

ЛІТЕРАТУРА



НАВЧАЛЬНО-МЕТОДИЧНА

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет
імені Івана Пулюя

Кафедра електричної
інженерії

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

КОМПЛЕКСНА РОЗРАХУНКОВА РОБОТА З ДИСЦИПЛІНИ «Техніка високих напруг»

*для студентів
факультету прикладних інформаційних
технологій
та
електроінженерії*

спеціальності
**141 - електроенергетика, електротехніка
та
електромеханіка**

Тернопіль - 2023

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет
імені Івана Пулюя

Кафедра електричної
інженерії

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

КОМПЛЕКСНА РОЗРАХУНКОВА РОБОТА **З ДИСЦИПЛІНИ** *«Техніка високих напруг»*

для студентів
факультету прикладних інформаційних технологій
та
електроінженерії

спеціальності
141 - електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Тернопіль - 2023

Розрахунок втрат потужності на корону та гірлянд ізоляторів на високовольтних лініях електропередачі. Комплексна розрахункова робота : методичні вказівки з дисципліни «Техніка високих напруг» для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / Укл. : О. О. Вакуленко. – Тернопіль : ТНТУ, 2023. – 36 с.

Методичні вказівки розроблені з метою закріплення при самостійному опрацюванні теоретичного матеріалу з дисципліни «Техніка високих напруг» й містять завдання, методики, приклади розрахунків максимальної напруженості електричного поля на поверхні розщеплених фаз повітряних ліній електропередачі (ЛЕП) номіналом 330 ... 750 кВ заданих будівельних розмірів для визначення їх здатності до втрат потужності на коронний розряд в залежності від різного типу погодних умов, а також визначення стійкості до робочих перенапруг вибраного типу гірлянд ізоляторів в повітряній атмосфері заданого ступеня забрудненості.

Укладач: ст. викладач Вакуленко О. О.

Рецензент: к.т.н., доцент Сисак І. М..

Розглянуто й схвалено на засіданні кафедри електричної інженерії.
Протокол № 10 від 25 травня 2023 року.

Розглянуто й рекомендовано до друку на засіданні науково-методичної комісії факультету прикладних інформаційних технологій та електроінженерії Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя.
Протокол № 11 від 07 червня 2023 року.

© Комп'ютерна верстка та відповідальний за випуск: Вакуленко О. О.,
2023 рік

ЗМІСТ

1. Завдання на Комплексну розрахункову роботу	4
2. Загальні вказівки до виконання Комплексної розрахункової роботи	5
3. Вихідні дані для розрахунку втрат потужності на корону та гірлянд ізоляторів на високовольтних лініях електропередачі	7
Завдання №1	7
Завдання №2	8
Завдання №3	9
4. Методична розробка до розрахунку повітряних ліній електропередачі	10
4.1 Розрахунок максимальної напруженості електричного поля на поверхні розщеплених фаз ЛЕП 330 ... 750 кВ	10
4.2 Розрахунок кількості підвісних ізоляторів та їх довжин на ЛЕП 330 ... 750 кВ	21
4.3 Розрахунок втрат потужності на коронний розряд залежно від погодних умов	26
Графічний пояснювальний матеріал (розміщений упродовж тексту)	-
Рекомендована література	36

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя
кафедра
 електричної інженерії
дисципліна:
 "Техніка високих напруг"
освітній ступінь:
 «бакалавр»
спеціальність:
 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
семестр: 8-й.

1 Завдання

на Комплексну розрахункову роботу
 студента _____

1. Тема роботи: Розрахунок втрат потужності на корону та гірлянд ізоляторів на високовольтних лініях електропередачі.
2. Строк здачі: **залікова сесія 8-го семестру.**
3. Вихідні дані до роботи:
 - 3.1 З літературних джерел згідно рекомендованого списку.
 - 3.2 З варіанту № ____ до завдань №1, №2 та №3 для розрахунку високовольтної ЛЕП конкретного номіналу.
4. Зміст Комплексної розрахункової роботи:
 - 4.1 Розрахунково-пояснювальна записка у форматі A4:
 - 4.1.1. Вступ.
 - 4.1.2. **Завдання №1.** Розрахунок максимальної напруженості електричного поля на поверхні проводів розщеплених фаз ЛЕП 330...750 кВ:
 - 4.1.2.1 вихідні дані для розрахунку;
 - 4.1.2.2 розрахунок потенціальних та ємнісних коефіцієнтів ЛЕП;
 - 4.1.2.3 розрахунок робочих ємностей проводів фаз ЛЕП;
 - 4.1.2.4 розрахунок амплітудних значень зарядів проводів фаз ЛЕП;
 - 4.1.2.5 розрахунок максимальних значень напруженостей електричного поля на поверхні проводів;
 - 4.1.2.6 висновки щодо отриманих результатів.
 - 4.1.3. **Завдання №2.** Розрахунок довжин гірлянд підвісних ізоляторів ЛЕП 330...750 кВ:
 - 4.1.3.1 вихідні дані для розрахунку;
 - 4.1.3.2 розрахунок кількості ізоляторів у гірлянді при максимальній робочій напрузі та стійкості до внутрішніх перенапруг;
 - 4.1.3.3 розрахунок довжини гірлянди ізоляторів та величини мінімальних розрядних проміжків;
 - 4.1.3.4 висновки щодо отриманих результатів.
 - 4.1.4. **Завдання №3.** Розрахунок втрат потужності на корону розрядних повітряних проміжків ЛЕП 330...750 кВ в залежності від погодних умов:
 - 4.1.4.1 вихідні дані для розрахунку з використанням максимальних напруженостей електричного поля згідно п. 4.1.2.5;
 - 4.1.4.2 розрахунок питомих втрат потужності на корону кожної з фаз ЛЕП;
 - 4.1.4.3 розрахунок довжин ділянок коронування ЛЕП;
 - 4.1.4.4 розрахунок втрат потужності кожної з фаз ЛЕП при ясній погоді й при тумані;
 - 4.1.4.5 висновки щодо отриманих результатів.
 - 4.2. Перелік використаної літератури.
5. **Дата видачі Завдання** на Комплексну розрахункову роботу:

2 Загальні вказівки до виконання Комплексної розрахункової роботи

Основні розділи розрахункової роботи повинні повністю розкривати обсяг виконаної роботи.

У **вступі** подається загальна характеристика об'єктів дослідження: високовольтна лінія передачі електроенергії номіналом згідно вибраного *№ варіанту* з горизонтальним розміщенням розщеплених у фазах проводів, які перебувають під максимальним робочим навантаженням; гірлянди підвісних ізоляторів, що зазнають дії зовнішніх забруднюючих чинників атмосфери та внутрішніх комутаційних перенапруг; втрати потужності на коронуючий розряд, які залежать від максимальної напруженості електричного поля на поверхні проводів й погодних умов.

Вказуються закони і математичні моделі, яким підпорядковуються величини напруженостей електричних полів на поверхні проводів ЛЕП та втрат на корону, а також довжини шляхів струмів витoku ізоляторів в залежності від будівельних розмірів та атмосферних умов. Тут також наводяться загальні характеристики методів, які застосовуються для вирішення завдання розрахунку втрат потужності на корону та гірлянд ізоляторів на високовольтних лініях номіналом 330 ... 750 кВ як об'єктів дослідження.

У **першому розділі** Комплексної розрахункової роботи подаються вихідні дані для розрахунку максимальної напруженості електричного поля на поверхні розщеплених фаз ЛЕП згідно отриманого від кафедри варіанту *Завдання №1*. Проаналізувавши їх, необхідно уточнити, а в разі потреби і доповнити отриману інформацію необхідними для розрахунку даними з цих "Методичних вказівок" та інших літературних джерел.

Необхідно вказати діючі на об'єкт досліджень чинники та пояснити, яким чином вони будуть враховані при розрахунку максимальної напруженості електричного поля. Сформулювати основні визначення, що використовуються в описі математичних моделей досліджуваних об'єктів: потенціальні та ємнісні коефіцієнти рівнянь Максвелла III-го порядку для миттєвих потенціалів проводів трифазної лінії; еквівалентний радіус системи розщеплених проводів, а також напруженість електричного поля на поверхні одного з них; коефіцієнт, що враховує підвищення напруженості електричного поля на поверхні витого пучка проводів.

Особливі методи, які застосовуються для аналізу об'єкту дослідження, необхідно детально проаналізувати і подати у прийнятній формі.

При необхідності - застосовувати таблично-графічну форму подання інформації.

Необхідно також подати методику проведення розрахунку максимальної напруженості електричного поля об'єкта дослідження з розшифруванням прийнятих буквених позначень, з вказуванням літературних джерел використаних формул, виразів, таблиць та графіків.

Розрахунок максимальної напруженості електричного поля на поверхні проводів розщеплених фаз ЛЕП 330 ... 750 кВ (з врахуванням вибраного

№ варіанту) провести у відповідності з поданою нижче методикою і скласти у прийнятній формі.

У **другому та третьому розділах** Комплексної розрахункової роботи подаються вихідні дані для розрахунку довжин гірлянд підвісних ізоляторів ЛЕП, а також втрат потужності на корону розрядних повітряних проміжків ЛЕП в залежності від погодних умов згідно отриманих від кафедри варіантів **Завдань №2 та №3**, відповідно.

Вказуються закони і математичні моделі, яким підпорядковуються: коефіцієнт ефективності ізолятора, що залежить від його будівельних розмірів, а також питомої ефективної довжини шляху струму витoku в залежності від ступеня забрудненості атмосфери, що визначає, поряд з кратністю комутаційних перенапруг, довжину гірлянди ізоляторів високовольтної ЛЕП в умовах зовнішнього атмосферного середовища; залежне від погодних умов, шорсткості проводів та їх розміру початкове значення напруженості електричного поля, при якому на високовольтній ЛЕП виникає коронуючий розряд, що зумовлює втрати при передачі електроенергії.

Ці розділи також необхідно оформити аналогічно першому.

При використанні таблично–графічних форм вони повинні бути названі, пронумеровані; використані скорочення та букви - пояснені; вказані розмірності та метричні одиниці.

У **заключному розділі ("Висновки")** необхідно навести результати розрахунків кожного із завдань; провести аналіз отриманих результатів в контексті залежності від вихідних даних; зробити висновки щодо підвищення надійності досліджуваних високовольтних ЛЕП.

Виходячи з отриманих результатів, запропонувати заходи щодо економії матеріальних та енергоресурсів.

Перелік використаної літератури необхідно скласти в алфавітному порядку з використанням системи *УДК*.

3 Вихідні дані для розрахунку втрат потужності на корону та гірлянд ізоляторів на високовольтних лініях електропередачі

Завдання №1

Розрахунок максимальної напруженості електричного поля на поверхні проводів розщеплених фаз ЛЕП 330 ... 750 кВ

№ варіанту	Номінальна напруга, кВ	Марка проводу	К-сть проводів у фазі n	Діаметр проводу $2r$, мм	Відстань між проводами розщеплен. фази a , см	Середн.-геом. відстань між фазами $D_{ср}$, м	Середня висота проводу h , м
1	330	АС240/32	2	21,6	15	6	8
2		АС300/39		24,2			
3		АС400/51		26,6			
4		АС240/32	3	21,6	20	8	10
5		АС300/39		24,2			
6		АС400/51		26,6			
7	500	АС240/66	3	21,6	30	12	12
8		АС300/66		24,2			
9		АС400/43	4	25,2			
10		АС400/51		26,6			
11	750	АС240/56	5	21,6	40	16	14
12		АС300/43		24,2			
13		АС400/93	6	26,6			
14		АС300/64		24,2			
15	500	АС300/66	3	24,2	30	12	12
16		АС240/32		21,6			
17		АС300/39		24,2			
18		АС400/51	4	26,6			
19		АС240/32		21,6			
20	330	АС300/39	2	24,2	20	6	8
21		АС400/51		26,6			
22	500	АС240/56	3	21,6	30	12	12
23		АС300/66		24,2			
24	750	АС400/93	5	26,6	40	16	14
25		АС400/51		24,2			
26	330	АС300/56	2	24,2	20	6	8
27		АС300/43		24,2			
28	500	АС400/93	4	26,6	30	12	12
29		АС300/64		24,2			
30	750	АС300/32	6	24,2	40	16	14
31		АС400/43		26,6			
32		АС400/51		26,6			
33	500	АС240/66	4	21,6	30	12	12
34		АС300/66		24,2			
35		АС400/43	5	26,6			
36		АС400/51		26,6			
37	330	АС240/32	3	21,6	20	8	8
38		АС300/39		24,2			
39		АС400/51	2	26,6	15		
40		АС240/32		21,6			

Інші характеристики - згідно методики розрахунку.

Завдання №2

Розрахунок довжин гірлянд підвісних ізоляторів ЛЕП 330...750 кВ

№ варіанту	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Номінальна напруга, кВ	330	330	330	330	330	330	500	500	500	500
Ступінь забрудненості атмосфери	VI	V	IV	III	II	I	VI	IV	II	III
№ варіанту	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Номінальна напруга, кВ	750	750	750	750	500	500	500	500	500	330
Ступінь забрудненості атмосфери	VI	V	III	IV	IV	II	VI	III	V	III
№ варіанту	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Номінальна напруга, кВ	330	500	500	750	750	330	330	500	500	750
Ступінь забрудненості атмосфери	VI	V	IV	II	I	II	VI	IV	V	III
№ варіанту	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Номінальна напруга, кВ	750	750	500	500	500	500	330	330	330	330
Ступінь забрудненості атмосфери	VI	V	IV	III	II	I	VI	V	IV	III

Інші характеристики - згідно методики розрахунку.

Завдання №3
Розрахунок втрат потужності на корону
розрядних повітряних проміжків ЛЕП 330 ... 750 кВ
в залежності від погодних умов

№ варіанту	Номинальна напруга, кВ	Ясна погода ($m_2 = 1,0$)		Коеф. шорсткості проводів m_1	Туман ($m_2 = 0,8$)		Коеф. шорсткості проводів m_1
		Температура, $^{\circ}C$	Тиск, мм рт.ст.		Температура, $^{\circ}C$	Тиск, мм рт.ст.	
1	330	30	750	1,00	0	730	0,90
2		20	730	0,95	-2	720	0,95
3		10	740	0,90	-4	720	1,00
4		0	740	0,85	0	730	0,95
5		-10	740	0,80	4	720	0,90
6		-20	750	0,75	0	740	0,85
7	500	20	740	0,70	2	720	0,80
8		10	740	0,65	4	730	0,85
9		0	750	0,60	6	740	0,90
10		-10	730	0,65	8	740	0,95
11	750	20	740	0,70	10	720	0,85
12		10	740	0,75	6	710	0,75
13		0	750	0,80	2	720	0,65
14		-10	740	0,85	-2	730	0,70
15	500	30	750	0,90	-6	730	0,80
16		20	730	0,95	-10	710	0,90
17		10	740	1,00	-6	730	1,00
18		0	750	0,95	-2	730	0,95
19		-10	740	0,90	0	710	0,90
20	330	30	750	0,85	2	720	0,85
21		0	750	0,80	4	730	0,80
22	500	20	730	0,85	6	710	0,75
23		0	740	0,90	8	720	0,70
24	750	30	750	0,95	10	710	0,65
25		10	740	0,85	6	720	0,60
26	330	10	730	0,75	2	730	0,65
27		0	740	0,65	-2	740	0,70
28	500	20	730	0,70	0	730	0,75
29		0	740	0,80	2	740	0,80
30	750	20	740	0,90	-2	740	0,85
31		30	750	0,80	0	720	0,80
32	500	20	740	0,85	-2	730	0,75
33		10	740	0,90	-4	740	0,70
34		0	750	0,95	0	730	0,65
35		-10	730	0,85	4	710	0,60
36		-20	750	0,75	0	730	0,65
37	330	20	740	0,65	2	710	0,70
38		10	750	0,70	4	730	0,75
39		0	740	0,80	6	720	0,80
40		-10	740	0,90	8	710	0,85

Інші характеристики – згідно методики розрахунку.

4 Методична розробка до розрахунку повітряних ліній електропередачі

4.1 Розрахунок максимальної напруженості електричного поля на поверхні розщеплених фаз ЛЕП 330...750 кВ

[1, с.33–39; 2, с.24–57; 3; 4, с.16–31; 5, с. 28–42]

4.1.1 Математична модель для розрахунку.

Однофазна повітряна лінія

Однофазну двопровідну повітряну лінію при розрахунках електричного поля розглядають як два циліндра радіуса r нескінченної довжини, які мають лінійно розповсюджені заряди з густиною q_1 та q_2 , розміщені на відстанях h_1 та h_2 від земної поверхні (провідна, з потенціалом $\varphi_3 = 0$) та на відстані D_{12} один від одного (див. рис. 1.1).

Електричне поле заряду, розміщеного поряд з провідною поверхнею може бути знайдене *методом дзеркальних відображень*, при якому вплив всієї провідної поверхні внаслідок дії наведеного в ній заряду замінюється полем дзеркального відображення даного заряду із заміненим на протилежний знак. Дійсно, в полі таких двох зарядів середня площина виявляється еквіпотенціальною з нульовим потенціалом, що і вимагається в дійсності.

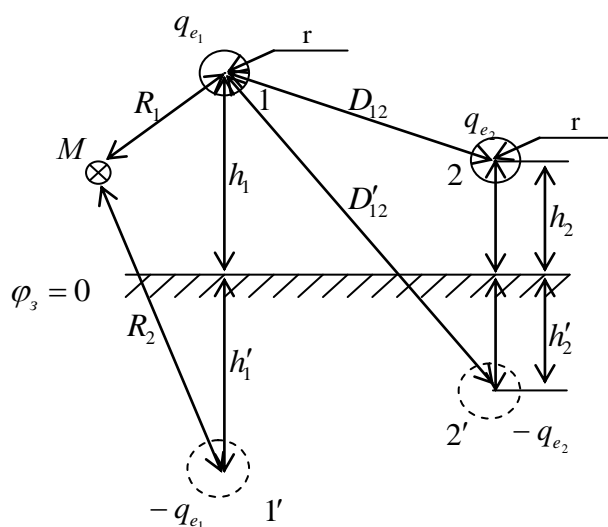


Рисунок 1.1 - Двopовідна повітряна лінія над землею та її дзеркальне відображення

Метод дзеркальних відображень був розроблений видатним англійським фізиком лордом Кельвінім (William Thomson, 1 st Baron Kelvin) у середині XIX ст. Суттєвий розвиток методу належить іншому англійському фізику XX ст. Дж. Сірлу (John Searle), який застосував його для розрахунку відбиття від поверхні розділу будь-яких двох середовищ.

Отже, визначимо потенціал, створюваний у довільній точці M зарядом $+q_1$ та його дзеркальним відображенням $-q_1$.

Потенціал, створюваний першим додатно зарядженим проводом із зарядом $+q_l = +q/l$ на одиниці довжини проводу l :

$$\varphi_{1_M} = -\int_{r_1}^{R_1} E_r dr = -\int_{r_1}^{R_1} \frac{q_l}{2\pi\varepsilon \cdot \varepsilon_0} \frac{dr}{r} = \frac{q_l}{2\pi\varepsilon \cdot \varepsilon_0} \ln \frac{r_1}{R_1} + const. \quad (1.1)$$

Аналогічно, потенціал, створюваний лінійним зарядом $-q_l$ дзеркального відображення заряду першого проводу у цій же точці:

$$\varphi_{1'_M} = \frac{-q_l}{2\pi\varepsilon \cdot \varepsilon_0} \ln \frac{r_1}{R_2} + const = \frac{q_l}{2\pi\varepsilon \cdot \varepsilon_0} \ln \frac{R_2}{r_1} + const. \quad (1.2)$$

Тому, потенціал точки M при наявності двох зарядів

$$\varphi_M = \varphi_{1_M} + \varphi_{1'_M} = \frac{q_l}{2\pi\varepsilon \cdot \varepsilon_0} \left(\ln \frac{r_1}{R_1} + \ln \frac{R_2}{r_1} \right) + const = \frac{q_l}{2\pi\varepsilon \cdot \varepsilon_0} \ln \frac{R_2}{R_1} + C. \quad (1.3)$$

Тут C - довільна постійна, яка перетворюється в нуль, якщо виходити з умови, що $\varphi = 0$ при $R_1 = R_2$ (тобто, на провідній поверхні).

Потенціальні коефіцієнти повітряних ліній.

Для однофазної двопровідної повітряної лінії можна знайти наступні співвідношення миттєвих потенціалів проводів, використовуючи вираз (1.3):

частковий потенціал (напруга відносно землі) на поверхні першого проводу від зарядів проводів 1 та $1'$ (переміщаємо т. M на поверхню проводу 1 ; при цьому $R_1 \rightarrow r_1 = r$; $R_2 \rightarrow 2h_1$):

$$u_1' = \frac{q_1}{2\pi\varepsilon \cdot \varepsilon_0} \ln \frac{2h_1}{r} = \frac{q_1}{2\pi\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot l} \ln \frac{2h_1}{r} = \alpha_{11} \cdot q_1, \quad (1.4)$$

а від зарядів проводів 2 та $2'$

$$u_1'' = \frac{q_2}{2\pi\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot l} \ln \frac{D_{12}'}{D_{12}} = \alpha_{12} \cdot q_2. \quad (1.5)$$

В цих рівняннях D_{12} - відстань між осями проводів 1 та 2 ; D_{12}' - відстань між осями першого проводу та дзеркального відображення другого (рис.1.1); α_{11} та α_{12} - потенціальні коефіцієнти; l - довжина проводу.

Загальний потенціал першого проводу

$$u_1 = u_1' + u_1'' = \alpha_{11} \cdot q_1 + \alpha_{12} \cdot q_2, \quad (1.6)$$

де $\alpha_{11} = \frac{1}{2\pi\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot l} \ln \frac{2h_1}{r}$; $\alpha_{12} = \frac{1}{2\pi\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot l} \ln \frac{D_{12}'}{D_{12}}$.

Для другого проводу таким же чином одержимо його потенціал

$$u_2 = \alpha_{21} \cdot q_1 + \alpha_{22} \cdot q_2, \quad (1.7)$$

де $\alpha_{21} = \alpha_{12} = \frac{1}{2\pi\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot l} \ln \frac{D_{12}'}{D_{12}}$; $\alpha_{22} = \frac{1}{2\pi\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot l} \ln \frac{2h_2}{r}$.

Як бачимо з рівнянь (1.4) та (1.5) потенціальні коефіцієнти α залежать від геометричних розмірів лінії та діелектричної проникності середовища: $\alpha = \alpha(r, h, D, l, \varepsilon)$. Рівняння (1.6) та (1.7) називають *рівняннями Максвелла II-го порядку* для миттєвих потенціалів проводів двопровідної лінії.

При горизонтальному розміщенні проводів ($h_1 = h_2$) матимемо $\alpha_{11} = \alpha_{12}$; крім того, потенціали проводів однофазної симетричної лінії рівні між собою, але протилежні за знаком: $u_1 = -u_2$. Тоді з формул (1.6) та (1.7) одержимо рівність і протилежність зарядів проводів:

$$\begin{aligned}
\alpha_{11}q_1 + \alpha_{12}q_2 &= -\alpha_{12}q_1 - \alpha_{11}q_2; \\
\alpha_{11}q_1 + \alpha_{12}q_1 &= -(\alpha_{11}q_2 + \alpha_{12}q_2); \\
(\alpha_{11} + \alpha_{12})q_1 &= -(\alpha_{11} + \alpha_{12})q_2; \\
q_1 &= -q_2
\end{aligned} \tag{1.8}$$

Відношення заряду проводу q_1 до його потенціалу u_1 визначає робочу ємність C_1 проводу лінії. Тому для симетричної однофазної лінії з рівнянь (1.6) та (1.8) матимемо:

$$\begin{aligned}
C_1 &= \frac{q_1}{u_1} = \frac{1}{\alpha_{11} - \alpha_{12}} = \frac{1}{\frac{1}{2\pi\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot l} \ln \frac{2h}{r} - \frac{1}{2\pi\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot l} \ln \frac{D'_{12}}{D_{12}}} = \\
&= \frac{2\pi\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot l}{\ln \frac{2h \cdot D_{12}}{r \cdot D'_{12}}} = \frac{l}{2 \cdot 9 \cdot 10^9 \ln \frac{D_{12}}{r}} \left[\frac{\Phi}{M} \right].
\end{aligned} \tag{1.9}$$

Тут прийнято до уваги, що для повітряних ліній $\frac{2h}{D'_{12}} \approx 1$, а також $\varepsilon \approx 1$.

Рівняння (1.6) та (1.7) для подальших перетворень можна записати у матричній формі:

$$\begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \end{pmatrix} \quad \text{або} \quad U = \alpha \cdot Q, \quad \text{або} \quad Q = \alpha^{-1} \cdot U. \tag{1.10}$$

Визначник 2-го порядку цієї системи рівнянь рівний:

$$D_\alpha = \begin{vmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} \end{vmatrix} = \alpha_{11} \cdot \alpha_{22} - \alpha_{12} \cdot \alpha_{21} = \alpha_{11} \cdot \alpha_{22} - \alpha_{12}^2.$$

Алгебраїчні доповнення елементів визначника D_α :

$$A_{ik} = (-1)^{i+k} |\alpha_{ik}|; \quad A_{11} = \alpha_{22}; \quad A_{12} = -\alpha_{21}; \quad A_{21} = -\alpha_{12}; \quad A_{22} = \alpha_{11}.$$

Ємнісні коефіцієнти проводів.

Рішення системи рівнянь (1.6) та (1.7) відносно зарядів при відомих потенціалах проводів дають наступні вирази:

$$\begin{aligned}
q_1 &= \beta_{11}u_1 + \beta_{12}u_2 \\
q_2 &= \beta_{21}u_1 + \beta_{22}u_2
\end{aligned} \quad \text{або} \quad \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \beta_{11} & \beta_{12} \\ \beta_{21} & \beta_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix}, \tag{1.11}$$

$$\text{де} \quad \beta_{11} = \frac{A_{11}}{D_\alpha} = -\frac{\alpha_{22}}{\alpha_{12}^2 - \alpha_{11}\alpha_{22}}; \quad \beta_{22} = \frac{A_{22}}{D_\alpha} = -\frac{\alpha_{11}}{\alpha_{12}^2 - \alpha_{11}\alpha_{22}}; \quad \beta_{12} = \beta_{21} = \frac{A_{12}}{D_\alpha} = \frac{\alpha_{12}}{\alpha_{12}^2 - \alpha_{11}\alpha_{22}}.$$

Коефіцієнти β_{ii} з однаковими індексами називаються *коефіцієнтами ємності*; вони завжди додатні і чисельно рівні зарядам на відповідних проводах, коли потенціали їх рівні одиниці, а потенціали інших проводів рівні нулю.

Коефіцієнти β_{ik} з різними індексами називаються *коефіцієнтами електростатичної індукції*; вони від'ємні і визначають величину наведеного заряду зворотного знаку; наприклад, β_{21} - заряд на першому проводі, коли потенціал другого проводу рівний одиниці.

Так же, як і потенціальні коефіцієнти α , коефіцієнти β залежать тільки від геометричних розмірів та діелектричної проникності середовища.

Часткові ємності проводів.

У двопровідній однофазній лінії вводять поняття *часткових ємностей*, які зв'язують попарно між собою всі проводи: ємність між проводами $C_{12} = C_{21}$, ємність проводів відносно землі C_{11} та C_{22} (див. рис.1.2) і є частинами загальної (робочої) ємності лінії C_p .

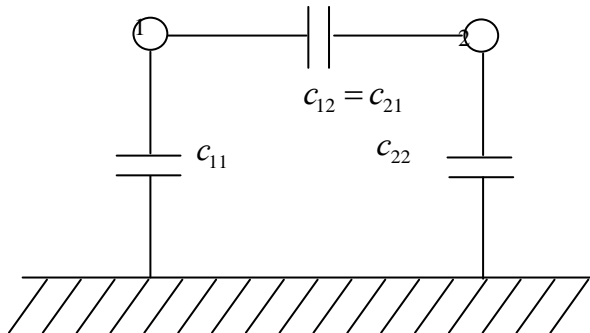


Рисунок 1.2 - Часткові ємності двопровідної однофазної лінії

Дійсно, ємності C_{11} та C_{22} через землю з'єднані послідовно між проводами, а тому сумарна *робоча ємність лінії* C_p рівна:

$$C_p = C_{12} + \frac{C_{11} \cdot C_{22}}{C_{11} + C_{22}}. \quad (1.12)$$

Оскільки для симетричної лінії $C_{11} = C_{22}$, то

$$C_p = C_{12} + \frac{C_{11}}{2} = \frac{C_{11} + 2C_{12}}{2}. \quad (1.13)$$

Виразимо заряди кожного з проводів через потенціали та часткові ємності, вважаючи потенціал землі рівним нулю:

$$\begin{cases} q_1 = C_{11}u_1 + C_{12}(u_1 - u_2) = (C_{11} + C_{12})u_1 - C_{12}u_2; \\ q_2 = C_{22}u_2 + C_{21}(u_2 - u_1) = -C_{21}u_1 + (C_{22} + C_{21})u_2. \end{cases} \quad (1.14)$$

Порівнюючи останні рівняння з (1.11), матимемо:

$$\beta_{11} = C_{11} + C_{12}; \quad \beta_{22} = C_{21} + C_{22}; \quad \beta_{12} = \beta_{21} = -C_{12} = -C_{21};$$

або

$$C_{11} = \beta_{11} + \beta_{12}; \quad C_{22} = \beta_{22} + \beta_{21}; \quad C_{12} = C_{21} = -\beta_{12}. \quad (1.15)$$

Так як в симетричній однофазній лінії $u_2 = -u_1$, за допомогою (1.14) можна знайти вираз для *робочої ємності проводу* C_1 через часткові ємності:

$$C_1 = \frac{q_1}{u_1} = C_{11} + 2C_{12}. \quad (1.16)$$

Отже, робоча ємність проводу у 2 рази більша робочої ємності лінії (див. (1.13)).

Трифазна повітряна лінія

Розглянемо трифазну повітряну лінію з *горизонтальним* розміщенням 3-х проводів (рис.1.3).

Рівняння, які зв'язують *миттєві* потенціали проводів та заряди проводів, аналогічно рівнянням (1.6) та (1.7) можна записати у вигляді системи *рівнянь Максвелла III-го порядку* з потенціальними коефіцієнтами:

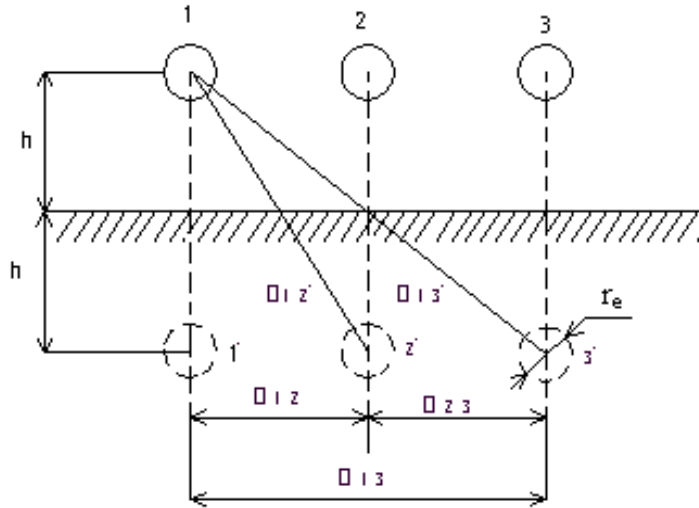


Рисунок 1.3 - Трипровідна повітряна лінія над землею та її дзеркальне відображення

$$\begin{cases} u_1 = \alpha_{11}q_1 + \alpha_{12}q_2 + \alpha_{13}q_3 \\ u_2 = \alpha_{21}q_1 + \alpha_{22}q_2 + \alpha_{23}q_3 \\ u_3 = \alpha_{31}q_1 + \alpha_{32}q_2 + \alpha_{33}q_3 \end{cases} \quad (1.17)$$

Тут

$$\alpha_{11} = \alpha_{22} = \alpha_{33} = \frac{1}{2\pi\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot l} \ln \frac{2h}{r};$$

$$\alpha_{12} = \alpha_{21} = \alpha_{23} = \alpha_{32} = \frac{1}{2\pi\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot l} \ln \frac{D'_{12}}{D_{12}};$$

$$\alpha_{13} = \alpha_{31} = \frac{1}{2\pi\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot l} \ln \frac{D'_{13}}{D_{13}}.$$

Розв'язавши систему рівнянь (1.17) відносно зарядів, отримаємо систему рівнянь з ємнісними коефіцієнтами:

$$\begin{cases} q_1 = \beta_{11}u_1 + \beta_{12}u_2 + \beta_{13}u_3 \\ q_2 = \beta_{21}u_1 + \beta_{22}u_2 + \beta_{23}u_3 \\ q_3 = \beta_{31}u_1 + \beta_{32}u_2 + \beta_{33}u_3 \end{cases} \quad (1.18)$$

Тут $\beta_{ik} = \frac{A_{ik}}{D_\alpha}$ - ємнісні коефіцієнти системи рівнянь III-го порядку;

$A_{ik} = (-1)^{i+k} |\alpha_{ik}|$ - алгебраїчні доповнення елементів визначника D_α системи рівнянь (1.17);

$D_\alpha = \begin{vmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & \alpha_{33} \end{vmatrix}$ - визначник системи рівнянь III-го порядку.

У випадку горизонтального розміщення проводів повітряної лінії матимемо:

$$D_\alpha = \alpha_{11} \begin{vmatrix} \alpha_{22} & \alpha_{23} \\ \alpha_{32} & \alpha_{33} \end{vmatrix} - \alpha_{12} \begin{vmatrix} \alpha_{21} & \alpha_{23} \\ \alpha_{31} & \alpha_{33} \end{vmatrix} + \alpha_{13} \begin{vmatrix} \alpha_{21} & \alpha_{22} \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} \end{vmatrix} = \alpha_{11}^3 - 2\alpha_{11}\alpha_{12}^2 + 2\alpha_{13}\alpha_{12}^2 - \alpha_{11}\alpha_{13}^2. \quad (1.19)$$

Враховуючи зсув по фазі між миттєвими потенціалами u_1 , u_2 та u_3 можна обчислити величини зарядів q_1 , q_2 та q_3 .

Максимальна напруженість електричного поля на поверхні кожного з проводів визначається згідно формули:

$$E_M = \frac{q_M}{2\pi\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot l \cdot r}, \quad (1.20)$$

а ємність фази лінії – з виразу $C = \frac{q}{U}$.

Виразимо рівняння (1.18) за допомогою часткових ємностей:

$$\begin{cases} q_1 = C_{11}u_1 + C_{12}(u_1 - u_2) + C_{13}(u_1 - u_3) \\ q_2 = C_{21}(u_2 - u_1) + C_{22}u_2 + C_{23}(u_2 - u_3) \\ q_3 = C_{31}(u_3 - u_1) + C_{32}(u_3 - u_2) + C_{33}u_3 \end{cases} \quad (1.21)$$

Порівнюючи (1.18) та (1.21), знайдемо

$$\begin{aligned} C_{11} &= \beta_{11} + \beta_{12} + \beta_{13}; & C_{12} &= -\beta_{12}; & C_{13} &= -\beta_{13}; \\ C_{22} &= \beta_{21} + \beta_{22} + \beta_{23}; & C_{21} &= -\beta_{21}; & C_{23} &= -\beta_{23}; \\ C_{33} &= \beta_{31} + \beta_{32} + \beta_{33}; & C_{31} &= -\beta_{31}; & C_{32} &= -\beta_{32}. \end{aligned} \quad (1.22)$$

Так як зв'язок між зарядом q та потенціалом u лінійний, то співвідношення (1.21) справедливі і при максимальних, і при діючих значеннях заряду та потенціалу змінного струму.

4.1.2 Характеристики коефіцієнтів та змінних моделі.

Таблиця 1.1 - Максимальні робочі напруги електроенергетичних систем

$U_{ном}$, кВ	3	6	10	20	35	110	150	220	330	500	750	1150
$U_{роб. макс}$, кВ	1,15 · $U_{ном}$								1,10 · $U_{ном}$	1,05 · $U_{ном}$		
	3,5	6,9	11,5	23,0	40,5	126	172	252	363	525	788	1200
$U_{ф. макс}$, кВ	2,0	4,0	6,7	13,3	23,4	72,8	100	146	210	304	455	695
Нейтраль	ізолювана		заземлена через ДЗР			глухо заземлена						

Таблиця 1.2 - Початкові напруженості електричного поля проводів

Марка проводу	АС (АСО)-240	АС (АСО)-300	АС (АСО)-400	АС (АСУ)-240	АС (АСУ)-300	АС (АСУ)-400	АС-240	АС-300	АС-400
r , см	1,080	1,175	1,360	1,120	1,260	1,450	1,080	1,210	1,400
$E_{0 макс}$, $\frac{кВ}{см}$	31,93	31,59	31,22	30,21	31,43	31,01	31,92	31,62	31,13

4.1.3 Вихідні дані для розрахунку напруженості електричного поля:

- 4.1.3.1 номінальна напруга високовольтної ЛЕП U_n , кВ;
- 4.1.3.2 марка проводу;
- 4.1.3.3 кількість розщеплених проводів у фазі n ;
- 4.1.3.4 діаметр витого проводу $2r$, мм;
- 4.1.3.5 відстань між проводами розщепленої фази a , см;
- 4.1.3.6 середньгеометрична відстань між фазами D_{cp} , м;

- 4.1.3.7 середня висота підвісу проводу h , м;
 4.1.3.8 максимальна робоча напруга високовольтної ЛЕП (див. табл. 1.1) $U_{роб. макс}$, кВ;
 4.1.3.9 початкова напруженість електричного поля на поверхні сталевалюмінієвого проводу (див. табл. 1.2) $E_{0 макс}$, кВ/см.

4.1.4 Приклад розрахунку максимальної напруженості електричного поля на поверхні розщеплених фаз ЛЕП 330 кВ.

4.1.4.1 Вихідні дані варіанту для розрахунку:

$U_{ном} = 330$ кВ; марка проводу: 4×АСУ 300/39; $2r_0 = 24$ мм; $a = 40$ см; $D_{12} = D_{23} = 11$ м; $h = 14$ м.

4.1.4.2 Розрахунок потенціальних та ємнісних коефіцієнтів ЛЕП.

Знаходимо еквівалентний радіус:

$$r_e = \sqrt[n]{r_0 \cdot \left(\frac{a}{\sin \frac{\pi}{n}}\right)^{n-1} \cdot \prod_{k=1}^{n-1} \sin\left(\frac{k}{n} \cdot \pi\right)} = \sqrt[4]{12 \left(\frac{400}{\sin \frac{\pi}{4}}\right)^{4-1} \cdot \prod_{k=1}^{4-1} \sin\left(\frac{k}{4} \cdot \pi\right)} =$$

$$= \sqrt[4]{12 \left(\frac{400}{\sin \frac{\pi}{4}}\right)^3 \cdot \left(\sin\left(\frac{1}{4} \cdot \pi\right) \cdot \sin\left(\frac{2}{4} \cdot \pi\right) \cdot \sin\left(\frac{3}{4} \cdot \pi\right)\right)} = \sqrt[4]{12 \cdot 1,81 \cdot 10^8 \cdot (0,707 \cdot 1 \cdot 0,707)} =$$

$$= 181,5 \text{ мм} \approx 18,2 \text{ см.}$$

Знаходимо геометричні відстані між зарядами та їх дзеркальними відображеннями, необхідні для розрахунку:

$$D'_{12} = \sqrt{D_{12}^2 + (2h)^2} = \sqrt{11^2 + 28^2} = 3008 \text{ см;}$$

$$D'_{13} = \sqrt{D_{13}^2 + (2h)^2} = \sqrt{22^2 + 28^2} = 3560 \text{ см.}$$

Потенціальні коефіцієнти рівні:

$$\alpha_{11} = \alpha_{22} = \alpha_{33} = \frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0 l} \ln \frac{2h}{r_e} = \frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0 l} \ln \frac{2 \cdot 1400}{18,1} = \frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0 l} \cdot 5,04 \left[\frac{1}{\Phi} \right];$$

$$\alpha_{12} = \alpha_{21} = \alpha_{23} = \alpha_{32} = \frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0 l} \ln \frac{D'_{12}}{D_{12}} = \frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0 l} \ln \frac{3008}{1100} = \frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0 l} \cdot 1,01 \left[\frac{1}{\Phi} \right];$$

$$\alpha_{13} = \alpha_{31} = \frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0 l} \ln \frac{D'_{13}}{D_{13}} = \frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0 l} \ln \frac{3560}{2200} = \frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0 l} \cdot 0,48 \left[\frac{1}{\Phi} \right].$$

Знаходимо визначник 3-го порядку системи рівнянь Максвелла:

$$\begin{aligned}
D_\alpha &= \alpha_{11} \begin{vmatrix} \alpha_{22} & \alpha_{23} \\ \alpha_{32} & \alpha_{33} \end{vmatrix} - \alpha_{12} \begin{vmatrix} \alpha_{21} & \alpha_{23} \\ \alpha_{31} & \alpha_{33} \end{vmatrix} + \alpha_{13} \begin{vmatrix} \alpha_{21} & \alpha_{22} \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} \end{vmatrix} = \frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0 l} \cdot 5,04 \begin{vmatrix} \frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0 l} \cdot 5,04 & \frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0 l} \cdot 1,01 \\ \frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0 l} \cdot 1,01 & \frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0 l} \cdot 5,04 \end{vmatrix} - \\
&\quad - \frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0 l} \cdot 1,01 \begin{vmatrix} \frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0 l} \cdot 1,01 & \frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0 l} \cdot 1,01 \\ \frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0 l} \cdot 0,48 & \frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0 l} \cdot 5,04 \end{vmatrix} + \frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0 l} \cdot 0,48 \begin{vmatrix} \frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0 l} \cdot 1,01 & \frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0 l} \cdot 5,04 \\ \frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0 l} \cdot 0,48 & \frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0 l} \cdot 1,01 \end{vmatrix} = \\
&\quad \left(\frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0 l} \right)^3 \cdot 117,55 \left[\frac{1}{\Phi^3} \right].
\end{aligned}$$

Відповідні алгебраїчні доповнення:

$$A_{11} = \begin{vmatrix} \alpha_{22} & \alpha_{23} \\ \alpha_{32} & \alpha_{33} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0 l} \cdot 5,04 & \frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0 l} \cdot 1,01 \\ \frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0 l} \cdot 1,01 & \frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0 l} \cdot 5,04 \end{vmatrix} = \left(\frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0 l} \right)^2 (25,4 - 1,02) = \left(\frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0 l} \right)^2 \cdot 24,38 ;$$

$$A_{12} = \begin{vmatrix} \alpha_{21} & \alpha_{23} \\ \alpha_{31} & \alpha_{33} \end{vmatrix} = - \begin{vmatrix} \frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0 l} \cdot 1,01 & \frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0 l} \cdot 1,01 \\ \frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0 l} \cdot 0,48 & \frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0 l} \cdot 5,04 \end{vmatrix} = \left(\frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0 l} \right)^2 (5,09 - 0,485) = \left(\frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0 l} \right)^2 \cdot 4,61 ;$$

$$A_{13} = \begin{vmatrix} \alpha_{21} & \alpha_{22} \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0 l} \cdot 1,01 & \frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0 l} \cdot 5,04 \\ \frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0 l} \cdot 0,48 & \frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0 l} \cdot 1,01 \end{vmatrix} = \left(\frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0 l} \right)^2 (1,02 - 2,42) = \left(\frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0 l} \right)^2 \cdot (-1,4) ;$$

$$A_{21} = \begin{vmatrix} \alpha_{12} & \alpha_{13} \\ \alpha_{32} & \alpha_{33} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \frac{1}{2\pi\epsilon_0 \epsilon l} \cdot 1,01 & \frac{1}{2\pi\epsilon_0 \epsilon l} \cdot 0,48 \\ \frac{1}{2\pi\epsilon_0 \epsilon l} \cdot 1,01 & \frac{1}{2\pi\epsilon_0 \epsilon l} \cdot 5,04 \end{vmatrix} = \left(\frac{1}{2\pi\epsilon_0 \epsilon l} \right)^2 (5,09 - 0,485) = \left(\frac{1}{2\pi\epsilon_0 \epsilon l} \right)^2 \cdot 4,61 ;$$

$$A_{22} = \begin{vmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{13} \\ \alpha_{31} & \alpha_{33} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \frac{1}{2\pi\epsilon_0 \epsilon l} \cdot 5,04 & \frac{1}{2\pi\epsilon_0 \epsilon l} \cdot 0,48 \\ \frac{1}{2\pi\epsilon_0 \epsilon l} \cdot 0,48 & \frac{1}{2\pi\epsilon_0 \epsilon l} \cdot 5,04 \end{vmatrix} = \left(\frac{1}{2\pi\epsilon_0 \epsilon l} \right)^2 (25,4 - 0,23) = \left(\frac{1}{2\pi\epsilon_0 \epsilon l} \right)^2 \cdot 25,14 ;$$

$$A_{23} = \begin{vmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0 l} \cdot 5,04 & \frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0 l} \cdot 1,01 \\ \frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0 l} \cdot 0,48 & \frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0 l} \cdot 1,01 \end{vmatrix} = \left(\frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0 l} \right)^2 (5,09 - 0,485) = \left(\frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0 l} \right)^2 \cdot 4,61 ;$$

$$A_{31} = \begin{vmatrix} \alpha_{12} & \alpha_{13} \\ \alpha_{22} & \alpha_{23} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0 l} \cdot 1,01 & \frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0 l} \cdot 0,48 \\ \frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0 l} \cdot 5,04 & \frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0 l} \cdot 1,01 \end{vmatrix} = \left(\frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0 l}\right)^2 (1,02 - 2,42) = \left(\frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0 l}\right)^2 \cdot (-1,4);$$

$$A_{32} = \begin{vmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{13} \\ \alpha_{21} & \alpha_{23} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0 l} \cdot 5,04 & \frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0 l} \cdot 0,48 \\ \frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0 l} \cdot 1,01 & \frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0 l} \cdot 1,01 \end{vmatrix} = \left(\frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0 l}\right)^2 (5,09 - 0,485) = \left(\frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0 l}\right)^2 \cdot 4,61;$$

$$A_{33} = \begin{vmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0 l} \cdot 5,04 & \frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0 l} \cdot 1,01 \\ \frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0 l} \cdot 1,01 & \frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0 l} \cdot 5,04 \end{vmatrix} = \left(\frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0 l}\right)^2 (25,4 - 1,02) = \left(\frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0 l}\right)^2 \cdot 24,38.$$

Знаходимо ємнісні коефіцієнти:

$$\beta_{ik} = (-1)^{i+k} \frac{A_{ik}}{D_\alpha};$$

$$\beta_{11} = (-1)^{1+1} \cdot \frac{\left(\frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0 l}\right)^2 \cdot 24,38}{\left(\frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0 l}\right)^3 \cdot 117,55} = 0,207 \cdot 2\pi\epsilon\epsilon_0 l [\Phi];$$

$$\beta_{12} = (-1)^{1+2} \cdot \frac{\left(\frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0 l}\right)^2 \cdot 4,61}{\left(\frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0 l}\right)^3 \cdot 117,55} = -0,04 \cdot 2\pi\epsilon\epsilon_0 l [\Phi];$$

$$\beta_{13} = (-1)^{1+3} \cdot \frac{\left(\frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0 l}\right)^2 \cdot (-1,4)}{\left(\frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0 l}\right)^3 \cdot 117,55} = -0,01 \cdot 2\pi\epsilon\epsilon_0 l [\Phi];$$

$$\beta_{21} = (-1)^{2+1} \cdot \frac{\left(\frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0 l}\right)^2 \cdot 4,61}{\left(\frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0 l}\right)^3 \cdot 117,55} = -0,04 \cdot 2\pi\epsilon\epsilon_0 l [\Phi];$$

$$\beta_{22} = (-1)^{2+2} \cdot \frac{\left(\frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0 l}\right)^2 \cdot 25,14}{\left(\frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0 l}\right)^3 \cdot 117,55} = 0,214 \cdot 2\pi\epsilon\epsilon_0 l [\Phi];$$

$$\beta_{23} = (-1)^{2+3} \cdot \frac{\left(\frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0 l}\right)^2 \cdot 4,61}{\left(\frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0 l}\right)^3 \cdot 117,55} = -0,04 \cdot 2\pi\epsilon\epsilon_0 l [\Phi];$$

$$\beta_{31} = (-1)^{3+1} \cdot \frac{\left(\frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0 l}\right)^2 \cdot (-1,4)}{\left(\frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0 l}\right)^3 \cdot 117,55} = -0,01 \cdot 2\pi\epsilon\epsilon_0 l [\Phi];$$

$$\beta_{32} = (-1)^{3+2} \cdot \frac{\left(\frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0 l}\right)^2 \cdot 4,61}{\left(\frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0 l}\right)^3 \cdot 117,55} = -0,04 \cdot 2\pi\epsilon\epsilon_0 l [\Phi];$$

$$\beta_{33} = (-1)^{3+3} \cdot \frac{\left(\frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0 l}\right)^2 \cdot 24,38}{\left(\frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0 l}\right)^3 \cdot 117,55} = 0,207 \cdot 2\pi\epsilon\epsilon_0 l [\Phi].$$

4.1.4.3 Розрахунок робочих ємностей проводів фаз ЛЕП.

Запишемо рівняння для *амплітуд* зарядів і напруг, враховуючи, що в деякий момент часу $U_i = U_{\text{макс}}$, а напруги двох інших фаз будуть рівні $-0,5U_{\text{макс}}$. Тоді з рівняння (1.18) матимемо:

$$\begin{cases} q_{1M} = \left[\beta_{11} - \frac{1}{2}(\beta_{12} + \beta_{13}) \right] \cdot U_M = C_1 \cdot U_M \\ q_{2M} = \left[\beta_{22} - \frac{1}{2}(\beta_{21} + \beta_{23}) \right] \cdot U_M = C_2 \cdot U_M \\ q_{3M} = \left[\beta_{33} - \frac{1}{2}(\beta_{31} + \beta_{32}) \right] \cdot U_M = C_3 \cdot U_M, \end{cases}$$

а робочі ємності фаз (ємності одиниці довжини), які зв'язують *амплітудні значення* зарядів на проводах та фазних напруг, рівні:

$$C_1 = \frac{q_{1M}}{U_M} = \beta_{11} - \frac{1}{2}(\beta_{12} + \beta_{13}) = 2\pi\epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot l \left[0,207 - \frac{1}{2}(-0,04 - 0,01) \right] =$$

$$= 2 \cdot 3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot l \cdot 0,232 = 12,9 \cdot 10^{-12} = 12,9 [нФ \text{ при } l = 1м];$$

$$C_2 = \frac{q_{2M}}{U_M} = \beta_{22} - \frac{1}{2}(\beta_{21} + \beta_{23}) = 2\pi\epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot l \left[0,214 - \frac{1}{2}(-0,04 - 0,04) \right] =$$

$$= 2 \cdot 3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot l \cdot 0,254 = 14,12 \cdot 10^{-12} = 14,12 [нФ \text{ при } l = 1м];$$

$$C_3 = \frac{q_{3M}}{U_M} = \beta_{33} - \frac{1}{2}(\beta_{31} + \beta_{32}) = 2\pi\epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot l \left[0,207 - \frac{1}{2}(-0,01 - 0,04) \right] =$$

$$= 2 \cdot 3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot l \cdot 0,232 = 12,9 \cdot 10^{-12} = 12,9 [нФ \text{ при } l = 1м].$$

4.1.4.4 Розрахунок амплітудних значень зарядів проводів фаз ЛЕП.

Максимальне амплітудне значення фазної напруги рівне:

$$U_{\Phi M} = \frac{U_{\text{ном}} \cdot k_U \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3}} = \frac{330 \cdot 1,1 \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 296,7 [кВ].$$

Відповідно, питомі заряди на проводах будуть рівні:

$$q_1 = q_3 = C_1 \cdot U_{\Phi M} = 12,9 \cdot 10^{-12} \cdot 296,7 \cdot 10^3 = 3827,43 \cdot 10^3 [нКл \text{ при } l = 1м];$$

$$q_2 = C_2 \cdot U_{\Phi M} = 14,12 \cdot 10^{-12} \cdot 296,7 \cdot 10^3 = 4189,4 \cdot 10^3 [нКл \text{ при } l = 1м];$$

4.1.4.5 Розрахунок максимальних значень напруженостей електричного поля на поверхні проводів.

Знаходимо середню напруженість електричного поля на поверхні розщеплених проводів кожної з фаз:

$$E_{1_{CP}} = E_{3_{CP}} = 0,018 \cdot \frac{q_1}{n \cdot r_0} = 0,018 \cdot \frac{3827,43 \cdot 10^3}{4 \cdot 1,2} = 14,35 \left[\frac{\kappa B}{\text{см}} \right];$$

$$E_{2_{CP}} = 0,018 \cdot \frac{q_2}{n \cdot r_0} = 0,018 \cdot \frac{4189,4 \cdot 10^3}{4 \cdot 1,2} = 15,71 \left[\frac{\kappa B}{\text{см}} \right].$$

Коефіцієнт розщеплення проводів однієї фази рівний:

$$k = 1 + \beta \frac{r_0}{a} = 1 + 4,243 \cdot \frac{1,2}{40} = 1,127,$$

де $\beta = 2(n-1) \cdot \sin \frac{\pi}{n} = 2(4-1) \cdot \sin \frac{\pi}{4} = 4,243$.

Знаходимо максимальне значення напруженості електричного поля на поверхні розщеплених проводів кожної з фаз:

$$E_{1_M} = E_{3_M} = k \cdot E_{1_{CP}} = 1,127 \cdot 14,35 = 16,17 \left[\frac{\kappa B}{\text{см}} \right];$$

$$E_{2_M} = k \cdot E_{2_{CP}} = 1,127 \cdot 15,71 = 17,71 \left[\frac{\kappa B}{\text{см}} \right].$$

Максимальне значення напруженості електричного поля на поверхні зовнішнього навиву проводів кожної з фаз:

$$E_{1_{BM}} = E_{3_{BM}} = E_{1_M} \cdot k_B = 16,17 \cdot \frac{1}{0,717} = 22,55 \left[\frac{\kappa B}{\text{см}} \right];$$

$$E_{2_{BM}} = E_{2_M} \cdot k_B = 17,71 \cdot \frac{1}{0,717} = 24,70 \left[\frac{\kappa B}{\text{см}} \right].$$

4.1.4.6 Висновки щодо отриманих результатів.

Згідно отриманого завдання для проводу марки АСУ 300/39 початкове значення напруженості електричного поля рівне $E_{0_{макс}} = 31,43 \text{ кВ/см}$ і перевищує розрахункові максимальні значення напруженості електричного поля на поверхні зовнішнього навиву даної марки проводів.

Таким чином, розрядні процеси у вигляді корони на проводах ЛЕП 330 кВ із заданими розмірами її елементів будуть відсутні.

4.2 Розрахунок кількості підвісних ізоляторів та їх довжин [1, с. 94-101; 3; 4, с. 32–48; 6, с. 76–92].

4.2.1 Математична модель для розрахунку.

Ступені забрудненості атмосфери.

До I-го ступеня забрудненості атмосфери відносяться сільськогосподарські райони, поля, ліси, болота, тундра. До II-го, більш високого, ступеня забрудненості відносяться райони з сильною вітровою ерозією ґрунту, сільськогосподарські райони, в яких застосовуються хімічні добрива та гербіциди, промислові міста.

Ступінь забрудненості атмосфери поблизу підприємств встановлюється в залежності від виду й об'єму виробництва і позначається буквами: А, Б, В, Г, Д в порядку зростання небезпеки.

Джерело промислового забруднення впливає на забрудненість атмосфери у межах певної зони навколо підприємства. Розміри цієї зони – т.з. мінімальний захисний інтервал для різних виробництв складає (300...9000) м. За границями захисного інтервалу забрудненість відноситься до вищевказаних II-го або I-го ступенів. У межах захисного інтервалу в залежності від віддалі до джерела забруднення встановлюються III–IV–V–й ступені забрудненості атмосфери.

При відстанях від високовольтної ЛЕП або розподільчого пристрою до промислового джерела забруднення рівних від 1/3 захисного інтервалу до його межі для підприємств груп Б...Д забрудненість атмосфери відповідає III-му ступеню; - від 1/6 частини до 1/3 інтервалу для підприємств груп В...Д відповідає IV-му ступеню; при відстанях менших 1/6 частини захисного інтервалу – V-му й VI-му ступеням.

Вибір будівельної довжини ізоляторів.

Визначальним фактором при виборі ізолятора є забезпечення його надійної роботи в умовах туману, роси, дрібного дощу, що моросить, у поєднанні із забрудненням поверхні ізолятора.

Значення волого-розрядної напруги ізолятора залежить від характеристик забрудненого шару: товщини та питомого опору. При однакових забрудненнях вона пропорційна довжині шляху витоку L_6 ізолятора, тобто найменшій відстані вздовж поверхні ізолюючої частини між двома електродами.

Розряд вздовж поверхні ізолятора на окремих його ділянках може відриватися від поверхні і розвиватися у повітрі. Крім того, поверхні ізоляторів забруднюються і звожуються нерівномірно. Внаслідок цього, в умовах експлуатації волого-розрядні напруги виявляються пропорційними не L_6 , а ефективним довжинам шляхів витоку:

$$L_{\text{еф}} = \frac{L_6}{K}, [\text{см}], \quad (2.1)$$

де $K \geq 1$ – коефіцієнт ефективності ізолятора.

Для підвісних тарілчастих ізоляторів коефіцієнт K оцінюють згідно наступного емпіричного виразу:

$$K = 1 + 0,5 \cdot \left(\frac{L_6}{D} - 1 \right) \approx 1,0 \dots 1,3, \quad (2.2)$$

де D – діаметр тарілки ізолятора, *см*.

Для зовнішньої ізоляції електрообладнання й опорних ізоляторів відкритих розподільчих пристроїв значення K наведені нижче (H – будівельна довжина ізоляційної частини конструкції)

$\frac{L_6}{H}$	1,5...2,0	2,0...2,3	1,2...2,7	2,7...3,2	3,2...3,5
K	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4

В якості характеристики надійності ізоляторів при робочій напрузі прийнята *питома ефективна довжина шляху струму витoku*

$$\lambda_{\text{еф}} = \frac{L_{\text{еф}}}{U_{\text{роб.макс}}}, \left[\frac{\text{см}}{\text{кВ}} \right], \quad (2.3)$$

де $U_{\text{роб.макс}}$ – найбільша міжфазна робоча напруга, *кВ*, яка нормується в залежності від ступеня забрудненості атмосфери та номінальної напруги установки (див. таблицю 2.2).

Для надійної експлуатації при робочій напрузі *геометрична довжина шляху витoku* ізоляторів повинна визначатись як

$$L_6 \geq K \cdot \lambda_{\text{еф}} \cdot U_{\text{роб.макс}}. \quad (2.4)$$

Стосовно гірлянд ізоляторів це означає, що число ізоляторів n у гірлянді повинно бути:

$$n \geq \frac{K \cdot \lambda_{\text{еф}} \cdot U_{\text{роб.макс}}}{L_{6_1}}, \quad (2.5)$$

де L_{6_1} – геометрична довжина шляху струму витoku одного ізолятора.

У зв'язку з можливістю виходу з ладу окремих ізоляторів під час експлуатації, а також деякою трудомісткістю їх заміни кількість ізоляторів збільшується на *один* для ЛЕП 110 кВ і 220 кВ та на *два* для ліній 330 кВ і вище.

Перевірка вибраної кількості ізоляторів відбувається згідно умов роботи гірлянд *під дощем* при дії внутрішніх комутаційних перенапруг. При цьому кількість ізоляторів обчислюється з виразу:

$$n \geq \frac{k_p \cdot U_{\text{роб.макс}}}{E_{\text{мр}} \cdot H}, \quad (2.6)$$

де k_p – розрахункова кратність внутрішніх комутаційних перенапруг;

$E_{\text{мр}}$ – розрахункова мокро-розрядна напруженість електричного поля (див. таблицю 2.1), *кВ/см*.

На гірляндах ізоляторів ліній 330–750 кВ для вирівнювання розподілу напруг між системою розщеплених проводів та першим ізолятором підвищують екранну арматуру овальної форми з горизонтально–орієнтованою площиною овалу. Така арматура знижує напругу на найближчих до фазних проводів ізоляторах до рівня нижче коронної й підвищує розрядну напругу при імпульсних перенапругах.

При дії імпульсної напруги (розряді блискавки) гірлянда ізоляторів поводитьсь по–різному в залежності від тривалості діючої хвилі. При тривалості $t_p \geq 3$ мкс імпульсний розряд вздовж довгих гірлянд відбувається найкоротшим шляхом між електродами – по повітрю. Тому 50%–у розрядну напругу гірлянд

ізоляторів можна визначити з будівельної довжини H гірлянди. Розрядний градієнт в цьому випадку приймається для додатної хвилі рівним $\sim 5,5$ кВ/см. При дуже малій тривалості імпульсу, тобто на фронті імпульсної хвилі перенапруги, розряд відбувається вздовж поверхні кожного з ізоляторів; тому 50%-а розрядна напруга визначається не будівельною, а сумарною довжиною шляху розряду вздовж поверхні гірлянди ізоляторів.

4.2.2 Характеристики коефіцієнтів та змінних моделі.

Таблиця 2.1 - Характеристики підвісних лінійних ізоляторів

Тип ізолятора	Будівельна висота H , мм	Діаметр D , мм	Довжина шляху струму витoku L_V , мм	Коефіцієнт ефективності ізолятора K , мм	Діюча напруга корони $U_{кор}$, кВ	Розрахункова середня мокрозрядна напруженість E_M , кВ / см
ПФ6-В	140	270	324	1,1	35	2,5
ПФ20-А	194	350	420	1,1	32	2,4
ПС6-А	130	255	255	1,0	28	2,6
ПС16-А	170	280	387	1,2	40	2,3
ПС30-А	190	320	425	1,1	45	2,0
ПФГ6-А	198	270	455	1,1	50	3,0
ПСГ16-А	160	320	480	1,2	70	2,8
ПСГ22-А	185	370	570	1,1	75	2,8

Примітка. 1. Марка ізолятора тарілчатого типу: П – підвісний; С – скляний; Ф – фарфоровий; Г – гідрофобний; 16 – гарантована електромеханічна міцність 160кН; А – конструктивне виконання.

2. Райони з підвищеним рівнем забрудненості умовно позначаються цифрами IV, V, VI та вимагають ізоляторів зі спеціальною обробкою поверхні.

Таблиця 2.2 - Питома ефективна довжина струму витoku ізолятора (висота до 1000 м)

Ступінь забрудненості атмосфери	$\lambda_{эф}$, см / кВ, не менше					
	для повітряних ліній при номінальній напрузі, кВ			для відкритих розподільних пристроїв при номінальній напрузі, кВ		
	35	110-220	330-750	35	110-330	500-750
I	1,7	1,3	1,3	1,7	1,5	1,5
II	1,9	1,6	1,5	1,7	1,5	1,5
III	2,3	1,9	1,8	2,3	1,8	1,8
IV	2,6	2,3	2,3	2,6	2,3	–
V	3,5	3,0	3,0	3,5	3,0	–
VI	4,0	3,5	3,5	4,0	3,5	–

Примітка. Значення $\lambda_{эф}$ повинні бути збільшені на 5% при висотах (1000 - 2000) м над рівнем моря, - на 10% при (2000 - 3000) м, - на 15% при - (3000 - 4000) м.

Таблиця 2.3 - Кількість ізоляторів у гірляндах повітряних ЛЕП та відкритих розподільчих пристроях (у дужках) при ступені забрудненості атмосфери - I

Тип ізолятора	Кількість ізоляторів при номінальній напрузі, кВ								
	10	20	35	110	150	220	330	500	750
ПФ6-А	1	3 (4)	3 (4)	7 (8)	9 (10)	13 (14)	19 (20)	(29)	–
ПФ6-Б	1	3 (4)	3 (5)	7 (8)	10 (10)	14 (15)	20 (21)	27 (30)	–
ПФ6-В	1	3 (4)	3 (4)	7 (8)	9 (10)	13 (14)	19 (20)	26 (29)	–
ПФ16-А	–	–	–	6	8	11	17	23	–
ПФ20-А	–	–	–	–	–	10	14	20	–
ПС6-А	1	3 (4)	3 (4)	8 (9)	10 (11)	14 (16)	21 (22)	29 (33)	–
ПС12-А	–	–	3	7	9 (10)	13 (14)	19 (20)	26 (29)	(38)
ПС16-А	–	–	–	6	8	11	16	22	–
ПС16-Б	–	–	–	6	8	12	17	24	–
ПС22-А	–	–	–	–	–	10	15	21	30
ПС30-А	–	–	–	–	–	11	16	22	32

4.2.3 Вихідні дані для розрахунку гірлянди ізоляторів:

- 4.2.3.1 номінальна напруга високовольтної ЛЕП U_n , кВ;
 4.2.3.2 ступінь забрудненості атмосфери;
 4.2.3.3 мінімальний розрядний повітряний проміжок між проводом і конструкцією опори ЛЕП складає (2,5...3,0) м.

4.2.4 Приклад розрахунку довжини гірлянди ізоляторів ЛЕП 330 кВ.

4.2.4.1 Вихідні дані варіанту для розрахунку:

$U_{ном} = 330$ кВ; ступінь забрудненості атмосфери - II.

4.2.4.2 Розрахунок кількості ізоляторів у гірлянді при максимальній робочій напрузі та стійкості до внутрішніх перенапруг ЛЕП.

Зважаючи на номінал ЛЕП та низький ступінь забрудненості атмосфери, вибираємо ізолятор типу **ПФ6-В**: П – підвісний; Ф – фарфоровий; 6 – гарантована електромеханічна міцність 6 кН; В – конструктивне виконання.

Його основні характеристики:

- будівельна висота $H = 140$ мм = 14 см;
- діаметр тарілки $D = 270$ мм = 27 см;
- довжина шляху струму витoku $L_b = 324$ мм = 32,4 см;
- діюча напруга корони $U_{кор} = 35$ кВ;
- розрахункова середня мокро-розрядна напруженість $E_{мр} = 2,5$ кВ/см.

З табл. 2.2 визначаємо питому ефективну довжину струму витoku ізолятора на висоті до 1000 м. При ступені забрудненості атмосфери II для ЛЕП 330 кВ питома ефективна довжина струму витoku ізолятора $\lambda_{ef} = 1,5 \frac{см}{кВ}$.

Визначаємо коефіцієнт ефективності ізолятора

$$K = 1 + 0,5 \left(\frac{L_{61}}{D} - 1 \right) = 1 + 0,5 \left(\frac{32,4}{27} - 1 \right) = 1,1.$$

Кількість ізоляторів n у гірлянді (з врахуванням збільшення на 2 штуки для ЛЕП та РП при $U_{\text{ном}} \geq 300 \text{ кВ}$) при максимальній робочій напрузі

$$n = 2 + \frac{k \cdot \lambda_{\text{еф}} \cdot U_{\text{роб. макс.}}}{L_{\text{в}_1}} = 2 + \frac{1,1 \cdot 1,5 \cdot 1,1 \cdot 330}{32,4} = 2 + 18,49 = 20,49.$$

Приймаємо $n = 21$.

Перевіряємо стійкість гірлянди ізоляторів до внутрішніх комутаційних перенапруг з кратністю напруги $k_p \geq 2$:

$$k_p = \frac{n \cdot E_{\text{мр}} \cdot H}{U_{\text{роб. макс}}} = \frac{21 \cdot 2,5 \cdot 14}{1,1 \cdot 330} = 2,034 \geq 2.$$

Умова стійкості гірлянди ізоляторів виконується.

4.2.4.3 Розрахунок довжини гірлянди ізоляторів та величини мінімальних розрядних проміжків.

Довжина гірлянди ізоляторів

$$L_{\text{Г}} = H \cdot n = 14 \cdot 21 = 294 \text{ см.}$$

Оскільки величина мінімального розрядного повітряного проміжку між проводом і елементами конструкції опори при двократній перенапрузі складає $L_{\text{розр}} = (250 \dots 300) \text{ см}$ (прийmemo $L_{\text{розр}} = 300 \text{ см}$), відстань між точкою підвісу гірлянди до траверси чи до опори повинна бути не меншою

$$L_{\text{ГР}} = L_{\text{Г}} + L_{\text{розр}} = 294 + 300 = 594 [\text{см}].$$

4.2.4.4 Висновки щодо отриманих результатів.

Гірлянда, що складається з ізоляторів типу ПФ 6–В в кількості $n = 21 \text{ шт.}$, забезпечить стійкість ЛЕП 330 кВ в умовах II–го типу забрудненості атмосфери при 2–кратній робочій внутрішній перенапрузі.

4.3 Розрахунок втрат потужності на коронний розряд залежно від погодних умов

[2, с.16–45; 65–102; 3; 5, с.24–56; 5, с.56–82].

4.3.1 Математична модель для розрахунку.

4.3.1.1 Коронний розряд на проводах повітряних ЛЕП та його характеристики.

Коронний розряд або корона – це самостійний розряд, який виникає в різконеоднорідних полях, де іонізаційні процеси можуть відбуватися лише у вузькій області поблизу електродів. До такого роду полів відноситься і електричне поле проводів повітряних ліній електропередачі.

Напруженість поля коронного розряду при заданій густині повітря δ визначається для проводів радіуса r згідно виразу:

$$E_k = 24,5 \cdot m \cdot \delta \left[1 + \frac{0,65}{(\delta \cdot r)^{0,38}} \right] \left[\frac{\kappa B}{\text{см}} \right], \quad (3.1)$$

який справедливий при від'ємній полярності проводу, однак може використовуватись і при додатній полярності, оскільки вплив полярності при утворенні корони невеликий.

Для малих радіусів проводів ($r \leq 1$ см) можна використовувати формулу Ф. Піка

$$E_k = 30,3 \cdot m \cdot \delta \left(1 + \frac{0,301}{\sqrt{\delta \cdot r}} \right). \quad (3.2)$$

Тут при визначенні початкової напруженості коефіцієнт шорсткості m враховує як форму поверхні витого проводу ($m_1 = 0,82 \div 0,94$ в залежності від марки проводу), так і погодні умови (m_2): $m = m_1 \cdot m_2$.

При коронному розряді в результаті іонізації повітря біля поверхні проводу утворюються частинки обох знаків. Під дією електричного поля у зоні, де відсутня іонізація, відбувається рух до землі об'ємного заряду того ж знаку, що й полярність напруги на проводі (див. рис. 3.1).

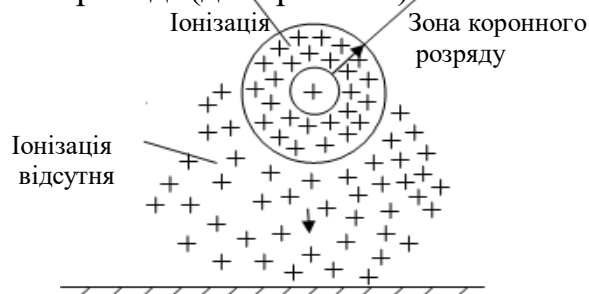


Рисунок 3.1 - Розподіл об'ємного заряду при уніполярній короні на проводі

Так як об'ємний заряд при будь-якій полярності проводу виноситься (рухається) від проводу до землі, напруженість поля в «чохлі» біля поверхні проводу зменшується. Зменшується при цьому і сам радіус «чохла» корони. Внаслідок цього відбувається підсилення іонізації повітря, а об'ємний заряд поновлюється з проводу. Напруженість поля в підсумку зберігається на

початковому рівні E_k . Таким чином, внаслідок безперервного видалення об'ємного заряду від проводу *уніполярний коронний розряд* може підтримуватися як завгодно довго.

Рух іонів під дією сил електричного поля утворює струм у проміжку між коронуючим проводом і землею. Для цього необхідні витрати енергії, які і визначають, в основному, втрати енергії на корону, оскільки витрати електричної енергії на іонізацію повітря набагато менші.

Для проводів великого діаметра напруженість електричного поля із збільшенням віддалі від поверхні проводу зменшується повільно. Тому зона іонізації має великі розміри. При цьому навіть для початкових напруг утворені іонізовані лавини можуть досягати критичної довжини - корона одразу виникає у *стримерній* формі, структура зони іонізації дискретна, світяться багаточисленні стримерні канали.

На проводах малих діаметрів (менше 1 см) напруженість поля з віддаленням від поверхні проводу різко зменшується; зона іонізації досить вузька і однорідна; корона виникає в *лавинній* формі; свічення зосереджене у вузькому каналі вздовж поверхні проводу у «чохлі». При збільшенні напруги понад початкову розміри зони іонізації зростають і корона з лавинної форми переходить у стримерну.

Струм стримерної корони складається з окремих імпульсів струму з дуже крутим фронтом (тривалість фронту ~ 10 нс). Ця високочастотна складова струму корони є джерелом інтенсивного електромагнітного випромінювання з широким спектром частот, яке створює радіо - та телезавади. При коронуванні проводів ліній надвисокої напруги може також виникати звуковий ефект, особливо сильний при дощі.

При коронуванні двох різнойменно заряджених проводів (рис. 3.2) іони різних знаків рухаються назустріч один одному. В області пониженої напруженості поля - посередині відбувається часткова рекомбінація іонів. Значна ж їх частина досягає зони корони протилежної полярності, підсилюючи там поле.

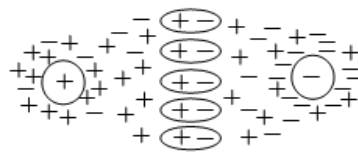


Рисунок 3.2 - Розподіл об'ємних зарядів при біполярній короні на проводах

В результаті цього інтенсивність іонізації зростає, струм корони, а, відповідно, й втрати енергії на корону, збільшуються. Такий режим коронування називається *біполярною короною*.

При *змінній нарузі* корона запалюється в момент, коли напруженість поля біля проводу досягає значення E_0 і горить, поки напруга не досягає максимуму. Після цього напруженість поля біля проводу стає нижчою E_0 – корона гасне. Оскільки іони мають малу рухливість, напруженість поля біля проводу кожного наступного півперіоду підсилюється об'ємним зарядом, який залишився від попереднього півперіоду; миттєве значення напруги, при якій корона

запалюється кожного наступного півперіоду (напряга запалювання), менше початкової напруги.

Залежність напруги запалювання від амплітуди напруги на проводі називається *характеристикою запалювання корони*. Чим вища напруга на проводі, тим більше напруга запалювання відрізняється від початкової напруги. При змінній напрузі коронування проводів більш інтенсивне, ніж при постійній напрузі, і, при рівних умовах, витрати енергії на корону суттєво вищі.

На характеристики коронного розряду – початкову напругу, витрати енергії, радіозавади значний вплив справляють погодні умови. Атмосферні опади підсилюють напруженість електричного поля біля проводу, утворюють на його поверхні водяні або льодяні виступи, вістрі. Початкова напруга корони при цьому різко знижується. Прийнято зміну стану проводу при атмосферних опадах враховують через коефіцієнт шорсткості проводу. Для оцінки початкової напруженості згідно (3.1) прийнято, що коефіцієнт шорсткості проводу $m_2 = 0,60$ при іній, ожеледі та паморозі. В умовах дощу або снігу в залежності від інтенсивності опадів коефіцієнт шорсткості приймається в межах $m_2 = 0,57 \div 0,73$.

4.3.1 2 Розрахунок втрат потужності на місцеву корону.

Збільшенням діаметра проводів та зниженням напруженості поля на їх поверхні неможливо позбутися коронного розряду при несприятливих погодних умовах. Більш того, навіть при ясній погоді не може бути виключена корона, наприклад, у місцях пошкодження поверхні проводу та арматури гирлянд, на елементах кріплення, тобто у точках місцевого підсилення напруженості електричного поля. Таку корону називають *місцевою* на відмінну від *загальної* корони, яка існує вздовж всієї поверхні проводів при $E > E_0$.

Оскільки річні витрати енергії на корону складають помітне значення і можуть досягати 40% витрат на нагрів проводів, вони істотно впливають на техніко-економічні характеристики ЛЕП і їх необхідно оцінювати.

Оцінка втрат енергії на корону здійснюється на основі експериментально отриманих результатів випробовувань. Великого розповсюдження набув емпіричний вираз Ф. Піка, який без змін використовується донині:

$$P_k = \frac{241}{\delta} (f + 25) \sqrt{\frac{r}{D}} (U_\phi - U_0)^2 \cdot 10^{-6} \left[\frac{\text{кВт}}{\text{км}} \text{ на фазу} \right], \quad (3.3)$$

де δ - відносна густина повітря;

f - частота струму, Гц;

r та D - радіус проводів та відстань між ними, см;

U_ϕ - середня фазна напруга на ділянці коронування лінії, кВ;

U_0 - мінімальна напруга, при якій на лінії виникає корона, кВ:

$$U_0 = 30,3 \cdot m \cdot \delta \cdot r \cdot \ln \frac{D}{r}; \quad (3.4)$$

10^{-6} – порядковий множник, встановлений автором даних Методичних вказівок на заміну множника « 10^{-5} », як результат розрахунків різними способами втрат потужності на корону ЛЕП.

Виразом (3.3) можна користуватися при *симетричному* розміщенні проводів у лінії. Для трифазних ліній з *несиметричним* розміщенням проводів ця формула непридатна, т.я. густина зарядів, а, відповідно, і напруженість поля на

різних проводах неоднакові. Для підрахунку втрат енергії на корону у випадку несиметричної лінії доцільніше користуватися видозміненим виразом Ф. Піка, у якому напруги U_ϕ та U_0 замінені напруженістю електричного поля біля поверхні проводу:

$$P_k = \frac{241}{\delta} (f + 25) \sqrt{\frac{r}{D}} \cdot r^2 \left(\ln \frac{D}{r} \right)^2 \cdot (E_{\max} - 30,3 \cdot m \cdot \delta)^2 \cdot 10^{-6} \left[\frac{\text{кВт}}{\text{км}} \text{ на фазу} \right]. \quad (3.5)$$

Напруженість поля E на поверхні проводів лінії в залежності від їх радіуса і взаємного розміщення визначається з *рівнянь Максвелла*, які пов'язують заряди на проводах та їх потенціали (див. Завдання №1), а замість дійсних відстаней між проводами - взяти для (3.5) середньгеометричну відстань $D_{cp} = \sqrt[3]{D_{12} \cdot D_{23} \cdot D_{13}}$.

У виразі (3.5) коефіцієнт «30,3» – початкова напруженість електричного поля $E_{0\max}$ для деякої усередненої ЛЕП. При обчисленні втрат потужності на корону згідно даних Методичних вказівок необхідно застосувати значення $E_{0\max}$ з таблиці 1.2 у відповідності до варіанту Завдання.

Значно більше, ніж відстань впливає на результати розрахунків коефіцієнт m , який враховує стан поверхні проводів та атмосферні умови за допомогою множників m_1 та m_2 .

Для лінії з *симетричним* розміщенням проводів, виходячи з результатів експериментів, проф. Казанського університету М.К. Залескій запропонував наступну емпіричну формулу визначення втрат на корону:

$$P_k = \frac{2,22 \cdot \left(f + \frac{6000}{D} \right) \cdot (U_\phi - U_0)^2 \cdot 10^{-4}}{\ln \frac{D}{L_{cp}}} \left[\frac{\text{кВт}}{\text{км}} \text{ на фазу} \right], \quad (3.6)$$

де L_{cp} – середня довжина, см, переміщення іонів за півперіод напруги, яка визначається з виразу:

$$L_{cp} = 19 \sqrt{\frac{r \cdot E_{0k}}{f}}, \quad (3.7)$$

де E_{0k} - напруженість поля частотою 50 Гц видимої корони, $\text{кВ} \cdot \text{см}^{-1}$, яка визначається з виразу (3.2).

4.3.1.3 Розрахунок втрат потужності на загальну корону.

Розрахунок втрат на корону для ліній електропередач надвисоких лінійних напруг (330–750 кВ) відрізняється від наведеного вище тим, що в даному випадку високі напруженості електричного поля викликають загальну корону, яка покриває всю протяжність поверхні проводу при несприятливих погодних умовах.

Початкову максимальну напруженість $E_{0\max}$ електричного поля у випадку появи загальної корони визначають згідно виразу (3.2).

В таблиці 1.2 наведені значення розрахункового радіуса та початкової напруженості при відносній густині повітря $\delta = 1$ для основних марок сталелеюмінієвих проводів.

Так як на втрати енергії при короні на лінії істотний вплив мають атмосферні явища і погодні умови, виокремлюються 4 групи погоди: ясна погода (без опадів); сухий сніг; дощ і мокрий сніг; паморозь, іній, ожеледь. На рис 3.3

подані узагальнені криві питомих втрат потужності на корону для вищенаведених видів погоди.

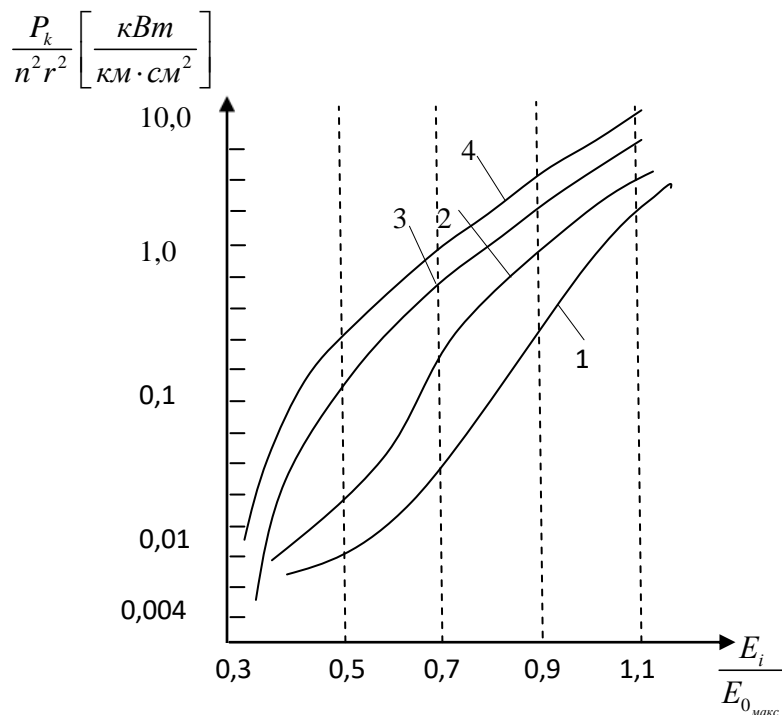


Рисунок 3.3 - Узагальнені характеристики втрат потужності на загальну корону в ЛЕП для погодних умов:

- 1 – ясна погода;
- 2 – сніг;
- 3 – дощ інтенсивністю 1 мм/год.;
- 4 – паморозь

Характеристики втрат потужності на загальну корону подані у виді залежностей:

$$\frac{P_k}{n^2 \cdot r^2} = f\left(\frac{E_i}{E_{0\max}}\right), \quad (3.8)$$

де P_k - втрати потужності на корону на проводі, $\text{кВт} \cdot \text{км}^{-1}$;

n - кількість проводів у фазі;

r - радіус проводу, см ;

E_i – робоча напруженість електричного поля на i -тому проводі, $\text{кВ} \cdot \text{см}^{-1}$;

$E_{0\max}$ - початкова напруженість електричного поля, $\text{кВ} \cdot \text{см}^{-1}$, при густині повітря $\delta = 1$.

У трифазній лінії середньорічні втрати потужності на загальну корону визначаються як сумарні для всіх видів погоди згідно виразу:

$$P_k = \frac{n^2 \cdot r^2}{8760} \left\{ \begin{array}{l} \left[f_{\text{я}} \left(\frac{E_1}{E_0 \cdot \delta^{\frac{2}{3}}} \right) + f_{\text{я}} \left(\frac{E_2}{E_0 \cdot \delta^{\frac{2}{3}}} \right) + f_{\text{я}} \left(\frac{E_3}{E_0 \cdot \delta^{\frac{2}{3}}} \right) \right] \cdot T_{\text{я}} + \\ \left[f_{\text{д}} \left(\frac{E_1}{E_0} \right) + f_{\text{д}} \left(\frac{E_2}{E_0} \right) + f_{\text{д}} \left(\frac{E_3}{E_0} \right) \right] \cdot T_{\text{д}} + \\ \left[f_{\text{н}} \left(\frac{E_1}{E_0} \right) + f_{\text{н}} \left(\frac{E_2}{E_0} \right) + f_{\text{н}} \left(\frac{E_3}{E_0} \right) \right] \cdot T_{\text{н}} + \\ \left[f_{\text{с}} \left(\frac{E_1}{E_0} \right) + f_{\text{с}} \left(\frac{E_2}{E_0} \right) + f_{\text{с}} \left(\frac{E_3}{E_0} \right) \right] \cdot T_{\text{с}} \end{array} \right\}, \left[\frac{\text{кВт}}{\text{км}} \text{ на лінію} \right], \quad (3.9)$$

де E_1, E_2, E_3 - середні напруженості поля на проводах кожної фази при середній експлуатаційній напрузі лінії, кВ ;

$T_{\text{я}}, T_{\text{д}}, T_{\text{н}}, T_{\text{с}}$ - середньорічна тривалість видів погоди, *годин*, (див. табл. 3.1);

$f_{\text{я}}, f_{\text{д}}, f_{\text{н}}, f_{\text{с}}$ - значення залежностей втрат на корону, $\text{кВт} \cdot \text{км}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$, від відношення $\frac{E_i}{E_0}$ ($i = 1, 2, 3$);

δ - відносна густина повітря при середньорічних значеннях тиску p та температури $t^{\circ}\text{C}$ ($\delta = 1$ для ліній, прокладених на висоті до 500 м над рівнем моря).

Тривалість паморозі слід враховувати окремо з розподілом її на кристалічну та зернисту, внаслідок того, що при визначенні тривалості кристалічної паморозі необхідно враховувати зменшення її впливу внаслідок нагріву проводів робочим струмом. Для цього вводиться поправковий коефіцієнт γ , перемноженням на який тривалість кристалічної паморозі зменшується і додається до тривалості ясної погоди (див. рис. 3.4).

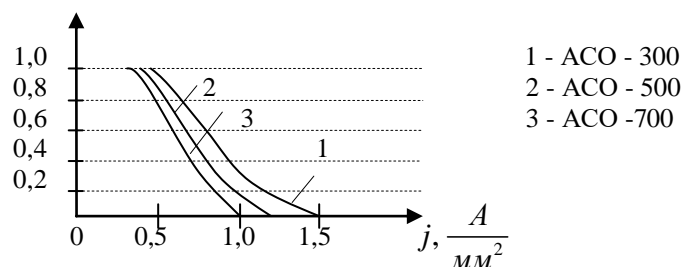


Рисунок 3.4 - Залежність коефіцієнта γ від густини струму j для різних проводів

Для уточнення втрат потужності на корону у лінії на окремих її ділянках здійснюються заміри втрат. Такі ж заміри проводяться на дослідних ділянках; результати порівнюються.

В техніко-економічних розрахунках рекомендовано враховувати втрати на корону ЛЕП якщо $E_{\text{макс}} > E_0$. Економічно прийнятні втрати потужності на корону мають місце при $\frac{E_{\text{макс}}}{E_0} \leq 0,9$ і це співвідношення є визначальним при виборі проводів лінії електропередачі з умови обмеження втрат потужності на корону.

4.3.2 Характеристики коефіцієнтів та змінних моделі.

При проектуванні ліній електропередачі у районах з помірним кліматом на рівнинній місцевості (80% території України) рекомендовано приймати тривалість різних видів погоди згідно даних табл. 3.1.

Таблиця 3.1 - Тривалість різних видів погоди

Види погоди	Тривалість T за рік, год.
Ясна погода (я)	7120
Дощ та мокрий сніг (д)	500
Паморозь зерниста та ожеледь (пз)	110
Паморозь кристалічна (пк)	230
Сніг (с)	800

При розрахунку довжини ділянки коронування ЛЕП довжину повітряної ЛЕП порівнюємо з довжинами ділянок коронування кожної з фаз, виходячи з наступної побудови:

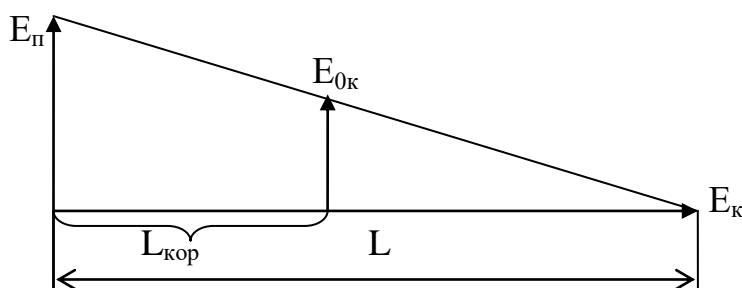


Рисунок 3.5 - Визначення співвідношень довжини ділянки коронування

$$\frac{E_n - E_k}{L} = \frac{E_n - E_0}{L_{кор}}, \quad (3.10)$$

де E_n – розрахункова напруженість електричного поля на поверхні проводів ЛЕП при максимальній номінальній напрузі ($1,15 \cdot U_n$), кВ;

E_k – те ж при мінімальній номінальній напрузі ($0,95 \cdot U_n$), кВ;

$L_{кор}$ – ділянка коронування високовольтної ЛЕП довжиною L , км.

$$\frac{E_k}{E_n} = \frac{U_n \cdot 0,95}{U_n \cdot 1,15}; \quad E_k = 0,83 \cdot E_n. \quad (3.11)$$

З врахуванням останнього співвідношення між початковою і кінцевою напруженостями поля маємо

$$L_{кор} = L \cdot \frac{E_n - E_0}{E_n - E_k} = L \cdot \frac{E_n - E_0}{0,17 \cdot E_n} = L \cdot \frac{E_{i_{ВМ}} - E_0}{0,17 \cdot E_{i_{ВМ}}}. \quad (3.12)$$

4.3.3 Вихідні дані для розрахунку з використанням максимальних напруженостей електричного поля згідно завдання №1:

4.3.3.1 номінальна напруга високовольтної ЛЕП U_n , кВ;

4.3.3.2 марка проводу;

4.3.3.3 діаметр витого проводу $2r$, мм;

4.3.3.4 середньгеометрична відстань між фазами $D_{ср}$, м;

- 4.3.3.5 напруженість електричного поля $E_{i \text{ в м}}$ на поверхні витого проводу розщепленої i -тої фази, $\text{кВ} \cdot \text{см}^{-1}$;
- 4.3.3.6 частота f промислової мережі, Гц ;
- 4.3.3.7 початкова напруженість електричного поля на поверхні сталевалюмінієвого проводу (див. табл. 1.2) $E_{0 \text{ макс}}$, $\text{кВ} \cdot \text{см}^{-1}$;
- 4.3.3.8 температура (t , $^{\circ}\text{C}$), тиск повітря (p , мм рт.ст.), коефіцієнт m_1 шорсткості проводів і коефіцієнт m_2 впливу погодних умов на шорсткість проводів при ясній погоді;
- 4.3.3.9 температура (t , $^{\circ}\text{C}$), тиск повітря (p , мм рт.ст.), коефіцієнт m_1 шорсткості проводів і коефіцієнт m_2 впливу погодних умов на шорсткість проводів при тумані;
- 4.3.3.10 довжина L досліджуваної ділянки високовольтної ЛЕП, км .

4.3.4 Приклад розрахунку втрат потужності на корону ЛЕП 330 кВ.

4.3.4.1 Вихідні дані варіанту для розрахунку:

$U_{\text{ном}} = 330 \text{ кВ}$; марка проводу: $4 \times \text{АСУ } 300/39$; $2r_0 = 24 \text{ мм}$; $a = 40 \text{ см}$; $D_{12} = D_{23} = D_{\text{ср}} = 11 \text{ м}$; $E_{1 \text{ в м}} = E_{3 \text{ в м}} = 24,86 \text{ кВ} \cdot \text{см}^{-1}$; $E_{2 \text{ в м}} = 27,04 \text{ кВ} \cdot \text{см}^{-1}$; $f = 50 \text{ Гц}$; $E_{0 \text{ макс}} = 31,43 \text{ кВ} \cdot \text{см}^{-1}$; $L = 200 \text{ км}$;

- ясна погода: $t = -10^{\circ}\text{C}$; $p = 730 \text{ мм рт.ст.}$; $m_1 = 1,0$; $m_2 = 0,80$;

- туман: $t = 4^{\circ}\text{C}$; $p = 720 \text{ мм рт.ст.}$; $m_1 = 0,8$; $m_2 = 0,90$.

4.3.4.2 Розрахунок питомих втрат потужності на корону кожної з фаз ЛЕП.

Втрати на корону при ясній погоді.

Розрахунок питомих втрат на корону кожної з фаз ЛЕП 330 кВ проводимо за формулою:

$$P_{\text{кор.}i} = \frac{241}{\delta} (f + 25) \cdot \sqrt{\frac{r_0}{D_{\text{ср}}}} \cdot r_0^2 \left(\ln \frac{D_{\text{ср}}}{r_0} \right)^2 \cdot (E_{\text{в м}_i} - E_0)^2 \cdot 10^{-6}, \left[\frac{\text{кВт}}{\text{км}} \text{ на фазу} \right].$$

Густина повітря

$$\delta_{\text{я}} = 0,386 \cdot \frac{p_{\text{я}}}{t_{\text{я}} + 273} = 0,386 \cdot \frac{730}{-10 + 273} = 1,071.$$

Втрати на корону при ясній погоді для кожної з фаз:

$$\begin{aligned} P_{\text{кор.я1}} &= \frac{241}{\delta_{\text{я}}} (f + 25) \sqrt{\frac{r_0}{D_{\text{ср}}}} r_0^2 \left(\ln \left(\frac{D_{\text{ср}}}{r_0} \right) \right)^2 \cdot (E_{\text{в м}_1} - 31,43 \cdot \delta_{\text{я}} \cdot m_{1\text{я}} \cdot m_{2\text{я}})^2 \cdot 10^{-6} = \\ &= \frac{241}{1,071} \cdot (50 + 25) \cdot \sqrt{\frac{1,2}{1100}} \cdot 1,2^2 \cdot \left(\ln \left(\frac{1100}{1,2} \right) \right)^2 \cdot (24,86 - 31,43 \cdot 1,071 \cdot 0,8 \cdot 1,0)^2 \cdot 10^{-6} = \\ &= 16876,75 \cdot 0,033 \cdot 1,44 \cdot 46,52 \cdot (-2,07)^2 \cdot 10^{-6} = 0,160 \quad [E_{\text{в м}_1} \leq E_0]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
P_{корЯ2} &= \frac{241}{\delta_{Я}} (f + 25) \sqrt{\frac{r_0}{D_{cp}}} r_0^2 \left(\ln \left(\frac{D_{cp}}{r_0} \right) \right)^2 \cdot (E_{\epsilon_{M2}} - 31,43 \cdot \delta_{Я} \cdot m_{1Я} \cdot m_{2Я})^2 \cdot 10^{-6} = \\
&= \frac{241}{1,071} \cdot (50 + 25) \cdot \sqrt{\frac{1,2}{1100}} \cdot 1,2^2 \cdot \left(\ln \left(\frac{1100}{1,2} \right) \right)^2 \cdot (27,04 - 31,43 \cdot 1,071 \cdot 0,8 \cdot 1,0)^2 \cdot 10^{-6} = \\
&= 16876,75 \cdot 0,033 \cdot 1,44 \cdot 46,52 \cdot (+0,111)^2 \cdot 10^{-6} = 0,458 \cdot 10^{-3} \left[\frac{\text{кВт}}{\text{км}} \text{ на фазу} \right];
\end{aligned}$$

$$P_{корЯ1} = P_{корЯ3} - \text{корона на першій і третій фазі відсутня.}$$

Втрати на корону в умовах туману.

Густина повітря

$$\delta_T = 0,386 \cdot \frac{P_T}{t_T + 273} = 0,386 \cdot \frac{720}{4 + 273} = 1,003.$$

Втрати на корону в умовах туману для кожної з фаз

$$\begin{aligned}
P_{корТ1} &= \frac{241}{\delta_T} (f + 25) \sqrt{\frac{r_0}{D_{cp}}} r_0^2 \left(\ln \left(\frac{D_{cp}}{r_0} \right) \right)^2 \cdot (E_{\epsilon_{M1}} - 31,43 \cdot \delta_T \cdot m_{1T} \cdot m_{2T})^2 \cdot 10^{-6} = \\
&= \frac{241}{1,003} \cdot (50 + 25) \cdot \sqrt{\frac{1,2}{1100}} \cdot 1,2^2 \cdot \left(\ln \left(\frac{1100}{1,2} \right) \right)^2 \cdot (24,86 - 31,43 \cdot 1,003 \cdot 0,9 \cdot 0,8)^2 \cdot 10^{-6} = \\
&= 18020,94 \cdot 0,033 \cdot 1,44 \cdot 46,52 \cdot (+2,163)^2 \cdot 10^{-6} = 0,186 \left[\frac{\text{кВт}}{\text{км}} \text{ на фазу} \right];
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
P_{корТ2} &= \frac{241}{\delta_T} (f + 25) \sqrt{\frac{r_0}{D_{cp}}} r_0^2 \left(\ln \left(\frac{D_{cp}}{r_0} \right) \right)^2 \cdot (E_{\epsilon_{M2}} - 31,43 \cdot \delta_T \cdot m_{1T} \cdot m_{2T})^2 \cdot 10^{-6} = \\
&= \frac{241}{1,003} \cdot (50 + 25) \cdot \sqrt{\frac{1,2}{1100}} \cdot 1,2^2 \cdot \left(\ln \left(\frac{1100}{1,2} \right) \right)^2 \cdot (27,04 - 31,43 \cdot 1,003 \cdot 0,9 \cdot 0,8)^2 \cdot 10^{-6} = \\
&= 18020,94 \cdot 0,033 \cdot 1,44 \cdot 46,52 \cdot (+4,343)^2 \cdot 10^{-6} = 0,751 \left[\frac{\text{кВт}}{\text{км}} \text{ на фазу} \right];
\end{aligned}$$

$$P_{корТ1} = P_{корТ3}.$$

Корона присутня на всіх фазах ЛЕП в умовах туману.

4.3.4.3 Розрахунок втрат потужності кожної з фаз ЛЕП при ясній погоді й при тумані.

Початкові напруженості електричного поля корони на ЛЕП з проводами АСУ 300/39 при ясній погоді і в умовах туману:

$$E_{0Я} = 31,43 \cdot m_{1Я} \cdot m_{2Я} \cdot \delta_{Я} = 31,43 \cdot 0,8 \cdot 1,0 \cdot 1,071 = 26,93 \frac{\text{кВ}}{\text{см}};$$

$$E_{0T} = 31,43 \cdot m_{1T} \cdot m_{2T} \cdot \delta_T = 31,43 \cdot 0,9 \cdot 0,8 \cdot 1,003 = 22,70 \frac{\text{кВ}}{\text{см}}.$$

Довжини ділянок коронування фаз при ясній погоді:

$$L_{1корЯ} = L \cdot \frac{E_{\epsilon_{M1}} - E_{0Я}}{0,17 \cdot E_{\epsilon_{M1}}} = 200 \cdot \frac{24,86 - 26,93}{0,17 \cdot 24,86} = -197,96 \leq 0;$$

$$L_{2корЯ} = L \cdot \frac{E_{\epsilon_{M2}} - E_{0Я}}{0,17 \cdot E_{\epsilon_{M2}}} = 200 \cdot \frac{27,04 - 26,93}{0,17 \cdot 27,04} = 4,79 [\text{км}];$$

$$L_{3\text{кор}Я} = L_{1\text{кор}Я} = -197,96 \leq 0.$$

Довжина ділянки коронування в умовах туману:

$$L_{1\text{кор}Т} = L \cdot \frac{E_{1ВМ} - E_{0Т}}{0,17 \cdot E_{1ВМ}} = 200 \cdot \frac{24,86 - 22,70}{0,17 \cdot 24,86} = 102,22 \text{ [км]};$$

$$L_{2\text{кор}Т} = L \cdot \frac{E_{2ВМ} - E_{0Т}}{0,17 \cdot E_{2ВМ}} = 200 \cdot \frac{27,04 - 22,70}{0,17 \cdot 27,04} = 188,83 \text{ [км]};$$

$$L_{3\text{кор}Т} = L_{1\text{кор}Т} = 102,22 \text{ [км]}.$$

Сумарні втрати потужності на дільницях коронування високовольтної ЛЕП 330 кВ матимуть наступні значення:

– в ясну погоду

$$\sum P_{\text{кор}Я} = \sum_{i=1}^3 P_{\text{кор}Я_i} \cdot L_{\text{кор}Я_i} = P_{\text{кор}Я_2} \cdot L_{\text{кор}Я_2} = 0,458 \cdot 10^{-3} \cdot 4,79 = 2,19 \cdot 10^{-3} \text{ [кВт]};$$

– в умовах туману

$$\begin{aligned} \sum P_{\text{кор}Т} &= \sum_{i=1}^3 P_{\text{кор}Т_i} \cdot L_{\text{кор}Т_i} = 2 \cdot P_{\text{кор}Т_1} \cdot L_{\text{кор}Т_1} + P_{\text{кор}Т_2} \cdot L_{\text{кор}Т_2} = 2 \cdot 0,186 \cdot 102,22 + 0,751 \cdot 188,83 = \\ &= 179,84 \text{ [кВт]}. \end{aligned}$$

4.3.4.4 Висновки щодо отриманих результатів.

На дільниці довжиною ~ 5 км другої фази даної ЛЕП 330 кВ при ясній погоді присутній коронний розряд, який зумовлює невеликі втрати її потужності. Збільшення втрат потужності ЛЕП в умовах туману, причому на всіх її фазах, є явищем закономірним; сумарні втрати становлять ~ 180 кВт практично на всій розрахунковій довжині.

Оскільки розрахунок будівельних розмірів високовольтних ЛЕП проводиться з умовою повної відсутності втрат на корону при ясній погоді, необхідне невелике коригування будівельних розмірів даної ЛЕП 330 кВ. При цьому неодмінно зменшаться втрати потужності на корону в умовах туману.

Рекомендована література

Основна

1. Бондаренко В.О. Конфігурації ліній електропередачі : навч. посібн. / В.О. Бондаренко, В.В. Черкашина. – Харків : Вид-во «Факт», 2020. – 174 с.
2. Вакуленко О.О. Конспект лекцій з дисципліни «Техніка високих напруг» : метод. вказівки для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». – Тернопіль : ТНТУ ім. Івана Пулюя, 2017. – 180 с.
3. Вакуленко О.О. Техніка високих напруг [електронний ресурс] // Інституційний репозитарій ATutor (код дисципліни ID: 1382) : офіційний сайт Тернопіль. нац. техн. ун-ту ім. Івана Пулюя. – Тернопіль, 2012.
4. Дьяков Є.Д. Повітряні лінії електропередачі : лекції з дисципліни «Кабельні та повітряні лінії електропередачі». – Харків : ХНАМГ, 2008. – 67 с.
5. Маврін О.І. Техніка та електрофізика високих напруг : конспект лекцій / О.І. Маврін, К.Б. Покровський. – Львів : Вид-во НУ «Львівська політехніка», 2008. – 100 с.
6. Рой В.Ф. Техніка високих напруг : навч. посібн. – Харків : ХНУМГ, 2012. – 145 с.
7. Техніка високих напруг : навч. посібн. / Укл. П.Д. Мар'янчук, Е.В. Майструк. - Чернівці : Рута, 2010. – 90 с.

Допоміжна

8. Акімов О.І. Техніка високих напруг. Ізоляція та перенапруги в пристроях електропостачання і електричної тяги залізничного транспорту : навч. посібн. / О.І. Акімов, Д.Л. Сушко. – Х. : УкрДАЗТ, 2009. – 217 с.
9. Сегеда М.С. Електричні мережі та системи : підручник. - Львів : Вид-во НУ «Львівська політехніка», 2007. – 488 с.
10. Захист підстанції від прямих ударів блискавки : метод. вказівки до розрах.-графічн. роботи з дисциплін: «Ізоляція і перенапруги в електричних мережах» та «Техніка високих напруг» для студентів електроенергетичного та електротехнічного фаху / В.М. Козюра, С.А. Соколовський. – К. : НТУУ «КПІ», 1995. – 28 с.
11. Техніка високих напруг: конспект лекцій (для студентів 4 курсу денної і заочної форм навчання спеціальності «Електротехнічні системи електроспоживання») / Укл. В.Ф. Рой ; Харк. нац. акад. міськ. госп-ва. – Харків : ХНАМГ, 2009. – 171 с.