chi_3}{E_{\text{дод.н}}^2k_{\text{вик}}^2} = \\ &= 1200\pi\frac{P_n}{U_{\phi.н}}\frac{P_n}{P}\frac{J\chi_3}{E_{\text{дод.н}}^2k_{\text{вик}}^2}. \end{aligned} \quad (3.8)$$

Таким чином, при передачі потужності понад натуральну радіус і переріз складових повинні збільшуватися, а число складових – зменшуватися. При цьому сумарна активна площа перерізу розщепленого проводу

$$F_a = nF_{oa} = n\pi r_o^2\chi_3 = P/(3U_{\phi.н}J). \quad (3.9)$$

Вартість лінії (віднесена до одиниці її довжини) визначається масою проводів, залежною від їх перерізу, і їх сумарною поверхнею, від якої залежать

вітрові і ожеледні навантаження на лінію і відповідно конструкція і маса опор і фундаментів

$$K_{BL} = K_0 + K_F F_a + K_{II} F_{II}, \quad (3.10)$$

де K_{II} – постійні коефіцієнти для лінії із заданою принциповою схемою опори, що збільшуються із зростанням номінальної напруги; F_{II} – поверхня проводів на одиницю довжини лінії, рівна

$$\begin{aligned} F_{II} = 2\pi n r_o &= \frac{\bar{C} U_{\phi.n}}{\varepsilon_o E_{\text{доп.н}} k_{\text{вик}}} = \frac{U_{\phi.n}}{\varepsilon_o \nu_{\phi} z_{\phi} E_{\text{доп.н}} k_{\text{вик}}} = \frac{1}{3\varepsilon_o \nu_{\phi}} \frac{P_n}{U_{\phi.n}} \frac{1}{E_{\text{доп.н}} k_{\text{вик}}} = \\ &= 40\pi \frac{P_n}{U_{\phi.n}} \frac{1}{E_{\text{доп.н}} k_{\text{вик}}}. \end{aligned} \quad (3.11)$$

Змінюючи число складових у фазі можна при заданому класі напруги (при виконанні умови $E_{\text{макс}} = E_{\text{доп.н}}$) довільно змінювати поверхню проводу і разом з тим натуральну потужність лінії.

При заданому класі напруги лінії натуральна потужність P_n визначається поверхнею проводу і ефективністю її використання. При оптимізації поверхні проводу потрібно виходити з найвигіднішого співвідношення між потужністю, яка передається, і натуральною потужністю незалежно від вибору площі перерізу проводу. Тому при оптимізації площі перерізу проводу площа його поверхні F_n може прийматися постійною. Принципова можливість такого підходу визначається незалежністю двох змінних у формулі (3.10) – активного перерізу проводів F_a і їх поверхні F_n . Якщо, наприклад, задати незмінною поверхню проводу $2\pi n r_o = F_{II} = \text{const}$ і підставити радіус $r_o = F_{II} / (2\pi n)$ у формулу для площі перерізу розщепленого проводу (3.9), то одержимо

$$F_a = F_{II}^2 \chi_z / (4\pi n). \quad (3.12)$$

Отже, при незмінній поверхні проводу його повна площа перерізу змінюється обернено пропорційно до числа складових у фазі. Така залежність обумовлена тим, що площа перерізу проводів фази залежить від числа складових в першому ступені, а від їх радіусу – в другому ступені. При збільшенні числа n необхідний радіус зменшується обернено пропорційно, що і приводить до зменшення площі перерізу проводів фази.

Якщо задати незмінною площу перерізу проводів фази $F_a = n\pi r_o^2 \chi_3$ і підставити радіус

$$r_o = \sqrt{F_a / (n\pi\chi_3)}$$

у формулу для поверхні проводів

$$F_{II} = 2\sqrt{nF_a\pi/\chi_3}, \quad (3.13)$$

то одержимо, що вона пропорційна квадратному кореню з числа проводів у фазі.

Таким чином, при заданому типі проводів (заданий χ_3) можна довільно змінювати площу перерізу проводів фази, змінюючи n і r_o , але зберігаючи незмінним їх добуток nr_o і, навпаки, можна довільно змінювати площу поверхні проводу, одночасно змінюючи n і r_o , але зберігаючи постійним добуток nr_o^2 і відповідно площу перерізу фази F_a .

Активна площа перерізу проводів фази і площа поверхні розщеплених проводів не залежать одна від одної, що дозволяє їх оптимізувати окремо. Як критерій для вибору параметрів проводів слід використовувати критерій мінімуму приведених витрат (приведених до одного року), що найповніше відображає витрати на створення промислового об'єкту. Оскільки на даному етапі оптимізується тільки площа перерізу проводу, то у формулі для приведених витрат необхідно врахувати всі складові, які залежать від площі перерізу проводу.

Приведені витрати на 1 км лінії, залежні від площі перерізу проводу:

$$Z_{ПЛ} = (E_n + \alpha_{ПЛ}) K_F F_a + \frac{3\rho}{F_a} I_{ср.кв}^2 \tau z_{e.n}, \quad (3.14)$$

де другий член визначає річні втрати енергії на нагрівання проводів; $\rho = 28,3 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{км}$ – питомий опір проводів; $I_{ср.кв}$ – середнє квадратичне значення струму уздовж лінії з урахуванням реактивного струму; τ – тривалість максимальних втрат в годинах, яка приблизно визначається залежно від числа годин максимального навантаження $T_{макс}$ за формулою

$$\tau = 8760 (0,124 + 10^{-4} T_{макс})^2; \quad (3.15)$$

$z_{e.n}$ – питома вартість втрат енергії на нагрівання проводів.

Математичний оптимум активної площі перерізу проводів визначається похідною

$$\frac{\partial Z_{ПЛ}}{\partial F_a} = (E_n + a_{ПЛ}) K_F - \frac{3\rho}{F_a^2} I_{ср.кв}^2 \tau z_{e.n} = 0,$$

звідки одержуємо оптимальну активну площу перерізу фази

$$F_{a.opt} = I_{ср.кв} \sqrt{\frac{3\rho \tau z_{e.n}}{K_F (E_n + a_{ПЛ})}} \quad (3.16)$$

і оптимальну густину струму

$$J_{opt} = \frac{I_{ср.кв}}{F_{a.opt}} \sqrt{\frac{K_F (E_n + a_{ПЛ})}{3\rho \tau z_{e.n}}} \quad (3.17)$$

З цих формул виходить, що при збільшенні вартості лінії, віднесеної до одиниці перерізу проводів K_F (наприклад, при зміні типу опор, кліматичних умов, цін на алюміній), оптимальна густина струму збільшується і відповідно площа оптимального перерізу проводів зменшується. При збільшенні часу максимальних втрат і вартості втрат енергії на нагрівання проводів, навпаки,

оптимальна густина струму зменшується, а площа оптимального перерізу проводів збільшується.

Необхідно відзначити, що при проектуванні ліній оцінки величин K_F , τ і $z_{e.n}$ можуть бути неточними через труднощі прогнозування зміни в часі вартісних (K_F , $z_{e.n}$) і режимних (τ і $I_{cp.kv}$) параметрів лінії електропередавання.

У зв'язку з цим і функція приведених витрат, що мінімізується, може бути обчислена лише з деякою похибкою ΔZ . В межах цієї похибки порівнювані варіанти конструкції лінії електропередавання невиразні в економічному відношенні або рівноекономічні. У зв'язку з цим при виборі площі перерізу проводів слід орієнтуватися не на математичний оптимум густини струму, а на зону її оптимальних значень, обмежену точками перетину кривої $Z = f(J)$ і прямої $Z_{min} + \Delta Z$ (рис. 3.1). На рис. 3.1 зону рівноекономічних значень густини струму визначено з оцінки похибки $\Delta Z / Z_{min} = 0,01$. Як видно, і при такій малій похибці зона оптимальних значень J виявляється достатньо широкою, в межах якої рівноекономічні значення J відрізняються від математичного оптимуму більш ніж на 10%.

Як показують численні розрахунки, приведена оцінка похибки обчислення приведених витрат (1%) і ширини зони оптимальних (рівноекономічних) значень густини струму виявляється достатньо об'єктивною і може бути рекомендована для використання в практиці проектування повітряних ліній. Відповідні дані про оптимальну густину струму для України приведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 - Оптимальна густина струма для України

Район	Рівноекономічна густина струму, А/мм ² , при, T_{max} °С				
	3000	4000	5000	6000	7000
Україна	0,94 – 1,19	0,81 – 1,02	0,71 – 0,89	0,62 – 0,78	0,56 – 0,70

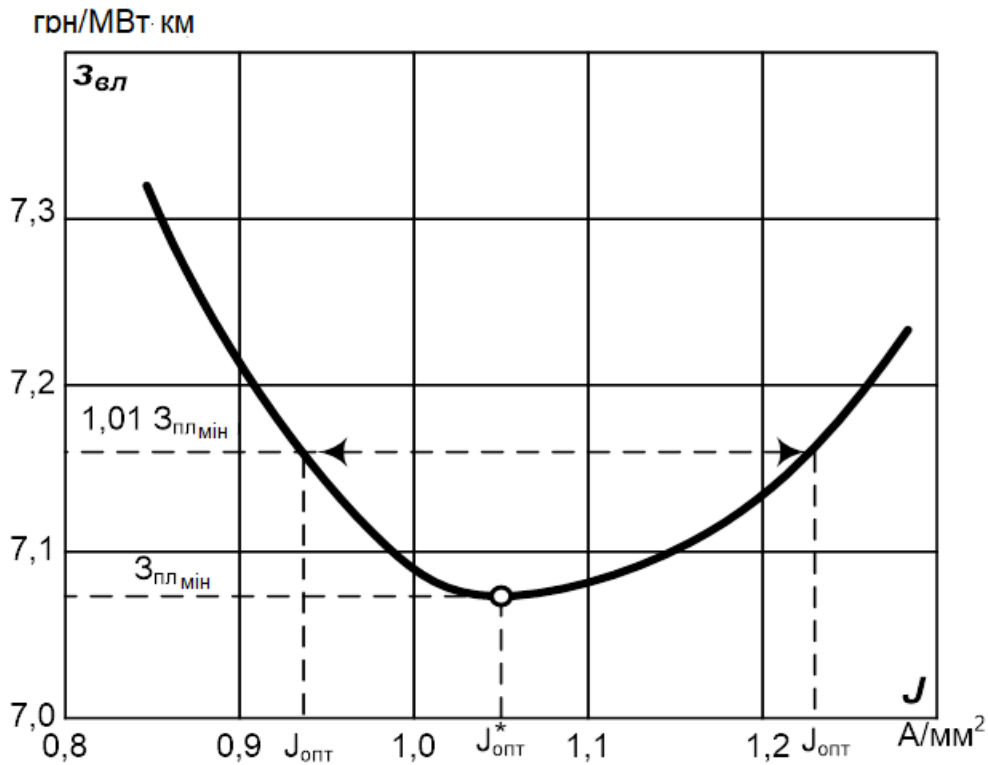


Рисунок 3.1 – Залежність питомих приведених витрат на споруду і експлуатацію ПЛ 750 кВ від густини струму для України

3.1 Вибір площі поверхні проводів ПЛ 330 – 1150 кВ

Площа поверхні проводу визначається чотирма параметрами лінії: робочою напругою, натуральною потужністю лінії, припустимою напруженістю електричного поля на поверхні проводів і коефіцієнтом використання останньої. Активна площа перерізу проводів визначається тільки потужністю, робочою напругою і економічною густиною струму. Тому площа поверхні і активна площа перерізу проводів виявляються зв'язаними певними вимогами. Їх відношення:

$$\frac{F_{\Pi}}{F_a} = \frac{2}{r_o \chi_z} = \frac{1}{r_o v_g} \frac{P_n}{P} \frac{J}{E_{доп.н} k_{вук}} \approx 120\pi \frac{P_n}{P} \frac{J}{E_{доп.н} k_{вук}} \quad (3.18)$$

визначається тільки добутком двох параметрів проводів, але, з другого боку,

залежить від деяких техніко-економічних параметрів лінії: відношення потужності навантаження до натуральної, економічної густини струму, напруженості поля на поверхні проводів і $k_{вук}$. Звідси очевидно, що може використовуватися не будь-який добуток, а лише той, що задовольняє формулі (3.18), з якої виходить, що для зменшення відношення P/P_n необхідно відповідно збільшувати відношення F_{II}/F_a . При збільшенні густини струму відношення F_{II}/F_a пропорційно збільшується. В обох випадках це досягається за рахунок зменшення радіусу складових r_o і відповідного збільшення числа складових у фазі n .

Допустима напруженість, визначається вимогою обмеження втрат на корону і радіоперешкод. Відповідно до даних, для ліній завдовжки до 2000км для обмеження втрат на корону достатньо прийняти $E_{доп.н} = 0,9E_{ноч}$. Величина $k_{вук}$ залежить від числа складових у фазі, їх розміщення в просторі (по колу, по прямій, по еліпсу) і при $E_{макс} = E_{доп.н}$ змінюється в межах $0,8 \leq k_{вук} \leq 1,0$.

Чим більше відношення F_{II}/F_a , тим більше відношення вітрових і ожеледних навантажень до навантаження від маси проводів. Це призводить до збільшення механічних навантажень, що впливають на опори і відповідно призводять до збільшення маси і вартості опор. Оскільки при використанні проводів з $\chi_3 = 0,61 \div 0,67$ (проводів нормального виконання) збільшення відношення F_{II}/F_a досягається тільки за рахунок зменшення радіусу складових, це призводить до зменшення довжин прогонів ліній і відповідно до збільшення числа опор на 1км лінії. З цих двох причин збільшення відношення F_{II}/F_a призводить до збільшення вартості 1 км лінії. Це збільшення при незмінній сумарній площі перерізу проводів фаз може бути оцінене за наближеною формулою:

$$\frac{\Delta K_{ВЛ}}{K_{ВЛ}} = 0,075 \left(\frac{n_2}{n_1} - 1 \right) \approx 0,075 \left(\frac{P_{n2}}{P_{n1}} - 1 \right), \quad (3.19)$$

де $\Delta K_{БЛ}$ – збільшення капітальних витрат на спорудження 1км лінії при збільшенні числа складових у фазі з n_1 до n_2 , $K_{БЛ}$ – капітальні витрати на спорудження 1км лінії з числом складових у фазі n_1 , $P_{н1}$ і $P_{н2}$ – натуральні потужності ліній з числом складових n_1 і n_2 відповідно.

Останнє перетворення у формулі (3.19) справедливе тільки за умови ефективного використання поверхні проводів в обох порівнюваних варіантах ліній, тобто у тому випадку, коли $k_{вук}$ в обох варіантах ліній приблизно однаковий.

Згідно формулі (3.19) при збільшенні натуральної потужності лінії вдвічі вартість лінії збільшується на 7,5 %, втричі – на 15 %, вчетверо – на 22,5 %.

З цієї причини освоєння повітряних ліній 330 – 1150 кВ спочатку було пов'язане з прагненням зменшити відношення $F_{П}/F_a$ за рахунок збільшення радіусу проводів r_o і відповідно площі перерізу одиничних проводів у фазі до 500–600 мм². Так, на перших лініях 500 кВ були підвішені проводи ЗАС 500/64, на дослідно-промисловій лінії 750 кВ – проводи 4АС 600/72.

Такий шлях поліпшення техніко-економічних показників повітряних ліній привів до негативного ефекту в енергосистемі і кінець кінцем до погіршення техніко-економічних показників лінії електропередавання. Дійсно, згідно формулі (3.18) збільшення радіусу складових приводить до збільшення відношення навантажувальної потужності до натуральної:

$$\frac{P_n}{P} = 60\pi \frac{r_o \chi_3 J}{E_{доп.н} k_{вук}} = 120\pi \frac{F_a}{F_{П}} \frac{J}{E_{доп.н} k_{вук}}. \quad (3.20)$$

Зміна відношення навантажувальної потужності до натуральної суттєво впливає на роботу електропередавання. При збільшенні P_n обернено пропорційно зменшується індуктивність лінії

$$L = z_{\epsilon} / \nu_{\epsilon} = 3U_{\phi.н}^2 / \nu_{\epsilon} P_n. \quad (3.21)$$

Тому при заданій навантажувальній потужності зменшується падіння напруги від робочого струму на індуктивності лінії

$$\Delta U_L = \omega L I l = \omega \frac{Z_\phi}{\omega} \frac{P}{P_n} I_n l = U_{\phi.n} \frac{P}{P_n} \lambda, \quad (3.22)$$

що, у свою чергу, призводить до зменшення перепаду напруги вздовж лінії

$$\frac{U_{\phi 1}}{U_{\phi 2}} = \left\{ \left[\cos \lambda + \frac{Q_2}{P_n} \sin \lambda \right]^2 + \left(\frac{P}{P_n} \right)^2 \sin^2 \lambda \right\}^{1/2}, \quad (3.23)$$

де Q_2 – реактивна потужність в кінці лінії, яка споживається шунтовим реактором або навантаженням.

Нарешті, при зменшенні відношення $k = I/I_n = P/P_n$ зменшується споживана лінією реактивна потужність

$$Q = P_n \left[\left(\frac{P}{P_n} \right)^2 - 1 \right] \lambda. \quad (3.24)$$

Споживана лінією реактивна потужність швидко збільшується при збільшенні відношення P/P_n і може у багато разів перевищити зарядну потужність лінії $Q_{el} = P_n \lambda$ (рис. 3.2).

Споживана лінією реактивна потужність повинна бути компенсована енергосистемою (генераторами, синхронними компенсаторами, батареями конденсаторів), оскільки в енергосистемі у всіх режимах повинен дотримуватися баланс реактивної потужності. У зв'язку з цим необхідно вирішити, що краще – передавати по лінії потужність, яка перевищує натуральну, і компенсувати споживану лінією реактивну потужність відповідними джерелами (ДРП), або збільшити натуральну потужність лінії до рівня навантажувальної і відмовитися від джерел реактивної потужності. Для вирішення цього питання обчислимо відношення вартості джерел реактивної потужності:

$$K_{ДРП} \approx k_{ДРП} P_n \left[\left(\frac{P}{P_n} \right)^2 - 1 \right] \frac{l}{1000} \quad (3.25)$$

до приросту вартості лінії для збільшення натуральної потужності від значення $P_{n1} = P_n$ до $P_{n2} = P$ відповідно формулі (3.25)

$$\frac{K_{ДРП}}{\Delta K_{ВЛ}} \approx \frac{k_{ДРП} P_n}{75 K_{ВЛ}} \left(\frac{P}{P_n} + 1 \right). \quad (3.26)$$

Експлуатаційні витрати на обслуговування повітряних ліній і устаткування підстанцій, у тому числі і компенсувальних пристроїв, різні. Для обліку цієї відмінності обчислимо приведені витрати на спорудження і експлуатацію лінії і ДРП. Без урахування втрат енергії:

$$\begin{aligned} \Delta Z_{ВЛ} &= (E_n + a_{ВЛ}) \Delta K_{ВЛ}; \\ Z_{ДРП} &= (E_n + a_{об}) K_{ДРП}; \end{aligned} \quad (3.27)$$

де $E_n = 0,12$; $a_{ВЛ} = 0,028$; $a_{об} = 0,084$.

Тоді відношення приведених витрат на спорудження і експлуатацію ДРП $Z_{ДРП}$ і на збільшення натуральної потужності лінії $\Delta Z_{ВЛ}$ (без втрат енергії):

$$\frac{Z_{ДРП}}{\Delta Z_{ВЛ}} = \frac{(E_n + a_{ВЛ})}{(E_n + a_{об})} \frac{K_{ДРП} P_n}{K_{ВЛ}} \left(\frac{P}{P_n} + 1 \right) \quad (3.28)$$

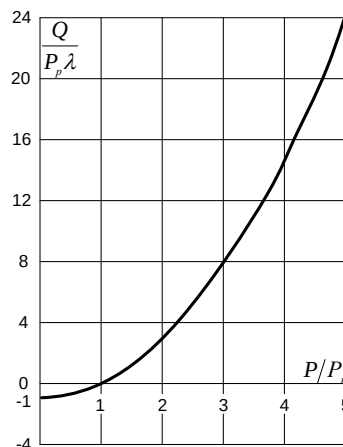


Рисунок 3.2 – Залежність відношення споживання лінією довільної довжини реактивної потужності до її зарядної потужності від відношення, потужності, що передається, до натуральної потужності лінії

пропорційне відношенню натуральної потужності лінії до вартості 1 км лінії і лінійно збільшується при збільшенні відношення P/P_n . Оскільки питома вартість ДРП (включаючи витрати на будівництво і монтаж) мало змінюється при зміні класу напруги ($k_{ДРП} \approx 7$ тис. гр./МВАр), натуральна потужність лінії збільшується пропорційно квадрату напруги, а вартість лінії збільшується значно повільніше, відношення $З_{ДРП}/\Delta Z_{ВЛ}$ швидко збільшується при збільшенні класу напруги (рис. 3.3).

При цьому для ПЛ $U_{л.н} \geq 220$ кВ відношення витрат $З_{ДРП}/\Delta Z_{ВЛ} = 1$. Це означає, що для ПЛ 330 – 1150 кВ економічно доцільніше передавати енергію в натуральному режимі, ніж створювати в енергосистемі додаткові джерела реактивної потужності для компенсації споживання її лініями.

Відмінність витрат на ДРП і на збільшення натуральної потужності лінії настільки велика, що можливі похибки оцінок вартісних показників і їх зміни не вплинуть на цей загальний висновок.

Виконаний аналіз дозволяє зробити однозначний висновок про необхідність вибору площі поверхні проводів з умови (3.18) при $P/P_n < 1$, коли

$$F_{\Pi}/F_a \geq 120\pi J / (E_{доп.н} k_{вук}); \quad (3.29)$$

$$r_o \leq \frac{1}{60\pi} \frac{E_{доп.н} k_{вук}}{J \chi_z}; \quad (3.30)$$

звідки витікає, що радіус складових повинен змінюватись пропорційно відношенню $k_{вук}/J$. Збільшення $k_{вук}$ приводить до збільшення оптимального радіусу складових, а збільшення розрахункової густини струму – до його зменшення (рис. 3.4). Як видно, при $k_{вук} = 0,8 \div 0,9$ (що відповідає багаторазово розщепленим дротам) і при оптимальній густині струму в межах $0,9 \leq J \leq 1,5$ А/мм² оптимальний діапазон зміни площі перерізу проводів $120 \leq F_{oa} \leq 400$ мм²

і їх діаметрів $15 \leq 2r_o \leq 29$ мм.

Збільшення площі перерізу фази відповідно до розрахункового струмового навантаження понад оптимальну площу перерізу одиничного проводу необхідно забезпечувати шляхом збільшення числа складових у фазі при відстані між складовими, яка забезпечує ефективне використання площі поверхні проводів.

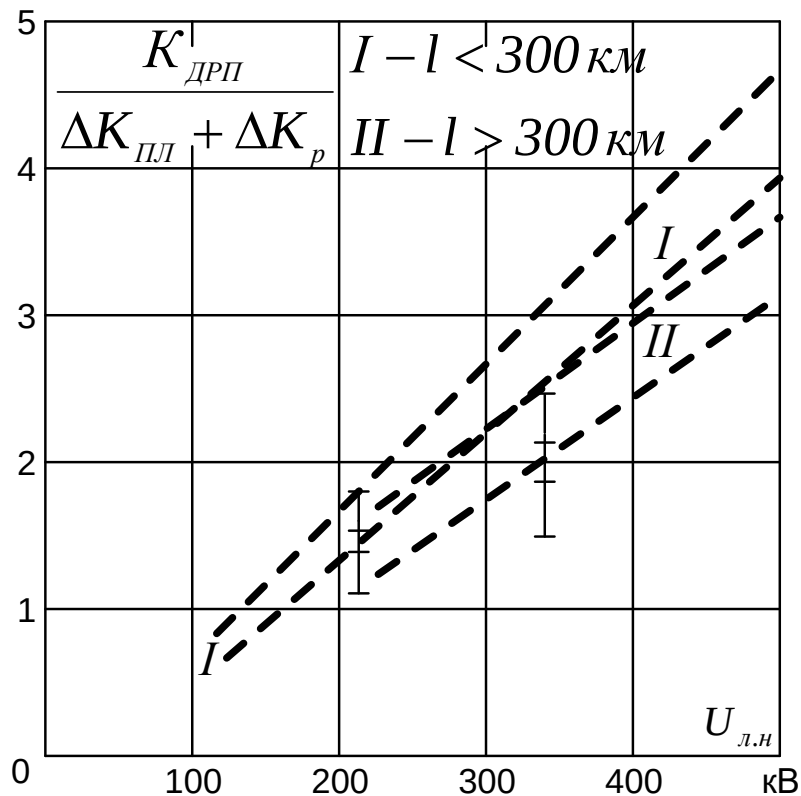


Рисунок 3.3 – Залежності відношення вартості ДРП до збільшення вартості ПЛ при передачі потужності в натуральному режимі від класу напруги ліній: 1 – $l < 300$ км; 2 – $l > 300$ км

Оптимальні параметри поверхні проводів можуть бути одержані, як і оптимальний активний переріз, шляхом мінімізації функції приведених витрат. Приведені витрати на спорудження ПЛ, залежать від площі поверхні проводів, визначаються капітальними витратами і витратами на джерела реактивної потужності і реактори для компенсації зарядної потужності лінії:

$$3 = (E_n + a_{БЛ}) K_{II} F_{II} l + (E_n + a_{об}) \left\{ k_{ДРП} P_n \left[\left(\frac{P}{P_n} \right)^2 - 1 \right] \frac{\omega l}{v_{\epsilon}} + k_p P_n \frac{\omega l}{v_{\epsilon}} \right\}, \quad (3.31)$$

де k_p – питома вартість потужності реактора.

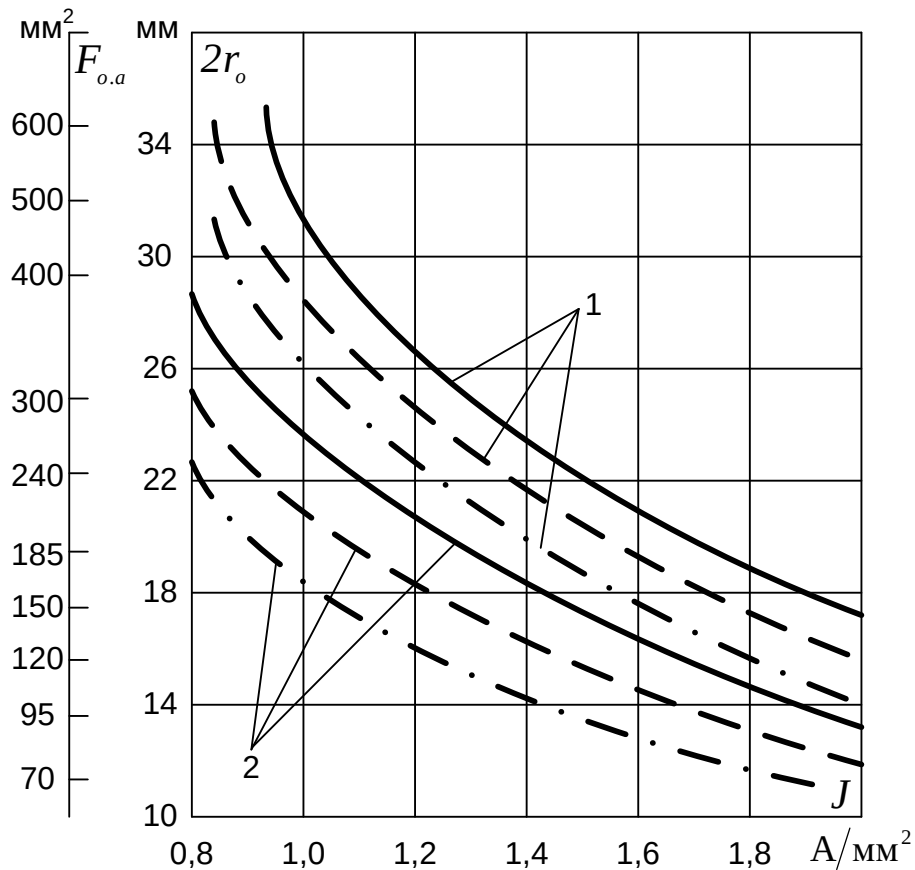


Рисунок 3.4 – Залежності оптимального діаметру і оптимального перерізу складових розщепленого проводу від оптимальної густини струму при відношенні повної потужності, що передається, до натуральної $P/P_n = 1$ (1) і 0,7 (2) при $k_{вук} = 1$ (суцільні лінії), $k_{вук} = 0,9$ (штрихові лінії) і $k_{вук} = 0,8$ (штрихпунктирні лінії) при $E_{макс} = E_{доп}$

Відношення навантажувальної потужності $P = 3U_{\phi} I$ до натуральної:

$$P/P_n = I / (\epsilon_o v_{\epsilon} F_{II} E_{доп} k_{вук}). \quad (3.32)$$

$$3 = (E_n + a_{BL}) K_{\Pi} F_{\Pi} l + (E_n + a_{ob}) 3\varepsilon_o \omega l U_{\phi.n} F_{\Pi} E_{\partial on} k_{вук} \times \\ \times \left\{ \left[\left(\frac{1}{\varepsilon_o \nu_{\varepsilon} E_{\partial on} k_{вук}} \right)^2 \left(\frac{I}{F_{\Pi}} \right)^2 - 1 \right] k_{ДРП} + k_p \right\}. \quad (3.33)$$

При збільшенні площі поверхні проводу перший член збільшується, а другий – зменшується. Тому функція витрат має екстремум. Прирівнюючи нулю похідну по поверхні проводу:

$$\frac{\partial 3}{\partial F_{\Pi}} = (E_n + a_{BL}) K_{\Pi} l - (E_n + a_{ob}) 3\varepsilon_o \omega l U_{\phi.n} E_{\partial on} k_{вук} \times \\ \times \left[\left(\frac{1}{\varepsilon_o \nu_{\varepsilon} E_{\partial on} k_{вук}} \right)^2 \left(\frac{I}{F_{\Pi}} \right)^2 k_{ДРП} + (k_{ДРП} - k_p) \right] = 0,$$

одержуємо

$$\left(\frac{1}{F_{\Pi}} \right)_{opt} = \varepsilon_o \nu_{\varepsilon} E_{\partial on} k_{вук} \sqrt{\frac{K_{\Pi} (E_n + a_{BL})}{K_{ДРП} (E_n + a_{ob})} \frac{1}{3\varepsilon_o \omega U_{\phi.n} E_{\partial on} k_{вук}}} - \left(1 - \frac{k_p}{k_{ДРП}} \right) \quad (3.34)$$

або

$$\left(\frac{P}{P_{\Pi}} \right)_{opt} = \sqrt{\frac{K_{\Pi} (E_n + a_{BL})}{K_{ДРП} (E_n + a_{ob})} \frac{1}{3\varepsilon_o \omega U_{\phi.n} E_{\partial on} k_{вук}}} - \left(1 - \frac{k_p}{k_{ДРП}} \right). \quad (3.35)$$

Таким чином, в результаті оптимізації площі поверхні проводу одержуємо оптимальне відношення навантажувальної потужності до натуральної, залежне від чотирьох параметрів: номінальної напруги, коефіцієнта $k_{вук}$ і відношень $K_{\Pi}/k_{ДРП}$ і $k_p/k_{ДРП}$. Оптимальне відношення P/P_n зменшується при збільшенні номінальної напруги, $k_{вук}$ і відношення $k_{ДРП} / K_{\Pi}$, а також при зменшенні відношення $k_p/k_{ДРП}$. Питома вартість реакторів k_p ($\sim 12,5$ гр./кВАр) в два-три рази менше $k_{ДРП}$ ($\sim 30 - 35$ гр./кВАр). Тому вираз в круглих дужках під коренем завжди позитивний і приблизно рівний 0,5.

Коефіцієнт K_{Π} залежить від типу опор, оскільки збільшення площі поверхні проводу і відповідно вітрового тиску вимагає посилення опор. Чим вони легші і дешевші, тим менший коефіцієнт K_{Π} , відповідно тим менше оптимальне відношення P/P_n . Зразкові значення коефіцієнтів K_{Π} для деяких типів ліній приведені в таблиці 3.2.

Розрахунки показали, що для ПЛ 330 кВ і вище $(P/P_n)_{opt} \leq 1$. Причому для ПЛ 1150 кВ $(P/P_n)_{opt} \approx 0,6$. Слід мати на увазі, що залежність функцій приведених витрат (1.138) від параметра, що оптимізується, поблизу мінімуму слабка. У зоні рівноекономічності ($1,023_{min}$) відношення $(P/P_n)_{opt}$ змінюється в межах $1 \pm 0,2$. Використовуючи найбільші крайні значення $(P/P_n)_{opt}$ для ПЛ вищих класів напруги, одержуємо діапазон зміни оптимальних значень $(P/P_n)_{opt}$ від 0,8 для ПЛ 1150 кВ до 1,0 – 1,5 для ПЛ 330 кВ на залізобетонних опорах.

Таблиця 3.2 - Зразкові значення коефіцієнтів K_{Π} для деяких типів ліній

Тип опори	K_{Π} , гр./м ²	$U_{л.н}$, кВ
Металева	225	330
Залізобетонна	155	
Металева	460	500
	485	750
	600	1150

Таким чином, обидва підходи до вибору площі поверхні проводів дають схожі результати.

РОЗДІЛ 4 ОПТИМІЗАЦІЯ РОЗТАШУВАННЯ ПРОВОДІВ В ПРОСТОРІ. ГРАНИЧНА НАТУРАЛЬНА ПОТУЖНІСТЬ ПЛЕП 330 – 1150 КВ

Нерівномірність розподілу напруженості поля по поверхні складових розщепленого проводу визначається відмінністю ємностей крайніх і середньої фази трифазної лінії, нерівномірністю розподілу зарядів по складових кожної фази (k_{np2}) і нерівномірністю розподілу напруженості поля по поверхні складових (k_{np3}). Величина k_{np1} може бути обчислена за формулою:

$$k_{np1} = 3C_{\text{макс}} / (C_1 + C_2 + C_3) = C_{\text{макс}} / \bar{C}, \quad (4.1)$$

де $C_{\text{макс}}$ – максимальна робоча ємність лінії; C_j ($j = 1, 2, 3$) – робочі ємності фаз лінії.

Коефіцієнт k_{np2} при розташуванні складових проводів по колу може бути визначений виходячи з уявлення про еквівалентний розщепленому одиночний провід з радіусом. Для двох таких проводів з відстанню між їх осями D_0 заряд на складових q_i може бути визначений відповідно до формули (4.1):

$$\frac{q_i n}{q} = 1 - 2 \frac{q_{\text{вн}} r_e}{q D_0} \cos(\varphi_i - \psi), \quad (4.2)$$

де q – сумарний заряд на даному розщепленому проводі; $q_{\text{вн}}$ – сумарний заряд сусіднього проводу з відповідним знаком; φ_i – кут, відлічуваний від довільно вибраного основного напрямку до напрямку на вісь i -ї складової; ψ – кут, відлічуваний від того ж основного напрямку до напрямку на вісь розщепленого проводу (рис. 4.1).

Для двох однакових і протилежно заряджених розщеплених проводів ($q_{\text{вн}} = -q$) відповідно до формули (4.2) відношення максимального заряду на складовій (при $\varphi_i - \psi = 0$) до середнього q/n дорівнює

$$k_{np2} = \frac{q_{i\max} n}{q} = 1 + 2 \frac{r_e}{D_o} = 1 + 2 \frac{r_p}{D_o} \sqrt[n]{\frac{nr_o}{r_p}}. \quad (4.3)$$

При збільшенні числа складових розщепленого проводу значення $\sqrt[n]{nr_o/r_p}$ наближається до одиниці. Тому при збільшенні числа складових n і відношення r_p/D_o збільшується k_{np2} . Наприклад, при $n=12, r_p/D_o=0,062$ коефіцієнт нерівномірності $k_{np2}=1,11$ порівняний з коефіцієнтом нерівномірності k_{np3} розподілу напруженості поля по поверхні кожної складової. Тому нехтувати коефіцієнтом k_{np2} неприпустимо.

Дуже важливо прослідити за зміною результуючого коефіцієнта нерівномірності

$$k_{np} = k_{np1} k_{np2} k_{np3}, \quad (4.4)$$

де k_{np3} визначається при зміні радіусу розщеплення проводів і міжфазної відстані.

При розташуванні складових розщепленого проводу по колу коефіцієнт k_{np3} визначається формулою (4.6). Для двопровідної лінії $k_{np1}=1$, тому без урахування впливу землі

$$k_{np} = \left(1 + 2 \frac{r_p}{D_o} \sqrt[n]{\frac{nr_o}{r_p}} \right) \left[1 + (n-1) \frac{r_o}{r_p} \right]. \quad (4.5)$$

Обчислення коефіцієнта нерівномірності трифазної лінії з урахуванням впливу землі виробляються аналогічно приведеному прикладу для двопровідної лінії. При однаковій відстані до землі трьох фаз одержуємо для крайніх проводів

$$k_{np2\text{ кр}} = 1 + \frac{3}{2} \frac{r_p}{D_o} \sqrt[n]{\frac{nr_o}{r_p}} \frac{\sqrt{1 + (D_o/2H_e)^6}}{1 + (D_o/H_e)^2} \quad (4.6)$$

і для середньої фази

$$k_{np2\text{ } \kappa p} = 1 + \frac{r_p}{H_e} - \frac{4H_e}{D_o} \frac{1}{1 + (2H_e/D_o)^2}. \quad (4.7)$$

Обчислені коефіцієнти нерівномірності k_{np2} і k_{np3} і їх добутки показані на рисунку 4.2. Як видно, при збільшенні числа складових n коефіцієнт k_{np} проходить через мінімум і при подальшому збільшенні n швидко зростає, досягаючи надзвичайно високих значень, абсолютно неприйнятних для створення повітряних ліній. При однакових радіусах розщеплювання проводів круглих фаз (при однакових розмірах фаз) на трифазних лініях з однаковою відстанню від проводів до землі заряди і сіна відповідально максимальна напруженість на поверхні складових крайніх фаз менше, ніж на поверхні середньої фази через відмінність робочих ємностей крайніх і середньої фаз, що визначає величину $k_{np1} > 1$.

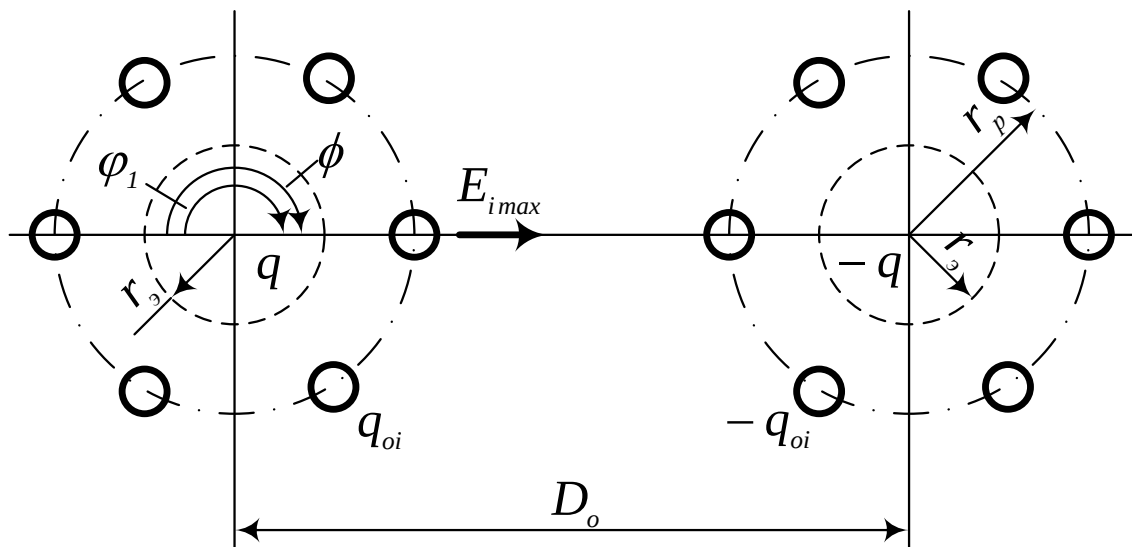


Рисунок 4.1 – До обчислення коефіцієнта нерівномірності розподілу зарядів по складових фази на прикладі двох сусідніх розщеплених проводів

При однаковій висоті підвіски всіх трьох фаз вирівнювання робочих ємностей трифазної лінії може бути досягнуте шляхом збільшення розмірів

крайніх фаз в порівнянні з розміром середньої фази. Визначення необхідних радіусів розщеплювання може бути здійснене вважаючи радіуси розщеплювання крайніх $r_{p.kp}$ і середньої $r_{p.cp}$ фаз різні. Оскільки зробити це достатньо просто, при подальшому викладі приймаємо $k_{np1}=1$. При цьому значенні k_{np1} на рис. 4.3 показані залежності від відношення числа складових до мінімального допустимого n_{min} при заданій відстані між фазами.

Як видно з рисунку 4.3, в широкому діапазоні зміни номінальної напруги і відстані між фазами максимум $k_{вик}$ поверхні проводів з круглими фазами, відповідний мінімум добутку $k_{np2}k_{np3}$ досягається при відношенні, що змінюється у вельми вузьких межах 1,2–1,3. При подальшому збільшенні відношення, коефіцієнт використання швидко зменшується. Таким чином, відношення

$$n/n_{min} \approx 1,25 \quad (4.8)$$

для круглих фаз є ще одним інваріантом, що визначає оптимальне використання поверхні проводів.

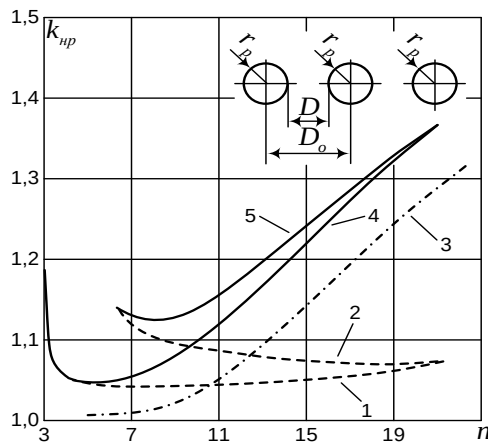


Рисунок 4.2 – Залежності коефіцієнта нерівномірності розподілу напруженості поля по складових розщеплених проводів ПЛ 500 кВ від числа складових у фазі 1,2 – k_{np3} ; 3 – k_{np2} ; 4,5 – $k_{np2}k_{np3}$ при $D_o = 12$ м (криві 1, 3, 4) при $D_o - 2r_p = 3,5$ м

(криві 2, 3, 5)

Оскільки $n_{\min}$ при збільшенні номінальної напруги і скороченні міжфазних відстаней збільшується, число складових, відповідне максимуму, може змінюватися в широких межах. Так, наприклад, для ПЛ 500 кВ при міжфазній відстані 12 м $n_{\min} = 3$. Відповідно максимальне значення $k_{\text{вук}}$ досягається при $n = 4$. При мінімальній ізоляційній відстані $D_o = 4\text{м}$ мінімальне число складових збільшується до п'яти. Відповідно максимум $k_{\text{вук}}$ в круглій фазі відповідає числу складових $n = 6$.

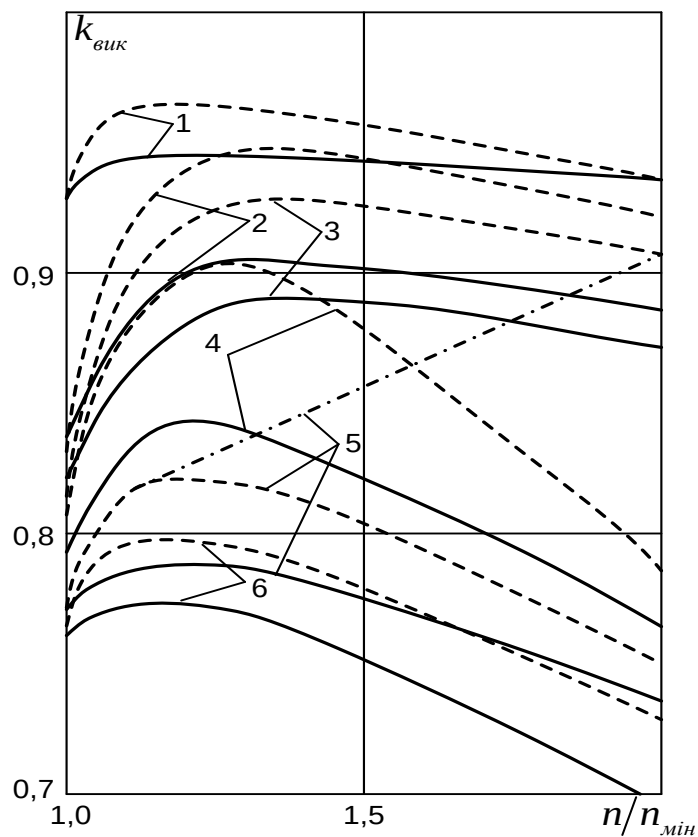


Рисунок 4.3 – Залежності коефіцієнта використання для ПЛ 330 (криві 1, 4), 500 (криві 2, 5) і 750 кВ (криві 3, 6) з проводами АС 240/39 від відношення $n/n_{\min}$ при $D_o = 9\text{м}$ (крива 1); 12м (крива 2); $17,5\text{м}$ (крива 3) і при $D_o - 2r_p = 2\text{м}$ (крива 4); $3,3\text{м}$ (крива 5) і $4,5\text{м}$ (крива 6) при однакових (суцільні лінії), оптимізованих розмірах круглих фаз (штрихові лінії) і еліпсоподібних фаз (штрихпунктирна лінія)

Нерівномірність розподілу зарядів по складових розщеплених проводів визначає і нерівномірність розподілу струмів по них. Тому вирівнювання розподілу зарядів по складових приведе не тільки до зменшення коефіцієнта нерівномірності k_{np} і, отже, до збільшення натуральної потужності лінії, але і до зменшення втрат енергії за рахунок вирівнювання розподілу струмів по складових фаз.

Таке вирівнювання розподілу зарядів і струмів по складових може бути здійснене шляхом деформації поверхні розташування проводів фази і оптимізації розподілу складових в ній. Виходячи з викладеного за критерій оптимізації розташування складових розщеплених проводів в просторі можна прийняти вирівнювання максимальної напруженості на складових.

Результати такої оптимізації для ПЛ 500 кВ з проводом 7хАС 240/56 при $D_o - 2r_p = 3,3$ м ілюструються на рис. 4.4. Оптимальне розташування проводів фаз істотно відмінне від початкового (по колу). Для середньої фази оптимальне розташування проводів близьке до еліптичного, а для крайніх – до відсічених із зовнішніх сторін еліпсів. Як видно з рис. 4.4, в результаті оптимізації розташування проводів істотно вирівнюється розподіл зарядів по складових фази (цифри на рисунку відповідають заряду на складових, віднесеному до граничного заряду одиночного проводу $q_{onm} = 2\pi\epsilon_o r_o E_{дон.н}$). При такому розташуванні проводів коефіцієнт $k_{np2} = 1,01$ на відміну від $k_{np2} = 1,14$ для круглих фаз. На практиці це означає, що натуральна потужність ПЛ з оптимальним розташуванням фаз може бути збільшена на 13 % в порівнянні з круглими фазами.

Одночасно одержаний інший істотний результат: горизонтальний габарит лінії, зміряний між крайніми складовими лінії, скоротився на 3м при збільшенні вертикального габариту на 1,4 м. Таке скорочення об'єму, займаного лінією, дозволяє значно скоротити розміри і відповідно масу опор, що визначає додаткову перевагу ПЛЕП з оптимальними фазами.

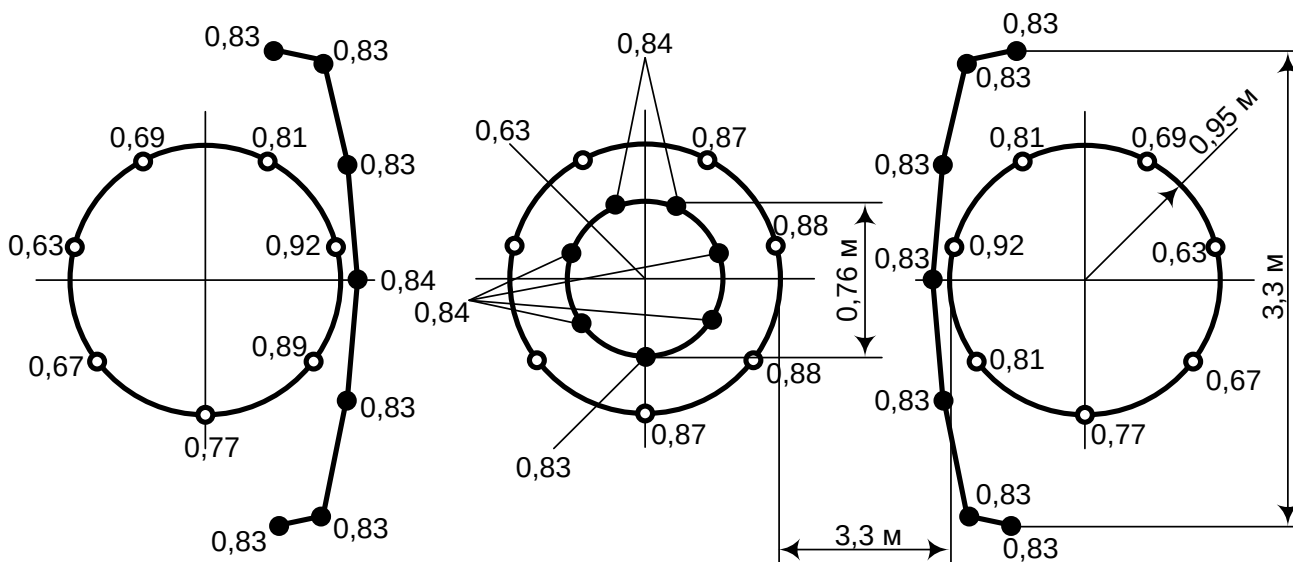


Рисунок 4.4 – Розташування проводів ПЛ 500 кВ компактного виконання:

○ – круглі фази; ● – еліпсоподібні фази

Для ПЛ з еліпсоподібними фазами коефіцієнт використання монотонно збільшується при збільшенні числа складових у фазі (рис. 4.3, штрихпунктирна лінія), досягаючи надзвичайно високих значень, що дозволяє значно збільшити натуральну потужність ліній в порівнянні з ПЛ з круглими фазами, наближаючи її до граничної натуральної потужності ПЛ. Це останнє поняття (гранична натуральна потужність $P_{н.доп}$) безпосередньо виходить при $k_{вик} = 1$, тобто при повному використанні поверхні проводів:

$$P_{н.пред} = 3\varepsilon_o \nu_v F_{П} E_{доп.н} U_{ф.н} = 0,05 n r_o E_{доп.н} U_{ф.н}. \quad (4.9)$$

Таким чином, гранична натуральна потужність визначається робочою напругою, радіусом проводу і числом складових у фазі. При заданих $U_{ф.н}$ і r_o гранична натуральна потужність пропорційна числу складових у фазі.

РОЗДІЛ 5 ОХОРОНА ПРАЦІ

У цьому розділі розглянуто питання охорони праці, що стосуються робіт з монтажу та експлуатації опор і проводів повітряних ліній електропередавання. На будівельно-монтажний та оперативно-ремонтний електротехнічний персонал, що здійснює монтаж та експлуатацію обладнання повітряних ліній електропередавання, впливають такі фізичні, хімічні та трудового процесу небезпечні та шкідливі виробничі фактори [21, 22].

Фізичні фактори: мікроклімат (температура, вологість, швидкість руху повітря, інфрачервоне випромінювання); виробничий шум, ультразвук, інфразвук; вібрація (локальна, загальна); освітлення: природне (недостатність), штучне (недостатня освітленість, прямий і відбитий сліпучий відблиск тощо); іонізація повітря.

Хімічні фактори: речовини хімічного походження, аерозолі фіброгенної дії (пил).

Фактори трудового процесу: важкість (тяжкість) праці; напруженість праці. Важкість праці характеризується рівнем загальних енергозатрат організму або фізичним динамічним навантаженням, масою вантажу, що піднімається і переміщується, загальною кількістю стереотипних робочих рухів, величиною статичного навантаження, робочою позою, переміщенням у просторі. Напруженість праці характеризують: сенсорні, емоційні навантаження, ступінь монотонності навантажень, режим роботи.

5.1 Технічні рішення з безпечної експлуатації об'єкта

5.1.1 Технічні рішення з безпечної організації робочих місць

Під час монтажу та обслуговування обладнання повітряних ліній електропередавання будівельно-монтажний та оперативно-ремонтний електротехнічний персонал повинен дотримуватися правил охорони праці, за якими потрібно перед початком монтажу електрообладнання

вантажопідіймальних кранів змонтувати постійні настили з огорожами відповідно до [23]. За правилами з охорони праці під час виконання робіт на кранах (на висоті) потрібно перебувати на раніше встановлених і надійно закріплених конструкціях чи засобах підмоцнування. Забороняється перебування людей на елементах конструкцій і обладнання під час їх піднімання та переміщення.

Навісні монтажні площадки, сходи та інші пристосування, що необхідні для виконання робіт на висоті, потрібно встановлювати на конструкціях, які монтуються до їх піднімання. Для переходу монтажників з однієї конструкції на іншу необхідно застосовувати драбини, перехідні містки і трапи, що мають огорожі. Забороняється перехід монтажників по встановлених конструкціях та їх елементах (фермах, ригелях тощо), на яких неможливо забезпечити необхідну ширину проходу при встановлених огорожах, без застосування спеціальних запобіжних пристроїв (натягнутого уздовж ферми чи ригеля каната для закріплення карабіна запобіжного поясу). Місця і способи кріплення каната повинні бути зазначені в ПВР. Спосіб стропування елементів конструкцій та обладнання повинен забезпечувати їх подавання до місця розміщення в положенні, близькому до проектного.

До робіт на висоті і верхолазних робіт допускаються навчені особи, стан здоров'я яких має відповідати медичним вимогам, встановленим для даних видів робіт («Положення про медичний огляд працівників певних категорій»). Працівники, які виконують верхолазні роботи, повинні мати відповідний запис в посвідченні про перевірку знань. До самостійних верхолазних робіт допускаються особи віком не молодші 18 років, які мають стаж верхолазних робіт не менше одного року і кваліфікаційний розряд не нижче четвертого. Робітники, які вперше допускаються до верхолазних робіт, протягом одного року повинні працювати під безпосереднім наглядом досвідчених спеціалістів, призначених наказом керівника підприємства. Працівники мають бути навчені безпеці праці до початку виконання верхолазних робіт.

Драбини, риштування, помости, кігті, лази та інші пристосування, що застосовуються для виконання робіт на висоті і верхолазних робіт, повинні бути сертифіковані, а також відповідати вимогам «Правил безпеки під час роботи з інструментом і пристроями».

Під час виконання робіт, коли немає можливості закріпити строп запобіжного поясу за конструкцію або опору, слід користуватися страхувальним канатом, що є відповідним до вимог ГОСТ 12.4.107. В цьому разі строп запобіжного паска заводиться за конструкцію, деталь опори тощо. Виконувати цю роботу повинні дві особи, друга особа в міру необхідності попускає чи натягує канат.

Під час роботи на конструкціях, під якими розташовані струмопровідні частини, що перебувають під напругою, ремонтні пристосування і інструмент прив'язуються для запобігання їх падінню. Застосовувати в цих випадках монтерські запобіжні паски зі стропами з металевого ланцюга забороняється.

Подавати деталі на конструкції чи устаткування слід за допомогою «нескінченного» канату. Працівник, який стоїть внизу, повинен утримувати канат для запобігання його розгойдуванню і наближенню до струмопровідних частин. Працівники, які виконують роботи на висоті або верхолазні роботи, повинні бути в спецодязі, що не заважає рухам. Особистий інструмент слід зберігати в сумці. Працівники, що здійснюють нагляд за членами бригади, які виконують верхолазні роботи або роботи на висоті, можуть розташовуватися на землі. Обслуговування освітлювальних пристроїв, розташованих на стелі машинних залів і цехів підприємств, з візків мостового крану слід провадити не менш ніж двома працівниками, один з яких з групою III. Під час виконання робіт з використанням крану ремонтникам має бути виданий наряд-допуск.

Ручний електрифікований інструмент повинен відповідати вимогам ДСТУ ІЕС 60745-1:2010 «Інструмент ручний електромеханічний. Безпека. Частина 1. Загальні вимоги».

Номинальна напруга електроінструменту класів I та II не повинна перевищувати: 220 В – для електроінструменту постійного струму; 380 В – для електроінструменту змінного струму.

Електроінструмент, що живиться від електричної мережі, повинен бути оснащений незнімним гнучким кабелем (шнуром) із штепсельною вилкою.

Незнімний гнучкий кабель електроінструменту класу I повинен мати жилу, що з'єднує заземлювальний затискач електроінструменту із заземлювальним контактом штепсельної вилки.

Кабель у місці введення в електроінструмент класу I необхідно захищати від стирань та перегинань еластичною трубкою з ізоляційного матеріалу. Трубку необхідно закріплювати в корпусних деталях електроінструменту таким чином, щоб вона виступала за їх межі на довжину не менше п'яти діаметрів кабелю. Трубка на кабелі не повинна закріплюватись поза електроінструментом.

Для приєднання однофазного електроінструменту шланговий кабель повинен мати три жили: дві – для живлення, одна – для заземлювання. Для приєднання трифазного електроінструменту необхідно застосовувати чотирижильний кабель, одна з жил якого призначена для заземлювання. Це стосується тільки електроінструменту із заземленим корпусом.

Доступні для доторкання металеві деталі електроінструменту класу I, які можуть потрапити під напругу в разі пошкодження ізоляції, повинні бути з'єднані із заземлювальним затискачем. Електроінструменти класів II і III не підлягають заземленню. Заземлення корпусу електроінструменту необхідно виконувати за допомогою спеціальної жили кабелю живлення, яка не повинна одночасно бути провідником робочого струму. Не дозволяється використовувати для заземлення корпусу електроінструменту нульовий робочий провід.

Штепсельна вилка електроінструменту повинна мати відповідну кількість робочих і один заземлювальний контакт. Конструкція вилки повинна забезпечувати випереджувальне замикання заземлювального контакту при

ввімкненні та більш запізнile розмикання при вимкненні. Конструкція штепсельних вилок електроінструменту класу III повинна передбачати унеможливлення зчленування їх з розетками на напругу вище 42 В.

Переносні понижувальні трансформатори, роздільні трансформатори та перетворювачі повинні бути оснащені на стороні вищої напруги кабелем зі штепсельноювилкою для приєднання до електричної мережі. Довжина кабелю не повинна перевищувати 2 м, а його кінці необхідно закріплювати до затискачів трансформатора за допомогою паяння (зварювання) або болтового з'єднання. На стороні нижчої напруги трансформатора повинні бути передбачені гнізда під штепсельнувилку.

Кабель електроінструменту повинен бути захищений від випадкового пошкодження і зіткнення його з гарячими, вологими та масляними поверхнями.

5.1.2 Електробезпека

Основні технічні рішення щодо запобігання електротравмам:

- 1) виконання технічних заходів під час підготовки робочого місця,
- 2) застосування під час обслуговування електроустановок електрозахисних засобів.

- 1) Під час підготовки робочого місця для роботи, яка вимагає знімання напруги, слід виконати у зазначеній послідовності такі технічні заходи:

- провести необхідні вимкнення і вжити заходів щодо запобігання помилковому або самочинному вмиканню комутаційної апаратури;

- вивісити заборонні плакати на приводах ручного і на ключах дистанційного керування комутаційної апаратури. За необхідності струмопровідні частини слід огорожувати;

- приєднати до "землі" переносні заземлення;

- перевірити відсутність напруги на струмопровідних частинах, на які слід встановити заземлення. Якщо переносні заземлення планується ставити поблизу струмопровідних частин, що не входять в зону робочого місця, то їх огороження слід встановити до перевірки відсутності напруги та заземлення;

- встановити заземлення (увімкнути заземлювальні ножі, приєднати до вимкнених струмопровідних частин переносні заземлення) безпосередньо після перевірки відсутності напруги та вивісити плакати "Заземлено" на приводах вимикальних комутаційних апаратів;

- огородити, у разі необхідності, робочі місця або струмопровідні частини, що залишились під напругою, і вивісити на огороженнях плакати безпеки. Залежно від місцевих умов струмопровідні частини огорожують до або після їх заземлення.

2) Під час обслуговування електроустановок повинні застосовуватись засоби захисту від ураження електричним струмом, від впливу електричного поля, а також засоби індивідуального та колективного захисту. Ізолювальні електрозахисні засоби поділяються на основні і додаткові. До основних ізолювальних електрозахисних засобів, які повинні застосовуватись в електроустановках напругою понад 1000 В, відносяться: ізолювальні штанги всіх видів, ізолювальні кліщі, електровимірювальні кліщі, показчики напруги, пристрої для створення безпечних умов праці під час проведення випробувань і вимірювань в електроустановках (показчики напруги для фазування, показчики пошкодження кабелів та ін.); до додаткових – діелектричні рукавички, діелектричне взуття, діелектричні килими, ізолювальні підставки, ізолювальні накладки, ізолювальні ковпаки, штанги для перенесення та вирівнювання потенціалу, сигналізатори напруги, захисні огороження (щити, ширми), переносні заземлення, плакати та знаки безпеки та інші засоби захисту.

Крім наведених вище засобів захисту в електроустановках повинні застосовуватись такі ЗІЗ: захисні каски – для захисту голови; захисні окуляри і щитки – для захисту очей і обличчя; протигази і респіратори – для захисту органів дихання; рукавиці – для захисту рук; запобіжні пояси та страхувальні канати.

Вибір необхідних електрозахисних засобів, засобів захисту від дії ЕП, а також ЗІЗ регламентується [23], а також іншими відповідними нормативними

документами (НД) з урахуванням місцевих умов. У разі застосування основних ізолювальних електрозахисних засобів достатньо використовувати один додатковий засіб, крім випадків, що обумовлені в цих Правилах. У разі необхідності захисту працівника від напруги кроку дозволяється використовувати діелектричне взуття без застосування основних засобів захисту.

5.2 Технічні рішення з гігієни праці і виробничої санітарії

5.2.1 Мікроклімат

Основними нормативними документами, що регламентують параметри мікроклімату виробничих приміщень, є ДСН 3.3.6.042-99 [26]. Допустимі норми температури, відносної вологості та швидкості руху повітря в робочій зоні виробничих приміщень наведені в таблиці 6.1. Робота з монтажу системи електропостачання та її обладнання відноситься до категорії Пб по важкості праці.

Таблиця 5.1 – Допустимі норми параметрів повітря на непостійних робочих місцях

Період року	Категорія робіт	Температура, °С	Відносна вологість	Швидкість руху, X
Холодний	Пб	13-23	75	не більше 0,4
Теплий		15-29	70 при 25 °С	0,2-0,5

5.2.2 Склад повітря робочої зони

Забруднення повітря робочої зони регламентується гранично допустимими концентраціями (ГДК) в мг/м³ [26].

Під час монтажу системи електропостачання виділяється пил нетоксичний. При роботі системи вентиляції, провітрюванні у приміщенні може попадати пил та інші шкідливі речовини, які виділяються при технологічних процесах в цеху і

знаходяться повітрі навколишнього середовища. Їх ГДК відповідно до [26] наведено в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Гранично допустимі концентрації шкідливих речовин для повітря атмосфери в робочій зоні монтажника

Назва речовини	ГДК, мг/м ³		Клас небезпечності
	Максимально разова	Середньо добова	
Пил нетоксичний	0,5	0,15	4

Для забезпечення допустимих показників мікроклімату та складу повітря робочої зони відповідно до ДБН проектом передбачені наступні рішення [27]:

- застосування пиловідсмоктуючих агрегатів з рукавними фільтрами , які встановленні безпосередньо на ділянках біля обладнання із яких очищене повітря поступає у виробниче приміщення;
- необхідно здійснювати контроль за ГДК шкідливих речовин у приміщенні;
- застосовувати природну вентиляцію: організовану та неорганізовану.

5.2.3 Виробниче освітлення

Характеристика зорових робіт – малої точності. Відповідно до ДБН В.2.5-28-2018 [28] розряд зорової роботи V, підрозряд «а». Нормовані значення освітленості наведені в таблиці 5.3.

Для забезпечення достатнього освітлення здійснюють систематичне очищення скла та світильників від пилу (не рідше двох разів на рік), використовують жалюзі. В разі нестачі природного освітлення, використовують загальне штучне освітленням, що створюється за допомогою світлодіодних ламп E27 LED 15W NW A60 "SG". Висота підвісу світильників над робочою поверхнею 4,5 метра.

Таблиця 5.3 – Вимоги до освітлення приміщень виробничих підприємств

Характер зорової роботи	Найменший або еквівалентний розмір об'єкта розрізнення, мм	Розряд зорової роботи	Під-розряд зорової роботи	Контраст об'єкта з фоном	Характеристика фону	Штучне при системі комбінованого освітлення		Природне Ен пр	Сумісне Е сум
						всього	у т. ч. від загального		
Малої точності	Від 1,0 до 5 включно	V	a	малий	темний	400	200	3,0-	1,8

При експлуатації здійснюється контроль за рівнем напруги освітлювальної мережі, своєчасна заміна перегорілих ламп, забезпечується чистота повітря у приміщенні.

5.2.4 Виробничий шум

Під час монтажу системи електропостачання джерелом шуму є будівельне обладнання, машини, механізми та переносний електроінструмент – механічний шум. При санітарно-гігієнічному нормуванні шуму використовують два методи:

- нормування за гранично допустимим спектром шуму;
- нормування рівня звуку за шкалою А шумоміра.

За характером спектру шум – широкосмуговий з безперервний спектром шириною більше октави; за тональною характеристикою – постійний; за походженням – пневматичний. Допустимі рівні звукового тиску на робочих місцях приймаються за вимогами ДСН 32.23-85 [29] і наведені в таблиці 5.4.

Для зменшення рівня шуму до допустимого в цеху двигуни виконуються в металевому кожусі, а також виконують змащення, застосовують пластмасові деталі, використовують протишумні навушники, які закривають вушну раковину.

Таблиця 5.4 – Допустимі рівні звукового тиску

Робоче місце	Рівні звукового тиску в октавних смугах з середньоггеометричними частотами, Гц								
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
На постійних робочих місцях у виробничих приміщеннях та на території підприємства	107	95	87	82	78	75	73	71	69

5.2.5 Виробничі вібрації

Вібрацією називають механічні коливання пружних тіл або систем, коли відбувається переміщення центра їх ваги в просторі відносно статичного стану. Загальна вібрація передається на тіло через опорні поверхні людини, що стоїть чи сидить (підшви ніг або сидниці). Допустимі рівні загальної вібрації на робочих місцях приймаються за вимогами ДСН 32.23-85 [30] і наведені в таблиці 5.5.

Основними методами колективного віброзахисту є зниження вібрації шляхом дії на джерело виникнення: відстрочка від режиму резонанс; динамічне гасіння коливань, заміна конструктивних елементів уставок і будівельних конструкцій. Засоби індивідуального захисту діляться на засоби для ніг, рук та тіла працюючого.

Таблиця 5.5 – Допустимі рівні вібрації на постійних місцях

Вид вібрації	Октавні смуги з середньгеометричними частотами, Гц									
	2	4	8	16	31,5	63	125	250	500	1000
Загальна вібрація на постійних робочих місцях в виробничих приміщеннях	<u>1,3</u> 108	<u>0,45</u> 99	<u>0,22</u> 93	<u>0,2</u> 92	<u>0,2</u> 92	<u>0,2</u> 92	-	-	-	-

В чисельнику середньоквадратичне значення вібрації, м/с 10^{-2} , знаменнику - логарифмічні рівні вібрації, дБ.

5.3 Пожежна безпека

Пожежну безпеку промислових і інших об'єктів регламентують Правила пожежної безпеки в Україні [21, 22]. Пожежо- вибухонебезпечність речовин і матеріалів визначається за ДСТУ 8829: 2019 [13], за якою визначається категорія приміщень за вибуховою та пожежною безпекою [24].

Отже, до складу системи електропостачання, яка будується, входять підстанції, приміщення яких за вибухонебезпекою та пожежонебезпекою відносяться до категорії Д – речовини і/або матеріали, що зазначені вище для категорій приміщень В (крім горючих газів, горючих пилу і/або волокон), а також негорючі речовини і/або матеріали в холодному стані (за температури навколишнього середовища), за умов, що приміщення, в яких знаходяться (зберігаються, переробляються, транспортуються) зазначені вище речовини і/або матеріали, не відносяться до категорій А, Б або В з зонами П-Іа, де є тверді горючі речовини чи матеріали.

Пожежо- вибухонебезпечність речовин і матеріалів – сукупність властивостей, що характеризують їхню здатність до виникнення і поширення горіння. Наслідком горіння, залежно від його швидкості та умов протікання, можуть бути пожежа або вибух. Пожежо- вибухонебезпечність речовин і

матеріалів визначають показниками, вибір яких залежить від агрегатного стану речовини (матеріалу), та умов їхнього застосування.

Будівля, в якій розташовані ці приміщення, характеризується II ступенем вогнестійкості. До II ступеня вогнестійкості відносяться будинки з несучими та огорожувальними конструкціями з природних або штучних кам'яних матеріалів, бетону, залізобетону із застосуванням листових і плитних негорючих матеріалів. Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій (у хвиликах) та максимальні межі поширення вогню по них (см) за ДБН В.1.1.7-2016 [25] наведено в таблиці 5.6.

Таблиця 5.6 – Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій та максимальні межі поширення вогню по них

Ступінь вогнестійкості будинків	Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій (у хвиликах) і максимальні межі поширення вогню по них (см)								
	стіни				коло-ни	сходові площад-ки, костури, сходи, балки, марші сходових кліток	пере-криття між по-верхові (у т.ч. горищ і та над підва-лами	елементи суміщених покриттів	
	несучі та сходових кліток	само-несучі	зовнішні не-несучі	внутрішні не-несучі (пере-город-ки				плити, наст-и-ли, прог-о-ни	балки, ферми, арки, рами
II	REI 120 M0	REI 60 M0	E 15 M0	E1 15 M0	R 120 M0	R 60 M0	REI 45 M0	RE 15 M0	R 30 M0

Протипожежні перешкоди і мінімальні межі їх вогнестійкості за ДБН В.1.1.7-2016 [25] наведено в таблиці 5.7.

Протипожежні відстані між житловими, громадськими, адміністративно-побутовими будинками промислових підприємств, гаражами слід приймати за

таблицею 5.8 (чисельник). В умовах забудови, що склалася, протипожежні відстані між житловими будинками та від житлових будинків до будівель і споруд іншого призначення слід визначати згідно з протипожежними вимогами даних норм, наведеними у таблиці 5.8. Протипожежні відстані від житлових, громадських, адміністративно-побутових будинків промислових підприємств, гаражів до виробничих, складських будинків і споруд слід приймати за таблицею 5.8 (знаменник) [25].

Таблиця 5.7 – Протипожежні перешкоди та мінімальні межі їх вогнестійкості

Протипожежні перешкоди	Типи проти-пожежних перешкод або їх елементів	Мінімальна межа вогнестійкості протипожежної перешкоди (у хвиликах)	Тип заповнення прорізів, не нижче	Тип протипожежного тамбур-шлюзу, не нижче
Стіни	3	REI 45	2	2
Перегородки	2	EI 15	3	2
Перекриття	3	REI 45	2	1

Таблиця 5.8 – Протипожежні відстані між житловими, громадськими, адміністративно-побутовими будинками промислових підприємств, гаражами, а також до виробничих будинків, будівель і споруд

Ступінь вогнестійкості будинку	Відстані при ступені вогнестійкості будинків, м		
	I, II	III	IIIa, IIIб, IV, IVa, V
I, II	6/9	8/9	10/12

На території підстанції встановлено 8 порошкових вогнегасників ВВП-8 (ВП-5) і 12 газових вогнегасників ВВК-7 [26].

ВИСНОВОК

У процесі виконання бакалаврської дипломної роботи на тему "Аналіз методів розрахунку опор та проводів повітряних ліній електропередавання" було проведено комплексне дослідження сучасних підходів та методів, що застосовуються для проектування та оцінки надійності повітряних ліній електропередавання.

Основними результатами роботи є наступні:

1. **Огляд сучасних методів розрахунку:** Було проведено детальний огляд існуючих методів розрахунку опор та проводів ПЛЕП. Зокрема, проаналізовано класичні аналітичні методи, методи скінченних елементів та сучасні комп'ютерні моделювання. Розглянуто основні принципи та алгоритми роботи кожного з методів, а також їх застосування у різних умовах.

2. **Порівняльний аналіз методів:** На основі аналізу були визначені переваги та недоліки кожного з методів, що дозволяє обрати найбільш підходящий метод залежно від конкретних умов експлуатації та вимог до надійності ПЛЕП. Було встановлено, що методи скінченних елементів та комп'ютерні моделювання забезпечують більш високу точність розрахунків, проте вимагають значних обчислювальних ресурсів.

3. **Рекомендації щодо вибору методів:** Розроблено рекомендації для інженерів-проектувальників щодо вибору найбільш ефективних методів розрахунку опор та проводів ПЛЕП з урахуванням специфіки конкретного проекту, кліматичних умов та інших факторів.

4. **Аналіз економічної доцільності:** Враховано економічні аспекти застосування різних методів розрахунку. Встановлено, що використання сучасних методів розрахунку може призвести до зниження загальних витрат на будівництво та обслуговування ПЛЕП за рахунок більш точного визначення необхідних параметрів конструкцій.

5. Екологічний вплив: Проаналізовано екологічні аспекти впровадження різних методів розрахунку та будівництва ПЛЕП. Встановлено, що більш точні розрахунки сприяють зменшенню впливу на навколишнє середовище через оптимізацію матеріалів та конструкцій.

Таким чином, проведені дослідження дозволяють зробити висновок, що правильний вибір методів розрахунку опор та проводів повітряних ліній електропередавання є критично важливим для забезпечення їхньої надійності та довговічності. Запропоновані в роботі підходи та рекомендації можуть бути використані для покращення існуючих практик проектування та експлуатації ПЛЕП, що сприятиме зниженню витрат на їх обслуговування та підвищенню ефективності роботи електричних мереж.

Робота відкриває перспективи для подальших досліджень, зокрема, в напрямку інтеграції новітніх технологій та матеріалів у процес проектування та експлуатації повітряних ліній електропередавання. Дослідження може бути продовжено у напрямку розробки нових матеріалів з підвищеною міцністю та стійкістю до зовнішніх впливів, а також впровадження автоматизованих систем моніторингу стану ПЛЕП для забезпечення їхньої безперервної та надійної роботи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ГІД 34.20.501-2008 Розрахунок опор і проводів повітряних ліній електропередавання згідно з вимогами глави 2.4 ПУЕ: 2006 і глави 2.5 ПУЕ: 2006 Посібник
2. ДБН В.1.2-2:2006. Навантаження і впливи. Норми проектування / Мін-буд України — К., 2006 — 75 с.
3. Кацадзе Т. Л. Основи механічних розрахунків повітряних ліній електропередавання : Підручник / Т. Л. Кацадзе. — Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2019. — 336 с. — ISBN 978-966-622-953-6.
4. СОУ-Н ЕЕ 20.502:2007 Повітряні лінії електропередавання напругою 35 кВ і вище. Інструкція з експлуатації
5. СОУ-Н ЕЕ 20.579:2009 Кліматичні дані для визначення навантажень на повітряні лінії електропередавання. Методика опрацювання.
6. СОУ-Н ЕЕ 20.667:2007 Кліматичні навантаження на повітряні лінії електропередавання з урахуванням топографічних особливостей. Методика
7. Сулейманов В.Н. Електричні мережі та системи: підручн. / В. М. Сулейманов, Т. Л. Кацадзе. Київ: НТУУ "КПІ", 2008. - 456 с. — ISBN 978-966-622-300-8.
8. Cigre Technical Brochure 244. "Sag-Tension Calculation Methods for Overhead Lines." CIGRE, 2004.
9. Fujii, K. "High Voltage Transmission Lines: Theory and Practice." Springer, 2015.
10. Bouchard, J. "Wind and Ice Loading Effects on Transmission Lines." IEEE Transactions on Power Delivery, 2011.
11. Gulino, D. "Fundamentals of Electric Power Engineering: From Electromagnetics to Power Systems." Wiley-IEEE Press, 2016.
12. IEEE Std 738-2012. "IEEE Standard for Calculating the Current-Temperature Relationship of Bare Overhead Conductors." IEEE, 2012.

13. International Electrotechnical Commission (IEC). "IEC 60826: Design Criteria of Overhead Transmission Lines." IEC, 2003.
14. Lautenschlager, E. "Mechanical Properties of Overhead Line Conductors." Journal of Applied Mechanics, 2018.
15. Wood, A.J., Wollenberg, B.F. "Power Generation, Operation, and Control." Wiley-Interscience, 2012.
16. Sakakibara, T. "Design and Analysis of Electrical Transmission Lines." McGraw-Hill, 2016.
17. Lopez, E. "Advanced Materials for Overhead Line Conductors." Materials Science and Engineering, 2019.
18. Seman, S. "Optimization Techniques for Transmission Line Design." IEEE Transactions on Power Systems, 2020.
19. Molinas, M. "Reliability Assessment of Overhead Transmission Lines." IEEE Power and Energy Magazine, 2019.
20. Deb, A. "Powerline Ampacity System: Theory, Modeling and Applications." CRC Press, 2017.
21. ДСНіП «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу». Наказ МОЗ № 248 від 08.04.2014.
22. ДСТУ-Н Б А 3.2-1: 2007 Настанова щодо визначення небезпечних і шкідливих факторів та захисту від їх впливу при виробництві будівельних матеріалів і виробів та їх використання в процесі зведення та експлуатації об'єктів будівництва. URL: <https://profidom.com.ua/a-3/a-3-2/824-dstu-n-b-a-3-2-12007-nastanova-shhodo-viznachenna-nebezpechnih-i-shkidlivih-faktoriv->.
23. ДНАОП 1.1.10-1.01-97 Правила безпечної експлуатації електроустановок. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=21826.

24. ДСТУ Б В.2.5-82:2016. Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом. К.: ДП «УкрНДНЦ», 2016. 109 с.
25. НПАОП 40.1-1.32-01 (ДНАОП 0.00-1.32-01) Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0272203-01#Text>.
26. ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. URL: <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=1972>.
27. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. К. : Мінрегіонбуд України, 2013. 149 с.
28. ДБН В.2.5-28:2018 Природне і штучне освітлення. URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=79885
29. ДСН 3.3.6.037-99 Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. URL: <http://document.ua/sanitarni-normi-virobnichogo-shumu-ultrazvuku-ta-infrazvuku-nor4878.html>.
30. ДСН 3.3.6.039-99. Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації. URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/rada/show/va039282-99>.
31. Кодекс цивільного захисту України. К.: ВР України, 2012. URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/5403-17>.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ НА НАЯВНІСТЬ
ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ

Назва роботи: «Аналіз методів розрахунку опор та проводів повітряних ліній електропередавання»

Тип роботи: Бакалаврська дипломна робота
(БДР, МКР)

Підрозділ кафедра електричних станій та систем, факультет електроенергетики
електромеханіки
(кафедра, факультет)

Показники звіту подібності Unicheck

Оригінальність 93,84% Схожість 6,16%

Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне):

1. Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак плагіату.
2. Виявлені у роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і відсутності самостійності її виконання автором. Роботу направити на розгляд експертної комісії кафедри.
3. Виявлені у роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень.

Особа, відповідальна за перевірку

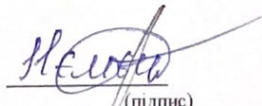

(підпис)

Вишневецький С.Я.

(прізвище, ініціали)

Ознайомлені з повним звітом подібності, який був згенерований системою Unicheck щодо роботи.

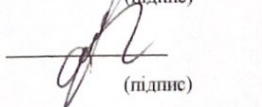
Автор роботи


(підпис)

Нємєц А.В.

(прізвище, ініціали)

Рівник роботи


(підпис)

Малогулко Ю.В.

(прізвище, ініціали)

Вінницький національний технічний університет
Кафедра електричних станцій та систем

«Аналіз методів розрахунку опор та проводів повітряних ліній електропередавання»

Виконав: ст. гр. 2ЕЕ-206
Керівник: к.т.н., доц.

Андрій НЕМЕЦЬ
Юлія МАЛОГУЛКО

Актуальність

Повітряні лінії електропередач (ПЛЕП) використовують для передачі і розподілу електроенергії по проводам, які розташовані на відкритому повітрі і закріплені за допомогою ізоляторів та лінійної арматури на опорах, а в окремих випадках на кронштейнах або стійках інженерних споруд (мостах, шляхопроводах і т.п.).

Значне збільшення потужності, кількості підстанцій і довжини ліній електропередач високої напруги спонукає розвиток промисловості і електрифікації сільського господарства. Значні резерви у вирішенні цієї задачі закладені у підвищенні експлуатації та підвищенні надійності електромереж енергетичних систем і в першу чергу ПЛЕП напругою 35 – 750 кВ. На перспективу до 2030 року в ОЕС України зберігається стратегія розвитку основних електричних мереж, відповідно до якої системоутворюючі функції видачі потужності електростанцій та забезпечення паралельної роботи з енергосистемами інших країн залишаються за мережами 330 і 750 кВ з послідовним зростанням ролі мережі 750 кВ.

Таким чином дослідження методів розрахунку опор та проводів ПЛЕП є актуальною задачею.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є аналіз методів розрахунку опор та проводів повітряних ліній електропередавання. **Об'єктом дослідження** бакалаврської дипломної роботи є повітряні лінії електропередавання, а **предметом дослідження** – методи механічного розрахунку опор та проводів повітряних ліній електропередавання.

Ділянка повітряної лінії електропередавання

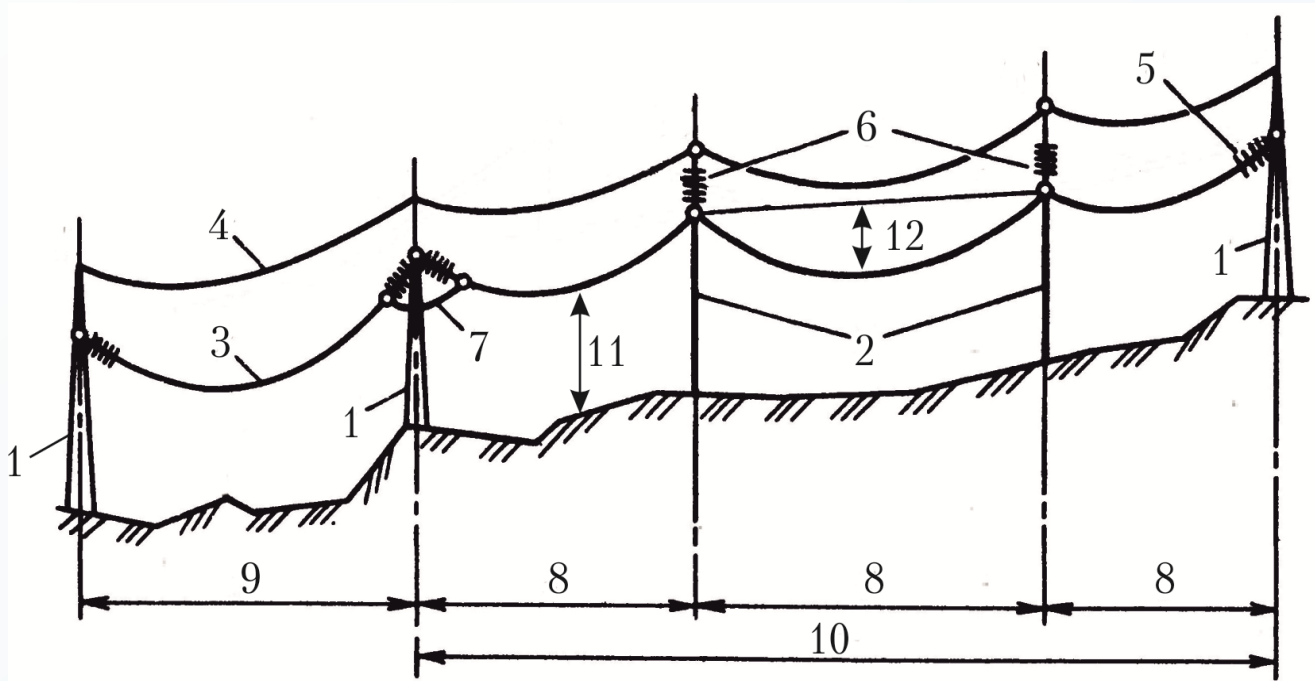
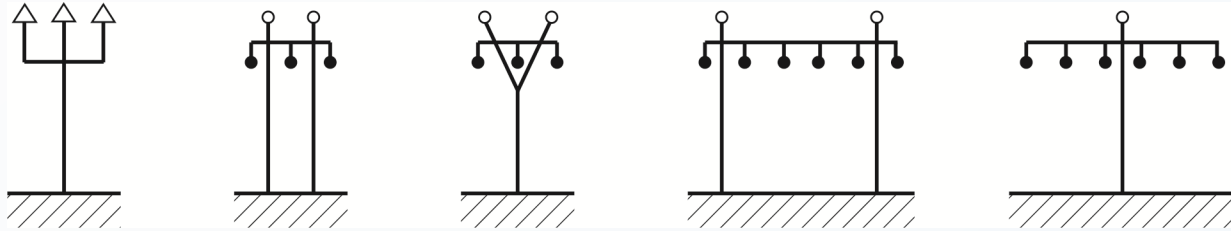


Рисунок 1 - Повітряна лінія електропередавання: 1 – анкерні опори; 2 – проміжні опори; 3 – фазний струмоведучий провід; 4 – грозозахисний трос; 5 – натяжні гірлянди ізоляторів; 6 – підвісні гірлянди ізоляторів; 7 – шлейф; 8 – прогін; 9 – анкерний прогін; 10 – анкерована ділянка; 11 – габарит; 12 – стріла провисання.

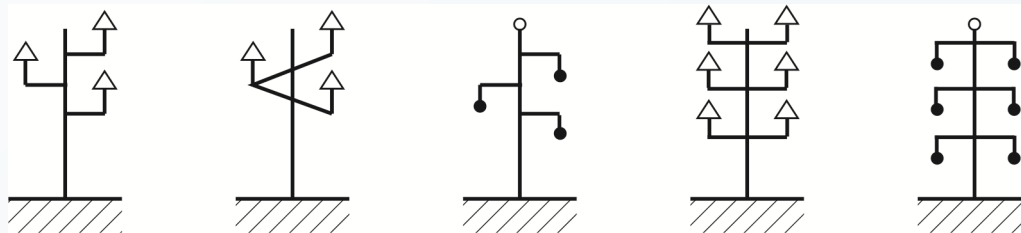
Конструктивні розміри повітряних ліній електропередач

Номінальна напруга, кВ	Кількість проводів у фазі	Відстань між проводами, м	Довжина прогону, м	Висота опори, м	Габаритна відстань, м
до 1	1	0,5	40–50	8–9	6–7
6–10	1	1	50–100	10	6–7
35	1	3	150–200	10	6–7
110	1	4	170–250	13–14	6–7
220	1	7	250–350	25–30	7–8
330	2	9	300–400	25–30	7,5–8
500	3	12	350–450	25–30	8
750	4–5	15	450–750	30–41	10–12

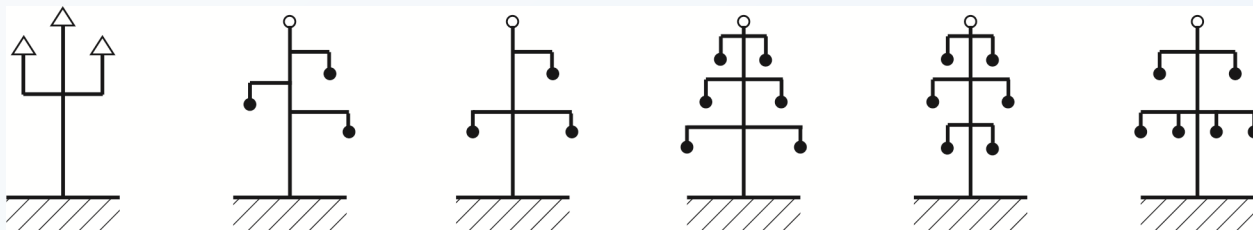
Схеми розташування проводів на опорах



а) горизонтальне розташування проводів



б) вертикальне розташування проводів



в) змішане розташування проводів

Підхід до вибору проводів плеп 330 – 1150 кВ

Проводи, що випускаються в Україні, можна розділити за конструктивними і механічними характеристикам на наступні групи:

1. Найпоширеніші на повітряних лініях високої напруги проводи з відношенням перерізів алюмінію і сталі $F_{\alpha\alpha}:F_{\sigma\sigma} \approx 8$. Для них коефіцієнт заповнення χ_z змінюється у вузьких межах $0,66 \leq \chi_z \leq 0,67$. Середнє значення для цих проводів $\chi_z \approx 0,67$. До цієї групи відносяться проводи марок: АС 150/19, АС 185/24, АС 240/32, АС 300/39, АС 330/43, АС 400/51, АС 500/64.

2. Проводи марок АС 150/34, АС 185/43, АС 240/56, АС 300/66, АС 400/93 з відношенням $F_{\alpha\alpha}:F_{\sigma\sigma} \approx 4,3$ і $\chi_z \approx 0,61$ застосовуються переважно в районах з сильною ожеледдю.

3. Проміжне положення займають проводи марок АС 150/24, АС 185/29, АС 240/39, АС 300/48 і АС 400/64 з відношенням $F_{\alpha\alpha}:F_{\sigma\sigma} \approx 6,2$ і $\chi_z \approx 0,65$.

4. Спеціальні проводи для великих механічних навантажень мають відношення $F_{\alpha\alpha}:F_{\sigma\sigma} \approx 1$ і $\chi_z \approx 0,45$. Марки цих проводів АС 185/128, АС 300/204 і АС 500/336. Вони призначені для переходів через великі річки і водні перешкоди. Проводи з $\chi_z \approx 0,35$ марок АС 70/72 і АС 95/141, призначені для грозозахисних тросів.

Підхід до вибору проводів ПЛЕП 330 – 1150 кВ

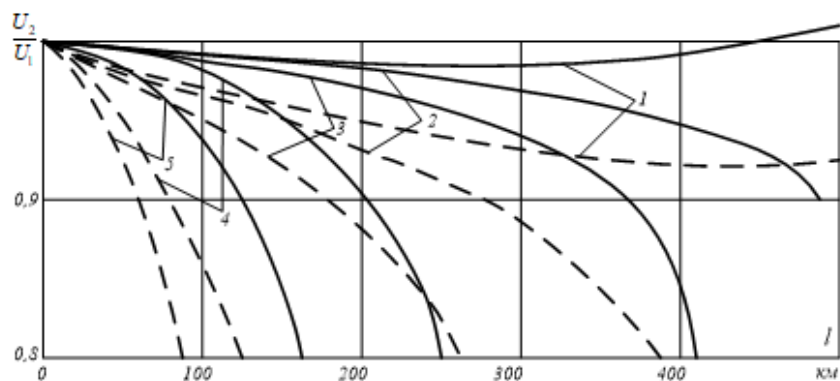


Рисунок 1 – Залежності відношення напруг в кінці і на початку ПЛІ 500 кВ від довжини лінії при різних відношеннях $I/I_n = 0,75$ (крива 1); $I/I_n = 1,0$ (крива 2), $I/I_n = 1,25$ (крива 3); $I/I_n = 2,0$ (крива 4) і $I/I_n = 3,0$ (крива 5) при чисто активному навантаженні (суцільні лінії) і при коефіцієнті потужності навантаження 0,85 (штрихові лінії)

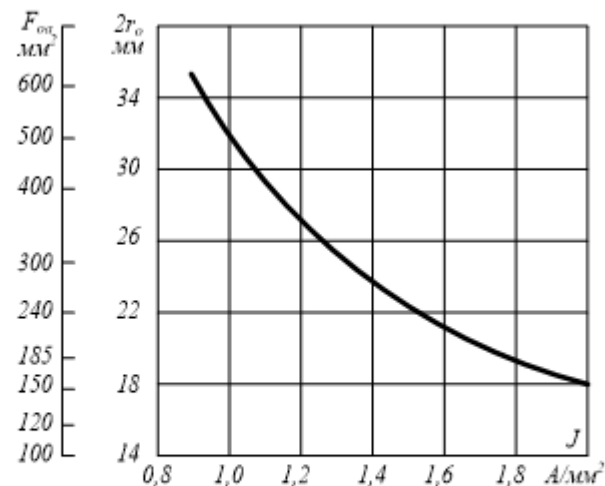


Рисунок 2 – Залежність натуральної густини струму ПЛІ від радіуса одиночного проводу при $E = 0,9 E_{nac}$

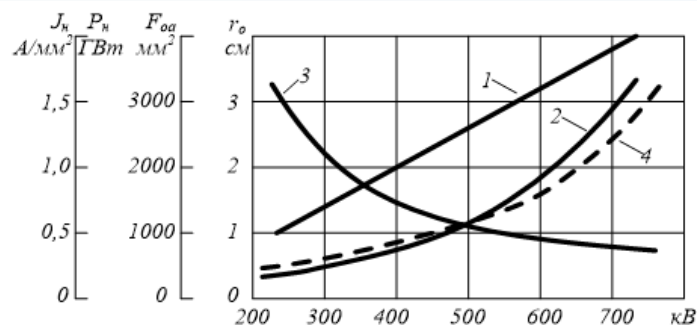


Рисунок 3 – Залежності від класу напруги ПЛІ необхідного по умові обмеження коронного розряду радіуса проводу r_o (крива 1), відповідного активного перерізу проводу $F_{ог}$ (крива 2) при $\chi_s = 0,65$, натуральної густини струму J_n при $E = 0,9 E_{nac}$

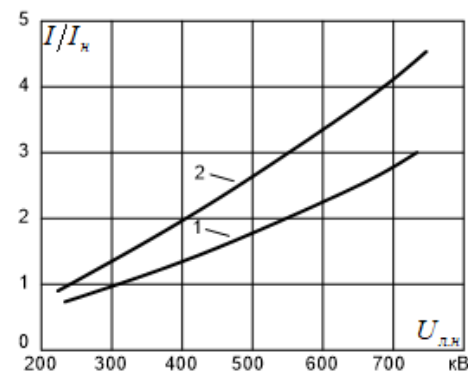


Рисунок 4 – Залежності кратності струму I/I_n від класу напруги при $J = 1$ А/мм² (крива 1) і $J = 1,5$ А/мм² (крива 2) для ПЛІ з одиночними проводами у фазі

Метод граничних станів

8

Обчислення за цим методом виконують на підставі таких вихідних даних:

- постійних граничних навантажень від ваги проводів, тросів, ваги конструкцій, устаткування та ваги ґрунтів із коефіцієнтами надійності за навантаженням γ_{fm} - для першої групи граничних станів відповідно до таблиці 1;
- постійних експлуатаційних навантажень від будь-яких елементів ПЛ із коефіцієнтом надійності за навантаженням $\gamma_{fm} = 1$ - для другої групи граничних станів;
- змінних кліматичних граничних навантажень із середніми періодами повторюваності, поданими в таблиці 2, і коефіцієнтами надійності за навантаженням γ_{fm} (відносно характеристичного навантаження) та коефіцієнтами надійності за відповідальністю γ_n відповідно до таблиці 3 - для першої групи граничних станів.
- змінних кліматичних експлуатаційних навантажень із середніми періодами повторюваності, поданими в таблиці 2, і коефіцієнтами надійності за навантаженням γ_{fm} (відносно характеристичного навантаження) відповідно до таблиці 2 (проводи, троси, відтяжки) і таблиці 4 (конструкції) та коефіцієнтом надійності за відповідальністю $\gamma_n = 1$ - для другої групи граничних станів.

Таблиця 1 – Коефіцієнти надійності γ_{fm} за навантаженнями від ваги елементів для розрахунків за першою групою граничних станів

Елементи, вагу яких враховують	γ_{fm} в режимах	
	нормальний	монтажний
Опори металеві	1,1 (0,95)	1,1
Опори залізобетонні, дерев'яні	1,15 (0,9)	1,1
Насипні ґрунти	1,2 (0,9)	1,1
Проводи, троси, устаткування	1,1 (0,9)	1,1
Монтер і монтажні пристосування	-	1,3

Таблиця 2 – Середні періоди повторюваності граничних і експлуатаційних навантажень

Класи безвідмовності	1КБ	2КБ	3КБ	4КБ
Середні періоди повторюваності граничних навантажень, років	30	50	150	500
Середні періоди повторюваності експлуатаційних навантажень, років	5	10	15	25

Таблиця 4 – Коефіцієнти γ_{fm} і γ_n для визначення експлуатаційних кліматичних навантажень на конструкції за другою групою граничних станів

Вид навантаження	Позначення	1КБ	2КБ	3КБ	4КБ
Від ваги ожеледі на проводи, троси	γ_{fG}	0,85	1,0	1,25	1,53
Від максимального вітрового тиску	γ_{fmax}	0,90	1,0	1,25	1,45
Від дії вітру на провід, трос, вкриті ожеледдю	γ_{fQ}	0,88	1,0	1,25	1,53
Від вітрового тиску на конструкції під час ожеледі	γ_{fm}	0,88	1,0	1,26	1,55
Від ваги ожеледі на конструкціях опор (товщина стінки ожеледі)	γ_{fG}	0,85	1,0	1,25	1,53
Усі види навантажень	γ_n	0,95	1,0	1,0	1,05

Таблиця 3 – Коефіцієнти γ_{fm} і γ_n для визначення граничних навантажень за першою групою граничних станів

Вид навантаження	Позначення	1КБ	2КБ	3КБ	4КБ
Від ваги ожеледі на конструкціях опор (товщина стінки ожеледі)	γ_{fG}	0,4	0,6	0,7	0,85
Від максимального вітрового тиску	γ_{fmax}	0,6	0,7	0,8	0,87
Від вітрового тиску на конструкції під час ожеледі	γ_{fm}	0,45	0,61	0,71	0,83
Усі види навантажень	γ_n	1,0	1,0	1,0	1,0

Висновок

У бакалаврській роботі досліджено методи розрахунку опор та проводів повітряних ліній електропередавання .

Приділено увагу основним поняттям та визначенням, що стосуються задачі дослідження. Проведено класифікацію повітряних ліній електропередачі, досліджено основні елементи повітряних ліній та конструкції опор. Проаналізовано способи вибору конструкції проводів і тросів повітряних ліній електропередач. Проаналізовано методи визначення перерізу проводів і тросів, наведено технічні характеристики проводів і тросів.

Досліджено метод граничних станів за допомогою якого визначаються навантаження від проводів, тросів для розрахунку опор.

Таким чином, проведене дослідження дозволяє зробити висновок, що правильний вибір методів розрахунку опор та проводів повітряних ліній електропередавання є критично важливим для забезпечення їхньої надійності та довговічності. Запропоновані в роботі підходи та рекомендації можуть бути використані для покращення існуючих практик проектування та експлуатації ПЛЕП, що сприятиме зниженню витрат на їх обслуговування та підвищенню ефективності роботи електричних мереж.

Робота відкриває перспективи для подальших досліджень, зокрема, в напрямку інтеграції новітніх технологій та матеріалів у процес проектування та експлуатації повітряних ліній електропередавання. Дослідження може бути продовжено у напрямку розробки нових матеріалів з підвищеною міцністю та стійкістю до зовнішніх впливів, а також впровадження автоматизованих систем моніторингу стану ПЛЕП для забезпечення їхньої безперервної та надійної роботи.

Доповідь завершено.

Дякую за увагу!