

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГОТЕХНІКИ ТА АВТОМАТИКИ
КАФЕДРА ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ ТА СИСТЕМ**

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Валерій КИРИК

“ ____ ” _____ 202_р.

Дипломний проєкт

на здобуття ступеня бакалавра

**за освітньо-професійною програмою «Електричні системи і мережі»
спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
на тему «Ефект Ферранті в дальніх електропередачах змінного струму»**

Виконала:

Студентка IV курсу, групи ЕС-371

Соловей Любов Володимирівна _____

Керівник:

Доцент, к.т.н

Кацадзе Теймураз Луарсабович _____

Консультант:

Асистент

Моссаковський Вадим Ігорович _____

Рецензент:

Доцент кафедри ВДЕ

Бардик Є.І. _____

Засвідчую, що у цьому дипломному проєкті немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студентка _____

Київ – 2021 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Факультет електроенерготехніки та автоматики
Кафедра електричних мереж та систем

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма «Електричні системи і мережі»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Валерій КИРИК
(підпис) (ініціали, прізвище)

«___» _____ 202_ р.

ЗАВДАННЯ
на дипломний проект студенту
Соловей Любові Володимирівні
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту «Ефект Ферранті в дальніх електропередачах змінного струму»
керівник проекту Кацадзе Теймураз Луарсабович, к.т.н., доцент.
затверджені наказом по університету від «28» «квітня» 2021 р. №1095-с.
2. Строк подання студентом проекту «07» «червня» 2021 р.
3. Вихідні дані до проекту: номінальна напруга та довжина дальньої лінії електропередавання змінного струму, конструктивне виконання лінії електропередавання.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки: 1. Дослідження зарядної потужності та ефекту Ферранті для лінії надвисокої напруги. 2. Дослідження розподілу напруги вздовж повітряної лінії. 3. Визначення координати екстремальної точки за напругою вздовж повітряної лінії.
5. Перелік графічного матеріалу:
 - 5.1. Ефект Ферранті в повітряних лініях надвисокої напруги.
 - 5.2. Дослідження розподілу напруги вздовж лінії надвисокої напруги.
 - 5.3. Визначення координати екстремальної точки за напругою вздовж ПЛ.

6. Консультанти розділів проєкту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання « _ » _____.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Строк виконання етапів проєкту	Примітка
1	Аналіз технічної літератури за темою проєкту		
2	Дослідження ефекту Ферранті для дальніх ліній електропередавання змінного струму		
3	Дослідження розподілу напруги вздовж повітряної лінії		
4	Визначення координати екстремальної точки за напругою вздовж повітряної лінії		
5	Оформлення пояснювальної записки		
6	Оформлення технічних креслень		

Студент

(підпис)

Соловей Л.В.

Керівник проєкту

(підпис)

Кацадзе Т.Л.

Пояснювальна записка до дипломного проєкту

на тему: Ефект Ферранті в дальніх електропередачах змінного струму

Київ – 2021 року

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТУ

[illegible]

					ДП6109.141.006.ПЗ				
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					
Розроб.		Соловей Л.В.			Ефект Ферранті в дальніх електропередачах змінного струму		Літ.	Арк.	Аркуші
Перевір.		Кацадзе Т.Л.						5	65
							КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. ЕМС гр. ЕС-371		
Н. Контр.		Моссаковський							
Затв.		Кирик В.В.							

РЕФЕРАТ

Дипломний проект складається із пояснювальної записки та графічної частини. Пояснювальна записка виконана на 65 сторінках формату А4, до якої входить 4 таблиці, 10 рисунків та 4 джерела літератури. Графічна частина включає в себе 3 аркуші формату А1.

Метою виконання даної роботи є дослідження ефекту Ферранті та розподілу напруги вздовж траси лінії електропередачі.

В даному проекті сформовано функцію здійснено дослідження розподілу напруги вздовж траси лінії електропередачі. Виконано пошук екстремальної точки по напругі вздовж повітряної лінії електропередачі номінальною напругою 750 кВ.

ДАЛЬНЯ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧА, ЕФЕКТ ФЕРРАНТІ, ЕЛЕКТРИЧНА МЕРЕЖА, РОЗПОДІЛ НАПРУГИ

					ДП6109.141.006.ПЗ	Арк.
						6
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

ABSTRACT

The diploma project consists of an explanatory note and a graphic part. The explanatory note is made on 65 pages of A4 format, which includes 4 tables, 10 figures and 4 sources of literature. The graphic part includes 3 sheets of A1 format.

The purpose of this work is to study the Ferranti effect and voltage distribution along the route of the power line.

In this project the function of research of distribution of tension along a route of a power line is formed. A search for an extreme voltage point along the overhead transmission line with a nominal voltage of 750 kV was performed.

DISTANCE POWER TRANSMISSION, FERRANTI EFFECT, ELECTRICAL NETWORK, VOLTAGE DISTRIBUTION

					ДП6109.141.006.ПЗ	Арк.
						7
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

ЗМІСТ

ПЕРІЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ.....	9
ВСТУП.....	10
1 ЗАРЯДНА ПОТУЖНІСТЬ ЛІНІЙ НАДВИСОКОЇ НАПРУГИ.....	12
1.1 Параметри схем заміщення ЛЕП.....	12
1.2 Рівняння ДЕП.....	14
1.3 Хвильові параметри ДЕП.....	19
1.4 Натуральна потужність дальньої ДЕП.....	21
1.5 Зарядна потужність ліній та засоби компенсації.....	25
1.6 Опис ефекту Ферранті.....	31
Висновки до розділу 1.....	34
2 ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ НАПРУГИ ВЗДОВЖ ПЛ.....	36
2.1 Теоретичні відомості	36
2.2 Параметри схеми заміщення ЛЕП.....	39
2.3 Моделювання розподілу напруги вздовж лінії.....	41
Висновки до розділу 2.....	46
3 ВИЗНАЧЕННЯ КООРДИНАТИ ЕКСТРЕМАЛЬНОЇ ТОЧКИ ЗА НАПРУГОЮ ВЗДОВЖ ПЛ.....	47
3.1 Теоретичні відомості.....	47
3.2 Визначення координати екстремальної точки.....	52
Висновки до розділу 3.....	60
ВИСНОВКИ.....	62
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	64
ДОДАТОК А. Результати перевірки на плагіат.....	65

					ДП6109.141.006.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		8

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ

ДЕП – дальня електропередача

ЛЕП – лінія електропередавання;

ПЛ – повітряна лінія;

КШР – керований шунтувальний реактор;

ФАСТ - (англ. flexible alternating current transmission system) гнучка система передачі змінного струму

					ДП6109.141.006.ПЗ	Арк.
						9
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

ВСТУП

Для створення сучасних систем передачі та розподілу електроенергії необхідно використовувати новітні підходи до регулювання режимів електричних систем. А саме формувати електромережі, що самоналаштовуються, змінюючи власні параметри згідно поточних умов робочого режиму. Для досягнення цієї мети набувають широкого використання FACTS-технології їх застосування яких забезпечує самоналаштування електропередачі, що забезпечує гнучкість системи передачі електроенергії, збільшення пропускної здатності електричних мереж, здійснення раціонального регулювання рівня напруги в електричних мережах тощо.

Одним із FACTS-пристроїв є керовані шунтувальні реактори (КШР), що призначені для компенсації надлишкової зарядної потужності дальніх ліній електропередавання.

Для формування законів регулювання параметрів КШР необхідно враховувати експлуатаційні характеристики робочих режимів електромереж, що визначаються надвеликими зарядними струмами ліній електропередавання надвисокої номінальної напруги. Проходження цих струмів зумовлює появу ефекту Ферранті, що призводить до збільшення рівня напруги ближче до кінця лінії електропередавання, тобто в деяких режимах передавання енергії здійснюється від вузла із меншою напругою до вузла із більшою напругою.

В лініях електропередавання великої довжини зарядні потужності певним чином розподіляються між вузловими підстанціями на початку та в кінці лінії та, як наслідок, зростання рівня напруги спостерігається в проміжних точках лінії електропередавання, тобто спостерігається, так званий, «горб» профілю напруги вздовж траси лінії електропередавання. Відомо, що максимальне зростання рівня напруги внаслідок ефекту Ферранті відбувається в режимах малих навантажень, коли зарядна потужність лінії електропередавання не скомпенсована індуктивними втратами, зумовленими робочим струмом лінії.

					ДП6109.141.006.ПЗ	Арк.
						10
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Мета роботи полягає у дослідженні розподілу напруги вздовж ДЕП змінного струму. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- 1) Дослідити особливості виникнення ефекту Ферранті в магістральних повітряних лініях електропередавання;
- 2) Дослідити закони розподілу напруги вздовж ліній електропередавання;
- 3) Дослідити моделі визначення координати екстремальної точки за напругою вздовж траси магістральної лінії електропередавання.

					ДП6109.141.006.ПЗ	Арк.
						11
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

1 ЗАРЯДНА ПОТУЖНІСТЬ ЛІНІЙ НАДВИСОКОЇ НАПРУГИ

1.1 Параметри схем заміщення ЛЕП

ЛЕП представляє собою електротехнічний об'єкт із рівномірно розподіленим вздовж її довжини параметрами. До складу яких входять активний опір фаз R , індуктивність окремих фаз L та коефіцієнти взаємоіндукції M , активна провідність між проводами фаз G та фазними проводами і землею G_m , ємність між фазами C та фазними проводами і землею. На рис. 1.1 зображено схему заміщення ЛЕП у фазних координатах.

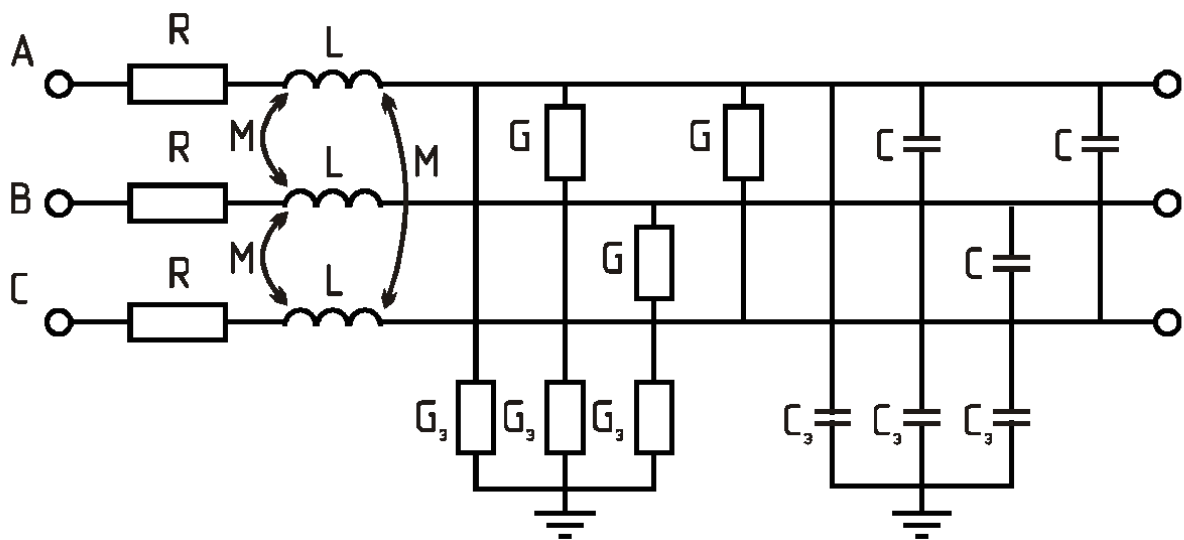


Рисунок 1.1 – Схема заміщення ЛЕП у фазних координатах

Для дальніх ліній електропередачі застосування схем заміщення у фазних координатах вимагає дуже громіздких розрахунків, що пов'язані із необхідності у врахуванні взаємного впливу параметрів окремих фаз, які зумовлені явищем взаємоіндукції, наявності часткової взаємної ємності між фазними проводами та ін. Тому для дослідження режимів роботи ДЕП замість систем координат фазного простору застосовують простір симетричних складових. Зокрема для дослідження симетричних режимів роботи електропередачі застосовують схему заміщення прямої послідовності.

В системі координат симетричних складових схема заміщення ЛЕП представляє собою однолінійну схему заміщення. До складу якої входять поздовжні активний та індуктивний опір і поперечні активні та ємнісна провідність.

Активний опір лінії - це опір проводів, що зумовлений втратами потужності на нагрівання проводів при проходженні по ним струму навантаження. В практичних розрахунках чинниками зміни активного опору не враховують та умовно приймають, що погонний активний опір проводів рівний омичному опору постійному струму.

Погонний активний опір лінії з розщепленими фазами визначається наступним чином:

$$r'_0 = \frac{r_0}{n}, \quad (1.1)$$

де r_0 – погонний опір проводу;

n – число проводів в розщепленій фазі.

Індуктивний опір лінії виникає в результаті явищ само- та взаємоіндукції. Значення індуктивного опору залежить від взаємного розташування проводів у просторі, їхнього положення відносно землі та блискавкозахисних тросів, взаємовпливу паралельних кіл та паралельних ліній електропередачі при їх зближенні.

Погонний індуктивний опір ЛЕП з розщепленими фазами визначається на наступним виразом:

$$x_0 = 0.144 \lg \frac{D_{cp}}{R_e} + \frac{0.016}{n} \mu, \quad (1.2)$$

де D_{cp} – середньгеометрична відстань між фазами;

R_e – еквівалентний радіус проводу розщепленої фази, що заміщує n провідників у розщепленій фазі;

μ – магнітна проникність матеріалу проводів (для кольорових матеріалів $\mu=1$).

					ДП6109.141.006.ПЗ	Арк.
						13
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Поперечна активна провідність лінії визначається за втратами потужності на корону. Струмами витоку активних струмів через лінійну ізоляцію при виконанні практичних розрахунків нехтують.

Погонна активна провідність ЛЕП визначається за наступним виразом:

$$g_0 = \frac{\Delta P_{k0} 10^{-3}}{U_n^2}, \quad (1.3)$$

де ΔP_{k0} – питомі втрати потужності на корону в лінії, кВт/км.

Поперечна ємнісна провідність ЛЕП визначається взаємною частковою ємністю між фазами, фазами та землею, блискавкозахисними тросами та конструктивними елементами опори повітряної лінії.

Аналогічно до індуктивного опору даний параметр залежить від взаємного розташування фазних проводів відносно один одного, землі та блискавкозахисних тросів.

Ємнісна погонна провідність ЛЕП з розщепленими фазами визначається за наступним виразом:

$$b_0 = \frac{7.58 \cdot 10^{-6}}{\lg \frac{D_{cp} 10^3}{R_e}}. \quad (1.4)$$

На рис. 1.2 зображена найбільш поширена симетрична П-подібна схема заміщення лінії електропередачі.

1.2 Рівняння ДЕП

Як відомо з курсу теоретичних основ електротехніки зв'язок між миттєвими значення режимних параметрів лінії електропередачі може бути описана системою рівнянь в часткових похідних:

					ДП6109.141.006.ПЗ	Арк.
						14
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

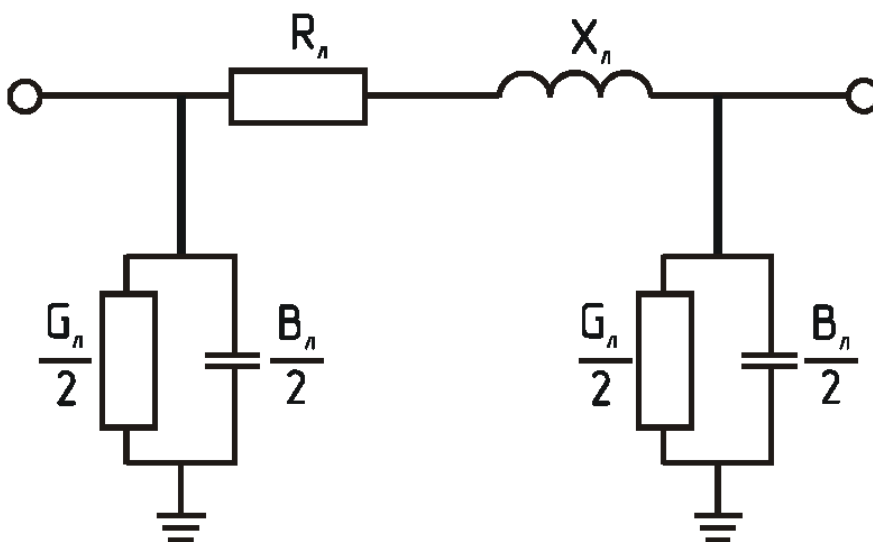


Рисунок 1.2 – П-подібна схема заміщення лінії електропередачі

$$\begin{cases} -\frac{\partial u}{\partial x} = R_0 i(t, x) + L_0 \frac{\partial i}{\partial t}; \\ -\frac{\partial i}{\partial x} = G_0 u(t, x) + C_0 \frac{\partial u}{\partial t}, \end{cases} \quad (1.5)$$

де u, i – миттєві значення напруги та струму в будь-якій точці ділянки лінії електропередавання;

R_0, G_0, L_0, C_0 – активний поздовжній опір, активна поперечна провідність, індуктивність та ємність схеми заміщення ділянки лінії одиничної довжини.

Система рівнянь для системи синусоїдального струму в усталеному режимі матиме наступний вигляд:

$$\begin{cases} -\frac{\partial \dot{U}}{\partial x} = (R_0 + jX_0) \dot{I} = \underline{Z}_0 \cdot \dot{I}; \\ -\frac{\partial \dot{I}}{\partial x} = (G_0 + jB_0) \dot{U} = \underline{Y}_0 \cdot \dot{U}, \end{cases} \quad (1.6)$$

де $\underline{Z}_0 = R_0 + jX_0$ та $\underline{Y}_0 = G_0 + jB_0$ – повні комплексні опір та провідність ділянки лінії, відповідно.

Другу похідну від першого виразу попередньої системи рівнянь можна записати у вигляді наступного диференційного рівняння:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \dot{U} = -(R_0 + jX_0)(G_0 + jB_0)\dot{U}, \quad (1.7)$$

яке має наступний розв'язок:

$$\dot{U} = \underline{A}_1 e^{-\gamma_0 x} + \underline{A}_2 e^{\gamma_0 x}, \quad (1.8)$$

де x – відстань від початку електропередачі;

$\underline{A}_1$ та $\underline{A}_2$ – сталі інтегрування;

γ_0 – характеристика розповсюдження електромагнітної хвилі напруги (струму).

Величина γ_0 знаходиться наступним чином:

$$\gamma_0 = \sqrt{(R_0 + jX_0)(G_0 + jB_0)}. \quad (1.9)$$

В результаті перетворень для струму отримаємо наступний вираз:

$$\dot{I} = \frac{\gamma_0}{R_0 + jX_0} (\underline{A}_1 e^{-\gamma_0 x} - \underline{A}_2 e^{\gamma_0 x}) = \frac{1}{\underline{Z}_e} (\underline{A}_1 e^{-\gamma_0 x} - \underline{A}_2 e^{\gamma_0 x}), \quad (1.10)$$

де $\underline{Z}_e$ – хвильовий опір лінії електропередачі, що визначається наступним чином:

$$\underline{Z}_e = \sqrt{\frac{R_0 + jX_0}{G_0 + jB_0}}. \quad (1.11)$$

Отже, розподіл напруги та струму вздовж лінії електропередачі можна описати наступною системою рівнянь:

$$\begin{cases} \dot{U}(x) = \underline{A}_1 e^{-\gamma_0 x} + \underline{A}_2 e^{\gamma_0 x}; \\ \dot{I}(x) = \frac{1}{\underline{Z}_e} (\underline{A}_1 e^{-\gamma_0 x} - \underline{A}_2 e^{\gamma_0 x}). \end{cases} \quad (1.12)$$

					ДП6109.141.006.ПЗ	Арк.
						16
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Аналіз попередньої системи рівнянь показує, що режим розповсюдження напруги та струму вздовж траси ЛЕП можливо представити, як результат накладання двох режимів – падаючої та відбитої хвилі напруги та струму.

Значення постійних інтегрування можна визначити виходячи із граничних умов початку лінії електропередачі ($x=0$):

$$\underline{A}_1 = \frac{1}{2}(\dot{U}_1 + \dot{I}_1 \underline{Z}_e); \quad (1.13)$$

$$\underline{A}_2 = \frac{1}{2}(\dot{U}_1 - \dot{I}_1 \underline{Z}_e). \quad (1.14)$$

В результаті система рівнянь набуває наступного вигляду:

$$\begin{cases} \dot{U} = \frac{1}{2}(\dot{U}_1 + \dot{I}_1 \underline{Z}_e) e^{-\gamma_0 x} + \frac{1}{2}(\dot{U}_1 - \dot{I}_1 \underline{Z}_e) e^{\gamma_0 x}; \\ \dot{I} \cdot \underline{Z}_e = \frac{1}{2}(\dot{U}_1 + \dot{I}_1 \underline{Z}_e) e^{-\gamma_0 x} - \frac{1}{2}(\dot{U}_1 - \dot{I}_1 \underline{Z}_e) e^{\gamma_0 x}, \end{cases} \quad (1.15)$$

звідки

$$\begin{cases} \dot{U} = \cosh(\gamma_0 x) \dot{U}_1 - \underline{Z}_e \sinh(\gamma_0 x) \dot{I}_1; \\ \dot{I} = -\frac{1}{\underline{Z}_e} \sinh(\gamma_0 x) \dot{U}_1 + \cosh(\gamma_0 x) \dot{I}_1. \end{cases} \quad (1.16)$$

Виконавши підстановку $x=l$, отримаємо співвідношення між режимними параметрами на початку та в кінці лінії електропередачі:

$$\begin{cases} \dot{U}_2 = \cosh(\gamma_0 l) \dot{U}_1 - \underline{Z}_e \sinh(\gamma_0 l) \dot{I}_1; \\ \dot{I}_2 = -\frac{1}{\underline{Z}_e} \sinh(\gamma_0 l) \dot{U}_1 + \cosh(\gamma_0 l) \dot{I}_1. \end{cases} \quad (1.17)$$

де l – довжина ЛЕП.

					ДП6109.141.006.ПЗ	Арк.
						17
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Виходячи із граничних умов кінця ЛЕП, система рівнянь для ДЕП матиме наступний вигляд:

$$\begin{cases} \dot{U} = \frac{1}{2}(\dot{U}_2 + \dot{I}_2 \underline{Z}_e) e^{-\gamma_0 x} + \frac{1}{2}(\dot{U}_2 - \dot{I}_2 \underline{Z}_e) e^{\gamma_0 x}; \\ \dot{I} \cdot \underline{Z}_e = \frac{1}{2}(\dot{U}_2 + \dot{I}_2 \underline{Z}_e) e^{-\gamma_0 x} - \frac{1}{2}(\dot{U}_2 - \dot{I}_2 \underline{Z}_e) e^{\gamma_0 x}, \end{cases} \quad (1.18)$$

звідки

$$\begin{cases} \dot{U} = \cosh(\gamma_0 x) \dot{U}_2 + \underline{Z}_e \sinh(\gamma_0 x) \dot{I}_2; \\ \dot{I} = \frac{1}{\underline{Z}_e} \sinh(\gamma_0 x) \dot{U}_2 + \cosh(\gamma_0 x) \dot{I}_2. \end{cases} \quad (1.19)$$

В результаті для всієї ЛЕП маємо:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = \cosh(\gamma_0 l) \dot{U}_2 + \underline{Z}_e \sinh(\gamma_0 l) \dot{I}_2; \\ \dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_2}{\underline{Z}_e} \sinh(\gamma_0 l) + \cosh(\gamma_0 l) \dot{I}_2. \end{cases} \quad (1.20)$$

Якщо розглядати відносно короткі ЛЕП, для яких $\gamma_0 l \approx 0$, то справедливі наступні співвідношення:

$$\cosh(\gamma_0 l) \approx 1; \quad (1.21)$$

$$\sinh(\gamma_0 l) \approx \gamma_0 l. \quad (1.22)$$

Тоді система рівнянь за умовами кінця матиме наступний вигляд:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = \dot{U}_2 + \underline{Z}_e \gamma_0 l \cdot \dot{I}_2; \\ \dot{I}_1 = \frac{\gamma_0 l}{\underline{Z}_e} \dot{U}_2 + \dot{I}_2, \end{cases} \quad (1.23)$$

або

					ДП6109.141.006.ПЗ	Арк.
						18
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = \dot{U}_2 + \dot{I}_2 \underline{Z}; \\ \dot{I}_1 = \dot{I}_2 + \dot{U}_2 \underline{Y}_0. \end{cases} \quad (1.24)$$

Як бачимо попередня система рівнянь повністю відповідає закону Ома для електричного кола, що відображає лінію електропередавання.

1.3 Хвильові параметри ДЕП

Характер розподілу напруги та струму вздовж траси ЛЕП визначається згідно двох параметрів. Це характеристика розповсюдження електромагнітної хвилі та хвильовий опір.

Вираз для знаходження характеристики розповсюдження хвилі по довжині лінії має наступний вигляд:

$$\gamma_0 = \sqrt{(r_0 + jx_0)(g_0 + jb_0)} = \sqrt{\underline{Z}_0 \underline{Y}_0} = \beta_0 + j\alpha_0, \quad (1.25)$$

де α_0 – коефіцієнт затухання фази, що характеризує розворот вектору напруги (струму) під час розповсюдження хвилі напруги (струму) вздовж лінії;

β_0 – коефіцієнт затухання, що характеризує зменшення за рахунок втрат потужності амплітудного значення вектору напруги (струму) під час розповсюдження хвилі напруги (струму) вздовж довжини лінії.

Хвильовий опір лінії електропередавання знаходиться згідно наступного виразу:

$$\underline{Z}_e = \sqrt{\frac{r_0 + jx_0}{g_0 + jb_0}} = \sqrt{\frac{\underline{Z}_0}{\underline{Y}_0}} = Z_e e^{j\xi_e}, \quad (1.26)$$

де $\underline{Z}_0$ – погонний опір лінії;

$\underline{Y}_0$ – погонна провідність лінії;

Z_e та ξ_e – модуль та аргумент хвильового опору лінії.

					ДП6109.141.006.ПЗ	Арк.
						19
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Вираз для знаходження характеристики розповсюдження хвилі можна записати в наступному вигляді:

$$\underline{\gamma}_0 = \sqrt{\underline{Z}_0 \underline{Y}_0} e^{j\left(\frac{\varphi_Z + \varphi_Y}{2}\right)}. \quad (1.27)$$

Під час переходу від показникової форми запису до тригонометричної матимемо наступне:

$$\underline{\gamma}_0 = \sqrt{\underline{Z}_0 \underline{Y}_0} \cos\left(\frac{\varphi_Z + \varphi_Y}{2}\right) + j\sqrt{\underline{Z}_0 \underline{Y}_0} \sin\left(\frac{\varphi_Z + \varphi_Y}{2}\right) = \beta_0 + j\alpha_0. \quad (1.28)$$

Величина $\gamma_0 l$ характеризує зміну вектору напруги (струму) за амплітудою та фазою між початком та кінцем лінії електропередавання, що виникає в результаті хвильових процесів.

Складова $\lambda = \alpha_0 l$ характеризує розворот вектору напруги (струму) між початком та кінцем ЛЕП. Має розмірність радіан або електричних градусів та називається хвильовою довжиною лінії.

Ідеалізованою ЛЕП називається лінія, що функціонує без втрат активної потужності ($r_0 = g_0 = 0$).

У випадку ідеалізованої лінії маємо:

$$\lambda = \sqrt{x_0 l \cdot b_0 l} = \omega \sqrt{L_0 C_0 l}. \quad (1.29)$$

Передача по ДЕП енергії здійснюється шляхом розповсюдження по лінії електромагнітних хвиль. Фазову швидкість розповсюдження даних хвиль можна визначити за виразом:

$$v_g = \frac{\omega}{\alpha_0}. \quad (1.30)$$

У випадку ідеалізованої лінії фазову швидкість розповсюдження електромагнітних хвиль вздовж траси лінії можливо оцінити за співвідношенням:

					ДП6109.141.006.ПЗ	Арк.
						20
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

$$v_{\epsilon} = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}}, \quad (1.31)$$

де L_0, C_0 – погонні індуктивність та ємність лінії.

Для довгих ліній повітряного виконання швидкість розповсюдження електромагнітної хвилі практично відповідає швидкості світла. Для дальньої електропередачі кабельного виконання дана швидкість орієнтовно в 2-3 рази менше через велику ємність жил кабелю.

Під час передавання електромагнітної хвилі по лінії має місце процес відбиття хвиль від кінців електропередачі. Тому у будь-якій лінії існує переміщення із однаковою швидкістю прямої та відбитої хвилі. Якщо лінія розімкнута на кінці та немає втрат активної енергії в ній спостерігається інтерференція прямих та відбитих хвиль. В результаті чого спостерігається режим стоячих хвиль, що не несуть активної потужності вздовж лінії. В даному випадку має місце збалансований обмін енергії між реактивними елементами лінії електропередачі.

1.4 Натуральна потужність ДЕП

Розглянемо режим при відсутності відбитої хвилі напруги (струму). Даний режим має місце у разі рівності опору приймача електричної енергії хвильовому опору електропередачі. В даному випадку буде виконано умову:

$$\dot{U}_2 = \dot{I}_2 Z_{\epsilon}, \quad (1.32)$$

або

$$\underline{Z}_{\text{пр}} = \underline{Z}_{\epsilon} = \sqrt{\frac{\underline{Z}_0}{\underline{Y}_0}} = \sqrt{\frac{\underline{Z}_0}{\underline{Y}_0}} e^{\left(\frac{\varphi_Z - \varphi_Y}{2}\right)}. \quad (1.33)$$

Тоді маємо наступні вирази:

					ДП6109.141.006.ПЗ	Арк.
						21
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

$$\begin{cases} \dot{U} = \dot{U}_2 e^{-\gamma_0 x}; \\ \dot{I}_1 = \dot{I}_2 e^{-\gamma_0 x}. \end{cases} \quad (1.34)$$

Як бачимо в даному режимі в усіх точках електропередачі між напругою та струмом виконується співвідношення:

$$\frac{\dot{U}}{\dot{I}} = \frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_2} = \underline{Z}_g. \quad (1.35)$$

Отже, в даному режимі вектори напруги та струму синхронно рівномірно обертаються по фазі на кут, що є рівним хвильовій довжині відповідної ділянки лінії електропередавання. Одночасно вектори струму та напруги синхронно змінюються за модулем, згасаючи за експоненціальною залежністю від живлячого кінця лінії електропередачі.

В режимі, що розглядається по ЛЕП буде передаватися так звана натуральна потужність, що визначається за виразом:

$$\dot{S}_{\text{нт}} = U_{\text{л}}^* \dot{I}_{\text{л}} = I_{\text{л}}^2 \underline{Z}_g^* = \frac{U_{\text{л}}^2}{Z_g^*}, \quad (1.36)$$

де $U_{\text{л}}$ та $I_{\text{л}}$ – робоча напруга та навантажувальний струм ЛЕП.

Відзначимо, що хвильовий опір має незначну уявну складову. В результаті чого натуральна потужність лінії є майже повністю активною. Тому під час аналізу робочих режимів електропередачі допускається розглядати ідеалізовану лінію без втрат активної потужності. При умові:

$$\begin{aligned} r_0 &= g_0 = 0; \\ \varphi_Z &= \varphi_Y = 90^\circ. \end{aligned} \quad (1.37)$$

Можна записати наступний вираз:

					ДП6109.141.006.ПЗ	Арк.
						22
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

$$Z_{\text{пр}} = Z_{\epsilon} = \sqrt{\frac{Z_0}{Y_0}} = \sqrt{\frac{j\omega L_0}{j\omega C_0}} = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}. \quad (1.38)$$

В даному випадку лінією транспортуватиметься чисто активна натуральна потужність. Також в даному режимі будуть найменші втрати активної потужності:

$$P_{\text{нт}} = I_{\text{л}}^2 Z_{\epsilon} = \frac{U_{\text{л}}^2}{Z_{\epsilon}}. \quad (1.39)$$

Для організації передачі натуральної потужності по ЛЕП необхідно відрегулювати струм та напругу по кінцям електропередачі, так щоб вони співпадали по фазі. В результаті коефіцієнт потужності по кінцям електропередачі буде рівним одиниці.

Хвильові опори кабельних та повітряних ліній дуже сильно відрізняються. В свою чергу для ДЕП повітряного виконання різного класу номінальної напруги хвильові опори помірно відрізняються один від одного. В середньому значення хвильових опорів для повітряних ліній, в залежності від кількості провідників в розщепленій фазі, знаходиться в межах 250-400 Ом (для розщепленої на три провідники фази – 275 Ом, а для не розщепленої фази – 400 Ом).

Для ДЕП кабельного виконання хвильовий опір є на порядок меншим та складає 35-40 Ом. А це означає, що у випадку рівних інших умов кабельною лінією порівняно із повітряною лінією можна передати однакову натуральну потужність при номінальній напрузі приблизно в три разі меншій, ніж для повітряних ліній. При однаковій номінальній напрузі кабельної та повітряної лінії натуральна потужність кабельної лінії буде на порядок вище натуральної потужності повітряної лінії.

В умовах експлуатації не завжди вигідно з економічної та технічної точки зору виробляти на генераторах та передавати по ДЕП споживачам реактивну потужність.

					ДП6109.141.006.ПЗ	Арк.
						23
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Це пояснюється тим, що під час передачі лінією реактивної потужності збільшується значення повної потужності, що в свою черги призводить до збільшення втрат напруги та активної потужності. Тому на генераторах необхідно виробляти додаткову активну потужність для покриття втрат потужності в лінії електропередавання, що викликані передачею нею реактивної потужності. Більш доцільно забезпечувати потребу споживачів приймальної системи в реактивній потужності за допомогою батарей статичних конденсаторів або синхронних компенсаторів, що встановлюються в кінці дальньої електропередачі або на проміжному перемикальному пункті.

Значення реактивної потужності, що передається по ЛЕП сильно залежить від її зарядної потужності, що носить ємнісний характер та повністю не залежить від навантаження ЛЕП.

Втрати реактивної потужності в індуктивних елементах лінії електропередачі пропорційні квадрату модуля повної потужності, що передається по ній. Отже, погонні індуктивні втрати реактивної потужності в лінії електропередачі можна визначити за виразом:

$$\Delta Q_{0L} = \frac{S_{\text{л}}^2}{U_{\text{л}}^2} x_0. \quad (1.40)$$

Під час передачі ДЕП натуральної потужності відбувається повна компенсація зарядної реактивної потужності лінії її втратами в індуктивних елементах схеми заміщення. Виконується наступна умова:

$$\Delta Q_{0C} = \Delta Q_{0L} \text{ або } I_{\text{л}}^2 x_0 = b_0 U_{\text{л}}^2. \quad (1.41)$$

В даному випадку по ДЕП відбувається передача чисто активної потужності. Дійсно виконавши перетворення, отримаємо:

$$P_{\text{нт}} = U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos \varphi = U_{\text{л}}^2 \sqrt{\frac{C_0}{L_0}} = \frac{U_{\text{л}}^2}{Z_{\text{г}}}. \quad (1.42)$$

					ДП6109.141.006.ПЗ	Арк.
						24
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Отже, в даному режимі втрати реактивної потужності під час передачі натуральної потужності в індуктивних опорах та ємнісних привідностях лінії електропередавання взаємно компенсують один одного. Тому сумарні втрати реактивної потужності в лінії електропередавання рівні нулю. Саме тому режим передачі по лінії натуральної потужності завжди характеризується найменшими втратами активної потужності.

1.5 Зарядна потужність ліній та засоби компенсації

ЛЕП надвисокої напруги характеризуються дуже великими значеннями ємнісної зарядної потужності, яка пропорційна квадрату напруги лінії. Дані зарядні потужності є порівняними із натуральною потужністю лінії та чинять сильний вплив на режим напруги електропередачі.

Величина реактивної потужності, що передається по лінії електропередавання досить істотно залежить від її зарядної потужності, що має ємнісний характер та не залежить від навантаження лінії електропередавання.

Погонна зарядна потужність лінії електропередачі визначається за наступним виразом:

$$Q_{0c} = b_0 U_{\text{Л}}^2, \quad (1.43)$$

де $U_{\text{Л}}$ – робоча напруга електропередачі (відповідає номінальній напрузі в оцінювальних розрахунках).

Для ліній номінальною напругою 750 кВ питома зарядна потужність складає 2.3 МВАр/км, 500 кВ – 0.9 МВАр/км та 330 кВ – 0.4 МВАр/км. Як бачимо, дальні лінії надвисокої напруги завжди генерують значні обсяги зарядної потужності.

В режимі передачі по лінії натуральної потужності уся зарядна потужність лінії компенсується втратами потужності в індуктивних елементах електропередачі. Але у випадку зменшення активного навантаження індуктивні втрати в лінії

					ДП6109.141.006.ПЗ	Арк.
						25
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

також зменшаться, що призведе до виникнення надлишкової зарядної потужності. Якщо навантаження лінії складає 50 % від натуральної потужності, то в індуктивних елементах лінії витрачається лише 25 % від зарядної потужності електропередачі, а решта 75 % створює надлишкову реактивну потужність на кінцевих підстанціях електропередачі.

Через великі обсяги зарядної потужності вздовж електропередачі відбувається недопустиме підвищення напруги. Особливо в режимі неробочого ходу при однобічному підключенні електропередачі (рис. 1.3).

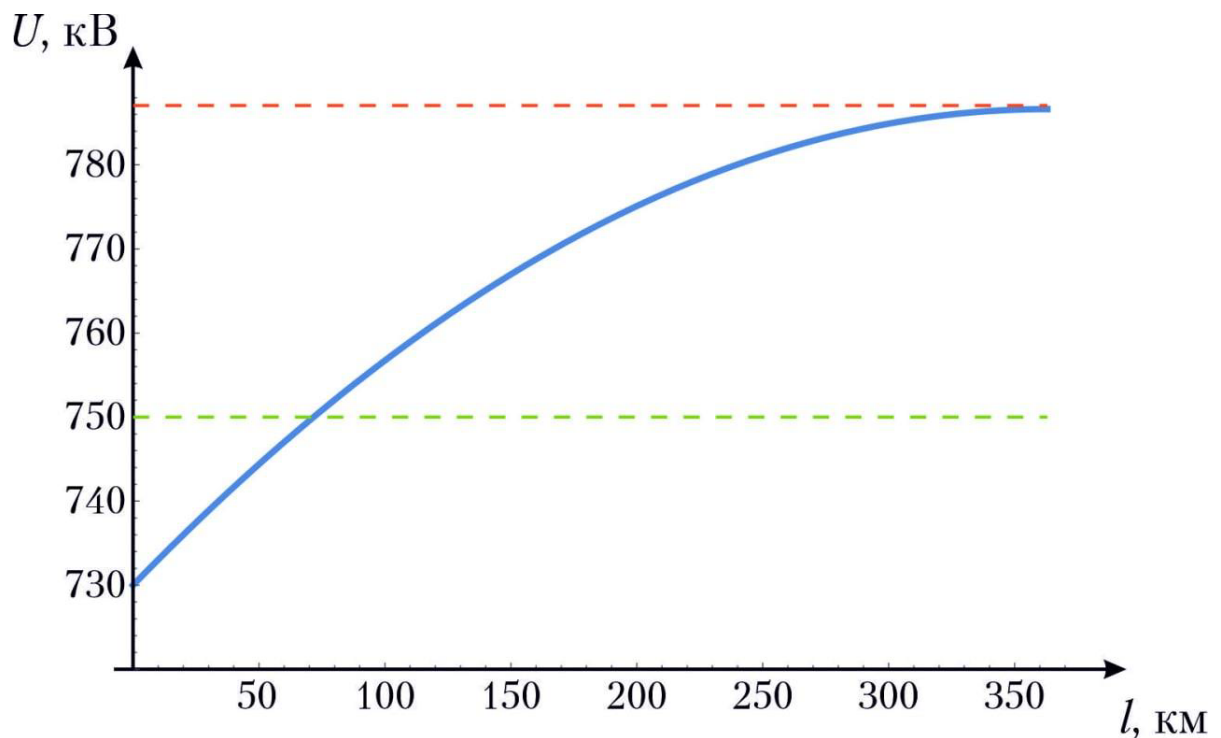


Рисунок 1.3 – Розподіл напруги вздовж ДЕП

У випадку передачі по лінії активної потужності, що менша за натуральну, ємнісні втрати в поперечних провідностях електропередачі є більшими за індуктивні втрати у поздовжніх елементах. В результаті чого відбувається збільшення напруги на кінці електропередачі. У випадку передачі по лінії активної потужності, більшої від натуральної, індуктивні втрати в лінії будуть більші за ємнісні втрати, що спричинить зниження напруги до кінця лінії.

Якщо зафіксувати напругу на початку та в кінці електропередачі на рівні U_1 та U_2 , то графік розподілу напруги матиме вигляд, що зображений на рис. 1.4.

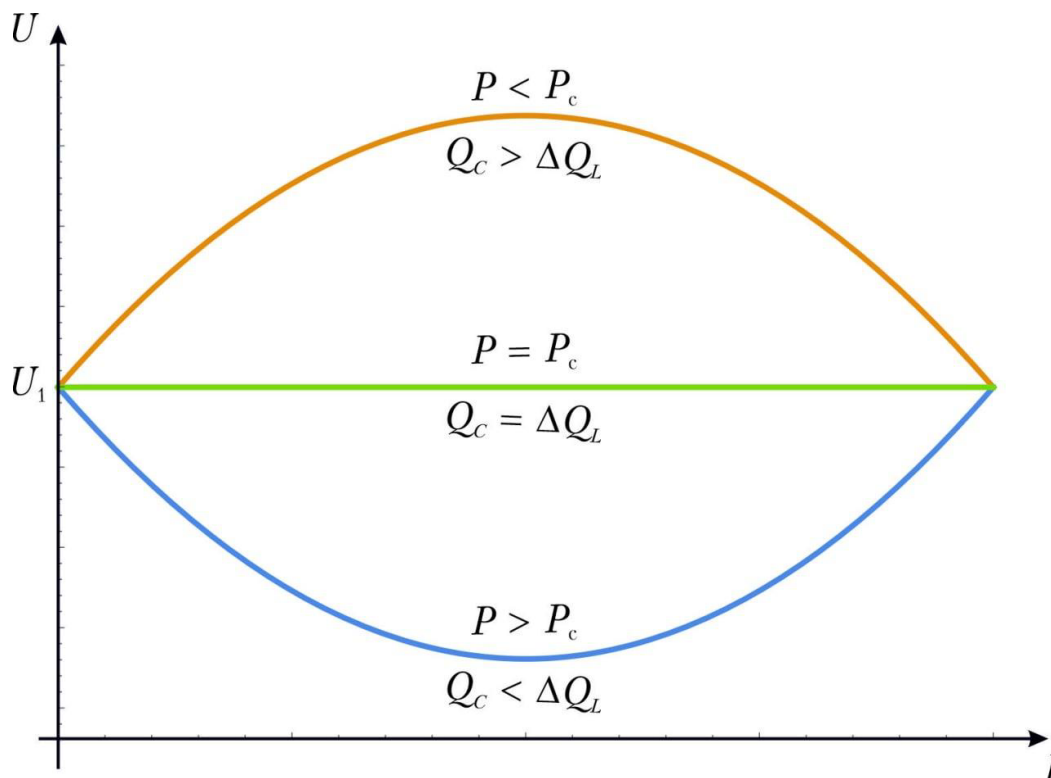


Рисунок 1.4 – Розподіл напруги вздовж ДЕП під час фіксації напруги по кінцям

Як бачимо з рис. 1.2 при передачі по лінії активної потужності, меншої за натуральну потужність, спостерігається найбільш небезпечний режим, що призводить до виникнення «горба» напруги всередині ЛЕП.

ЛЕП високих та надвисоких напруг чутливі до збільшення робочої напруги за умовами експлуатації лінійної ізоляції. Для ДЕП номінальною напругою 330 кВ допустимі відхилення напруги складають $\pm 10\%$ від номінальної напруги. До ліній електропередавання більш високих напруг висуваються жорсткіші вимоги щодо допустимості відхилення напруги ($\pm 5\%$ від номінальної напруги). Тому для запобігання появи «горбів» при проектуванні передбачаються засоби компенсації (шунтувальні реактори), що встановлюються вздовж лінії електропередавання (на перемикальному пункті), або на її початку.

Також необхідно відмітити, що організувати роботу лінії електропередавання, що навантажена потужністю більшою за натуральну, можливо тільки для ліній надвисокої напруги відносно не великої довжини (до 200-300 км). Для ліній електропередавання більшої довжини необхідно застосовувати спеціальні інженерні заходи, щоб організувати транзит більший за натуральну потужність.

Згідно із допустимими значеннями напруги, можна знайти граничні довжини ліній електропередавання, що допускають однобічне включення без використання додаткових інженерно-технічних заходів. Для лінії без втрат граничне значення хвильової довжини визначається згідно співвідношення:

$$\lambda_{\max} = n\pi \pm \arccos(1/K_D), \quad (1.44)$$

де K_D – коефіцієнт допустимої перенапруги;

n – коефіцієнт кратності півхвилі напруги (струму).

Для ліній номінальною напругою 500 кВ та вище значення $K_D=1.05$. З урахуванням цього допустима хвильова довжина лінії орієнтовано складає:

$$\lambda_{\max} = (n180 \pm 18^\circ). \quad (1.45)$$

Отже, в повітряних лініях електропередачі надвисокої напруги довжиною до 300 км, від 2700 до 3300 км і далі напруга на відкритому кінці в режимі неробочого ходу не перебільшить граничнодопустиме значення.

Для ліній довжина, яких не відповідає зазначеним вимогам, щоб забезпечити прийнятний режим напруги потрібно передбачити засоби компенсації.

В загальному випадку надлишок реактивної потужності в дальній лінії надвисокої напруги має бути спожита генераторами живильної станції, що працюють в режимі недозбудження, енергосистемами, що підключені ліній надвисокої напруги та засобами компенсації реактивної потужності (шунтувальними реакторами та синхронними компенсаторами, які працюють в режимі недозбудження чи від'ємного збудження).

					ДП6109.141.006.ПЗ	Арк.
						28
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Споживання реактивної потужності генераторами передавальної системи обмежена технічними умовами щодо нагрівання статорів машин, допустимості зменшення рівня напруги на затискачах генераторів при умові живлення власних потреб та взаємній стійкості генераторів. У режим прийому реактивної потужності робота генераторів допускається лише, якщо це не спричинить умов їх самозбудження.

Для енергосистеми, що приєднана до ліній надвисокої напруги можливість прийняття реактивної потужності визначається здебільшого допустимістю підвищення напруги в електричних мережах та пропускною здатністю її елементів. Як говорить досвід експлуатації та розрахунків електричних мереж номінальною напругою 500-750 кВ допустимим є прийом зарядної реактивної потужності до 200-300 МВАр, а для напруги 330 кВ – 300-500 МВАр.

Застосовувати синхронні компенсатори, які встановлені на приймальному кінці лінії електропередавання та працюють в режимі недозбудження для компенсації надлишків реактивної потужності доцільно тоді, коли їх використання передбачено умовами забезпечення стійкості чи компенсації дефіциту реактивної потужності в приймальній енергосистемі.

Також необхідно враховувати, що можливість прийняття реактивної потужності синхронними компенсаторами обмежена їхньою граничною потужністю в режимі недозбудження та потужністю третинної обмотки автотрансформаторів, до якої їх підключено.

Необхідна потужність та вибір місця установки шунтувальних реакторів здійснюється на основі наступного аналізу:

- 1) Довготривалого підвищення рівня напруги на електрообладнанні та самій лінії електропередавання в ustalених режимах ненавантаженої лінії;
- 2) Короткочасного підвищення рівня напруги на лінії електропередавання в режимах її одностороннього включення;
- 3) Рівнів перенапруги на лінії електропередачі на електрообладнанні електропередачі при комутаційних перемиканнях.

					ДП6109.141.006.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		29

Щоб забезпечити прийнятний режим напруги в мережах енергосистем із номінальною напругою 110-330 кВ, що примикають до кінцевих підстанцій дальньої електропередачі, а також вздовж траси лінії, рекомендується виконувати установку шунтувальних реакторів, що компенсують 60-80 % зарядної потужності лінії надвисокої напруги.

Орієнтовано потужність встановлених реакторів визначають за наступним виразом:

$$Q_p \approx (0.6 \div 0.8) \cdot Q_c = (0.6 \div 0.8) \cdot Q_0 \cdot m \cdot l, \quad (1.46)$$

де Q_0 – питома зарядна потужність ЛЕП (на одне коло);

m – число кіл передачі;

l – довжина ЛЕП.

Якщо на кінцях ЛЕП примусово підтримується однакові рівні напруги, то внаслідок ємнісного ефекту в середині лінії в режимі холостого ходу або в режимі передачі активної потужності, що є меншою за натуральну, напруга піднімається. Так як рівень ізоляції електрообладнання та лінії не допускає довготривалого перевищення напруги більше максимального значення, що є більшим за номінальну напругу лінії на 5%, то в кінцях лінії потрібно знижувати рівень напруги нижче номінального значення. Це в свою чергу приводить до збільшення втрат потужності та зменшення пропускної здатності електропередачі. В цьому випадку включення шунтувальних реакторів на передавальному кінці та в проміжних точках електропередачі дуже необхідне не тільки для режиму холостого ходу, а й для режиму передачі необхідних транзитів активної потужності.

Для компенсації порівняно невеликих значень надлишкової потужності можливе застосування двох або декількох силових трансформаторів, що включені паралельно із різними коефіцієнтами трансформації. В даному випадку через різницю коефіцієнтів трансформації і їх обмотках з'являються індуктивні зрівнювальні струми, що викликають додаткові втрати реактивної потужності.

					ДП6109.141.006.ПЗ	Арк.
						30
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

1.6 Опис ефекту Ферранті

Ефект Ферранті – це збільшення рівня напруги вздовж лінії електропередавання. Найбільше даний ефект проявляється в режимі холостого ходу або низького навантаження. Це приводить до того, що значення напруги на приймальному кінці лінії є більшим ніж на передавальному кінці.

Дане явище відкрив інженер-електрик Себастьян Зіані де Ферранті. В 1887 році він вперше помітив збільшення напруги в деяких точках лондонської енергосистеми.

Ефект Ферранті викликаний взаємодією індуктивності та ємності лінії електропередавання.

Під час роботи лінії без навантаження чи при малому навантаженню, напруга на приймальному кінці може бути більшою ніж на передавальному кінці.

Ефект Ферранті допоможе пояснити класична П-схема заміщення лінії електропередавання, що зображена на рис. 1.5. Робимо припущення, що активний опір лінії та активна провідність є незначними.

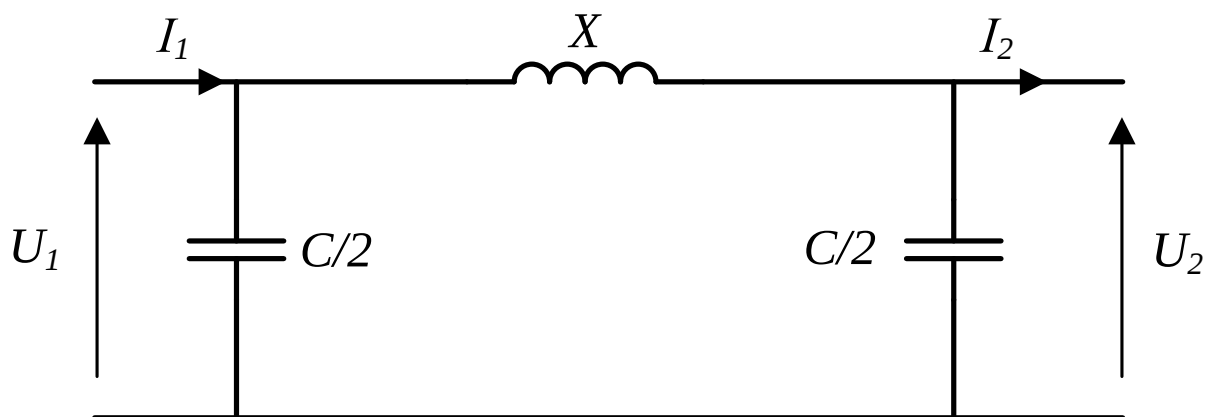


Рисунок 1.5 – П-схема заміщення лінії електропередавання

На рис. 2.1 позначено: L – поздовжня індуктивність лінії, Гн/км; C – поперечна ємність лінії, Ф/км; U_1 – напруга на початку лінії; I_1 – струм на початку лінії; U_2 – напруги в кінці лінії; I_2 – струм в кінці лінії;

					ДП6109.141.006.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		31

Ємнісний та індуктивний опір лінії знаходяться за формулами:

$$X_C = \left(\frac{1}{\omega l C_0} \right); \quad (1.47)$$

$$X_L = \omega L_0 l, \quad (1.48)$$

де ω – частота напруги;

l – довжина лінії електропередавання;

C_0 – погонний ємнісний опір лінії електропередавання;

L_0 – погонний індуктивний опір лінії електропередавання.

Ємність довгої лінії електропередавання розподілена по всій довжині, тому середнє значення струму складає:

$$I_{20} = \left(\frac{U_2}{2X_C} \right) = \left(\frac{1}{2} \right) U_2 \omega l C_0. \quad (1.49)$$

Таким чином збільшення напруги на приймальному кінці по відношенню до передавального складає:

$$U_2 - U_1 = \left(\frac{1}{2} \right) U_2 \omega^2 C L l^2, \quad (1.50)$$

або

$$\frac{U_2 - U_1}{U_2} = \omega^2 C L \frac{l^2}{2}. \quad (1.51)$$

Таким чином різниця напруги пропорційна:

- квадрату частоти енергосистеми;
- добутку ємності та індуктивності;
- квадрату довжини лінії.

					ДП6109.141.006.ПЗ	Арк.
						32
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

З чого слідує, що лінії електропередачі, які працюють на більших частотах з більшою ймовірністю будуть схильні до ефекту Ферранті. Наприклад, враховуючи дві ідентичні лінії, що працюють на однаковій номінальній напрузі, одна, що працює на більшій частоті має бути коротшою, щоб запобігти небажаному та небезпечному збільшенню напруги.

На рис. 1.6 приведено зображення векторної діаграми для ілюстрації ефекту Ферранті.

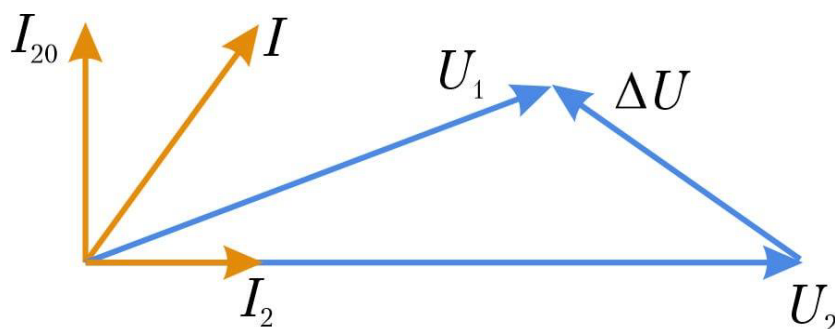


Рисунок 1.6 – Ілюстрація ефекту Ферранті

Для кабельних ліній ефект Ферранті буде більш помітним, оскільки значення індуктивності в кабелі менше ніж в проводах повітряних ліній, а значення ємності більше в 20-30 разів. Отже, для кабельної лінії добуток індуктивності та ємності буде орієнтовно в 10-30 разів більше ніж для повітряної лінії.

Дуже велике значення має довжина лінії електропередавання. Розглядаючи тригонометричні позначення рівнянь ліній електропередавання для режиму холостого ходу, можна показати наступне:

$$U_0 = \frac{U_i}{\cos(2\pi \frac{l}{\lambda})}. \quad (1.52)$$

Як зазначалося вище, основною причиною виникнення ефекту Ферранті є взаємодія між ємністю та індуктивністю лінії.

В цілому ефект Ферранті добре відомий, та його необхідно враховувати під час проектування систем розподілення електроенергії, щоб уникнути неочікуваного збільшення напруги, яка може викликати аварійні відключення та небезпечні ситуації.

Щоб уникнути ефекту Ферранті, необхідно обмежити максимальну довжину ліній електропередавання. Тому типові лінії електропередавання не перевищують 600-700 км при 50 Гц (500-600 км при 60 Гц).

При зменшенні довжини ліній електропередавання індуктивність та ємність можуть створити резонансну ситуацію через внутрішні властивості самої лінії.

Особливістю виникнення ефекту Ферранті в електропередачах великої довжини, в яких зарядні потужності лінії певним чином розподіляються між вузловими підстанціями на початку та наприкінці лінії і, як наслідок, збільшення напруги спостерігається в проміжних точках електропередачі, тобто спостерігається, так званий, «горб» профілю напруги вздовж траси лінії (рис.1.4)

Відомо, що найбільше зростання напруги внаслідок ефекту Ферранті спостерігається в режимах малих навантажень, коли зарядна потужність лінії електропередавання не скомпенсована індуктивними втратами, обумовленими робочим струмом лінії.

Одним із засобів зменшення ефекту Ферранті є застосування шунтувальних реакторів, які компенсують поперечну ємність лінії та різко зменшують явище збільшення напруги вздовж лінії.

Висновки до розділу 1

В даному розділі розглянуто роль зарядної потужності ліній надвисокої напруги. Взаємозв'язок між параметрами схеми заміщення та хвильовими параметрами, між хвильовими параметрами та натуральною потужністю, зарядною потужністю. Хвильовий опір лінії та коефіцієнт поширення хвилі залежать від погонного опору та провідності лінії електропередавання. Натуральна потужність лінії

					ДП6109.141.006.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		34

електропередавання обернено пропорційна до хвильового опору лінії. Так як хвильовий опір має незначну уявну величину, то натуральна потужність лінії є майже активною. Здійснено аналіз розподілу рівня напруги вздовж траси лінії при навантаженнях більших та менших за натуральну потужність лінії.

У випадку передачі по лінії активної потужності, що менша за натуральну потужність спостерігається збільшення напруги на кінці електропередачі, а у разі передачі по лінії активної потужності, більшої від натуральної спостерігається зниження напруги до кінця лінії за відсутності фіксації рівня напруги по кінцям.

Розглянуто ефект Ферранті для ліній електропередавання, який проявляється у тому, що у проміжних точках електропередачі збільшується рівень напруги, тобто спостерігається, так званий, «горб» профілю напруги вздовж траси лінії.

					ДП6109.141.006.ПЗ	Арк.
						35
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

2 ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ НАПРУГИ ВЗДОВЖ ПЛ

2.1 Теоретичні відомості

Розподіл векторів напруги вздовж лінії електропередавання знаходиться за наступними виразами згідно умови початку або кінця електропередачі:

$$\underline{U}(x) = \underline{U}_1 \cosh(\underline{\gamma}_0 x) - \underline{I}_1 \underline{Z}_c \sinh(\underline{\gamma}_0 x); \quad (2.1)$$

$$\underline{U}(x) = \underline{U}_2 \cosh(\underline{\gamma}_0 x) + \underline{I}_2 \underline{Z}_c \sinh(\underline{\gamma}_0 x), \quad (2.2)$$

де $\underline{U}_1, \underline{U}_2, \underline{I}_1, \underline{I}_2$ – вектори напруги і струму на початку та вкінці електропередачі;

$\underline{Z}_c$ – хвильовий опір електропередачі;

$\underline{\gamma}_0$ – коефіцієнт поширення електромагнітної хвилі;

x – відстань від базисного кінці лінії електропередачі.

Розглянемо розв’язання задачі оцінювання режиму напруги вздовж ідеалізованої лінії електропередавання за умовами початку. Для загального випадку вектор напруги в будь-якій точці лінії електропередавання знаходять за наступним виразом:

$$\underline{U}(x) = U_1 \cos(\beta_0^i x) - j \frac{S_1}{U_1} Z_c^i \sin(\beta_0^i x); \quad (2.3)$$

де S_1 – потік потужності на початку електропередачі;

Z_c^i, β_0^i – хвильовий опір і коефіцієнт фази ідеалізованої електропередачі;

x – відстань від початку електропередачі.

Виразивши потужність навантаження на початку електропередачі у відносних одиницях щодо натуральної потужності, а напругу у відносних одиницях щодо номінальної напруги, отримаємо наступні вирази:

$$\underline{U}(x) = U_{1*} U_n \cos(\beta_0^i x) - j \frac{S L S_{1*}}{U_{1*} U_n} Z_c^i \sin(\beta_0^i x), \quad (2.4)$$

звідки

					ДП6109.141.006.ПЗ	Арк.
						36
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

$$\underline{U}(x) = U_1 \left(\left(\cos(\beta_0^i x) - \frac{Q_{1*}}{U_{1*}^2} \sin(\beta_0^i x) \right) - j \frac{P_{1*}}{U_{1*}^2} \sin(\beta_0^i x) \right), \quad (2.5)$$

де U_n , SIL – номінальна напруга і натуральна потужність електропередачі;

U_{1*} – напруга на початку електропередачі у відносних одиницях;

S_{1*} , P_{1*} , Q_{1*} – повна, активна і реактивна потужність на початку електропередачі у відносних одиницях.

В свою чергу, модуль вектору напруги в будь-якій точці електропередачі складає:

$$\underline{U}(x) = U_1 \sqrt{\left(\cos(\beta_0^i x) - \frac{Q_{1*}}{U_{1*}^2} \sin(\beta_0^i x) \right)^2 + \left(\frac{P_{1*}}{U_{1*}^2} \sin(\beta_0^i x) \right)^2}. \quad (2.6)$$

Як бачимо з попереднього виразу, напруга у будь-якій точці ідеалізованої електропередачі пропорційна напрузі на початку лінії. Коефіцієнт пропорційності визначається згідно електричної довжини ділянки від початку до поточної точки та навантаженню на початку лінії електропередавання.

З врахуванням втрат активної потужності для фактичної електропередачі розподіл діючих значень напруги можна визначити згідно наступного виразу:

$$\underline{U}(x) = \sqrt{k_{10}^U U_1^2 + k_{1k}^U I_1^2 + k_{1P}^U P_1 + k_{1Q}^U Q_1}, \quad (2.7)$$

де U_1 , I_1 – модулі векторів напруги та струму на початку електропередачі;

P_1 , Q_1 – активна та реактивна потужність навантаження на початку електропередачі;

k_{10}^U , k_{1k}^U , k_{1P}^U , k_{1Q}^U – коефіцієнти розподілу напруги: при неробочому ході електропередачі, при короткому замиканню електропередачі, транзиту активної потужності та транзиту реактивної потужності;

Z_c , p_c , q_c – абсолютне значення, дійсна та уявна складові хвильового опору;

					ДП6109.141.006.ПЗ	Арк.
						37
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

α_0, β_0 – коефіцієнти послаблення та фази поширення електромагнітної хвилі.

Коефіцієнти розподілу напруги визначаються згідно наступних виразів:

$$k_{10}^U = \frac{1}{2} (\cosh(2\alpha_0 x) + \cos(2\beta_0 x)); \quad (2.8)$$

$$k_{1k}^U = \frac{1}{2} Z_c^2 (\cosh(2\alpha_0 x) - \cos(2\beta_0 x)); \quad (2.9)$$

$$k_{1p}^U = -p_c \sinh(2\alpha_0 x) + q_c \sin(2\beta_0 x); \quad (2.10)$$

$$k_{1Q}^U = -p_c \sin(2\beta_0 x) - q_c \sinh(2\alpha_0 x). \quad (2.11)$$

Аналогічним чином можна знайти розподіл напруги вздовж лінії електропередавання за умовами кінця.

Для ідеалізованої електропередачі даний розподіл знаходиться за виразом:

$$\underline{U}(x) = U_{2*} \sqrt{\left(\cos(\beta_0^i x) + \frac{Q_{2*}}{U_{2*}^2} \sin(\beta_0^i x) \right)^2 + \left(\frac{P_{2*}}{U_{2*}^2} \sin(\beta_0^i x) \right)^2}, \quad (2.12)$$

де U_{2*} – напруга в кінці електропередачі у відносних одиницях;

P_{2*}, Q_{2*} – активна та реактивна потужність в кінці електропередачі у відносних одиницях;

β_0^i – коефіцієнт фази ідеалізованої електропередачі;

x – відстань від кінця електропередачі.

З врахуванням втрат активної потужності для фактичної електропередачі розподіл напруги вздовж лінії за умовами кінця можна визначити згідно наступного виразу:

$$\underline{U}(x) = \sqrt{k_{20}^U U_2^2 + k_{2k}^U I_2^2 + k_{2p}^U P_2 + k_{2Q}^U Q_2}, \quad (2.13)$$

де коефіцієнти розподілу напруги складають:

					ДП6109.141.006.ПЗ	Арк.
						38
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

$$k_{2o}^U = k_{1o}^U = \frac{1}{2} (\cosh(2\alpha_0 x) + \cos(2\beta_0 x)); \quad (2.14)$$

$$k_{2k}^U = k_{1k}^U = \frac{1}{2} Z_c^2 (\cosh(2\alpha_0 x) - \cos(2\beta_0 x)); \quad (2.15)$$

$$k_{1p}^U = -k_{1p}^U = p_c \sinh(2\alpha_0 x) - q_c \sin(2\beta_0 x); \quad (2.16)$$

$$k_{2Q}^U = -k_{1Q}^U = p_c \sin(2\beta_0 x) + q_c \sinh(2\alpha_0 x). \quad (2.17)$$

2.2 Параметри схеми заміщення ЛЕП

Розглянемо типову лінію електропередавання номінальною напругою 750 кВ завдовжки 363 км. Конструкція фази 4×АС-400/93 на проміжних опорах ПС 750-1.

Провід марки АС-400/93 характеризується наступними параметрами: зовнішній діаметр проводу – 29.1 мм; погонний омичний опір – 0.071 Ом/км. Питомі втрати на корону орієнтовано складають 13.7 кВт/км.

Еквівалентний радіус розщеплення проводу з кроком розщеплення фази 500 мм складає:

$$R_e = \sqrt[n]{R \cdot \left(\frac{a}{2 \cdot \sin \pi / n} \right)^{n-1}} \cdot n = \sqrt[5]{\frac{29.1}{2} \cdot \left(\frac{500}{2 \cdot \sin \pi / 4} \right)^4} \cdot 4 = 225.2 \text{ мм.}$$

Середньогогеометрична відстань між проводами фаз складає:

$$D_{сер} = D \cdot \sqrt[3]{2} = 16 \cdot \sqrt[3]{2} = 20.16 \text{ м.}$$

Погонний активний опір лінії становить:

$$r_0' = \frac{r_0}{n} = \frac{0.071}{4} = 0.02 \text{ Ом/км.}$$

Погонний індуктивний опір лінії складає:

$$x_0 = 0.144 \cdot \lg \frac{D_{сер}}{R_e} + \frac{0.016}{n} \cdot \mu = 0.144 \cdot \lg \frac{20.16 \cdot 10^3}{225.2} + \frac{0.016}{4} = 0.29 \text{ Ом/км.}$$

Погонна активна провідність лінії становить:

					ДП6109.141.006.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		39

$$g_0 = \frac{\Delta P_{k0}}{U_n^2} = \frac{13.7 \cdot 10^{-3}}{750^2} = 2.436 \cdot 10^{-8} \text{ СМ/км.}$$

Погонна ємнісна провідність лінії складає:

$$b_0 = \frac{7.58 \cdot 10^{-6}}{\lg \frac{D_{сер} \cdot 10^3}{R_e}} = \frac{7.58 \cdot 10^{-6}}{\lg \frac{20.16 \cdot 10^3}{225.2}} = 3.883 \cdot 10^{-6} \text{ СМ/км.}$$

Погонні параметри в комплексній формі матимуть наступний вигляд:

$$\underline{Z}_0 = r_0 + jx_0 = 0.02 + j0.29 \text{ Ом/км;}$$

$$\underline{Y}_0 = g_0 + jb_0 = 2.436 \cdot 10^{-8} + j3.883 \cdot 10^{-6} \text{ СМ/км.}$$

Хвильовий опір дальньої електропередачі дорівнює:

$$\underline{Z}_{xв} = \sqrt{\frac{\underline{Z}_0}{\underline{Y}_0}} = \sqrt{\frac{0.02 + j0.29}{2.436 \cdot 10^{-8} + j3.883 \cdot 10^{-6}}} = 271.09 - j7.58 \text{ Ом.}$$

Коефіцієнт поширення електромагнітної хвилі становить:

$$\underline{\gamma}_0 = \sqrt{\underline{Z}_0 \cdot \underline{Y}_0} = \sqrt{(0.02 + j0.268) \cdot (2.436 \cdot 10^{-8} + j3.883 \cdot 10^{-6})} = 3.604 \cdot 10^{-5} + j1.053 \cdot 10^{-3} \text{ 1/км.}$$

Натуральна потужність лінії електропередавання складе:

$$P_{нт} = \frac{U_n^2}{Z_g} = \frac{750^2}{271.09} = 2075 \text{ МВт.}$$

Знаходимо значення узагальнених сталих еквівалентного чотирьохполюсника, що заміщує дану лінію електропередавання:

$$\underline{A} = \underline{D} = \cosh(\underline{\gamma}_0 \cdot L) = \cosh((3.604 \cdot 10^{-5} + j1.053 \cdot 10^{-3}) \cdot 363) = 0.928 + j4.88 \cdot 10^{-3};$$

$$\underline{B} = \underline{Z}_{xв} \cdot \sinh(\underline{\gamma}_0 \cdot L) = (271.09 - j7.78) \cdot \sinh((3.604 \cdot 10^{-5} + j1.053 \cdot 10^{-3}) \cdot 363) = 6.118 + j100.995 \text{ Ом.}$$

$$\underline{C} = \frac{1}{\underline{Z}_{xв}} \cdot \sinh(\underline{\gamma}_0 \cdot L) = \frac{1}{271.09 - j7.58} \cdot \sinh((3.604 \cdot 10^{-5} + j1.052 \cdot 10^{-3}) \cdot 363) = 6.313 \cdot 10^{-6} + 1.376 \cdot 10^{-3} \text{ СМ.}$$

Виконаємо перевірку правильності отриманих результатів:

					ДП6109.141.006.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		40

$$\underline{A}^2 - \underline{B}^2 \cdot \underline{C}^2 = (0.928 + j4.88 \cdot 10^3)^2 - (6.118 + j100.995) \times \\ \times (6.313 \cdot 10^{-6} + j1.376 \cdot 10^{-3}) = 1.$$

Отже сталі еквівалентного чотириполюсника розраховано вірно.

2.3 Моделювання розподілу напруги вздовж лінії

Здійснимо моделювання за допомогою програми Mathcad наступних режимів роботи електропередачі: неробочого ходу; за ємнісного навантаження лінії; за індуктивного навантаження лінії; за активно-індуктивного навантаження, меншого за натуральну потужність лінії електропередавання; за активного навантаження лінії, що дорівнює натуральній потужності лінії електропередавання; за активно-ємнісного навантаження лінії, що є більшим ніж натуральна потужність лінії електропередавання.

На кінці електропередачі приймаємо рівень напруги рівним номінальному значенню електропередачі.

Розглянемо режим неробочого ходу. В режимі неробочого ходу в приймальну енергосистему стікає наступне значення реактивної потужності:

$$a_{1кз} = A' \cdot B' + A'' \cdot B'' = 0.928 \cdot 6.118 + 4.878 \cdot 10^{-3} \cdot 100.995 = 6.17 \text{ Ом};$$

$$b_{1кз} = A'' \cdot B' - A' \cdot B''' = 4.878 \cdot 10^{-3} \cdot 6.118 - 0.928 \cdot 100.995 = -93.69 \text{ Ом};$$

$$Q_2 = -\frac{b_{1кз}}{|B|^2} \cdot U_2^2 - \sqrt{\frac{U_1^2 \cdot U_2^2}{|B|^2} - (P_2 + \frac{a_{1кз}}{|B|^2} \cdot U_2^2)^2} = \frac{93.69}{101.18^2} \cdot 750^2 - \\ - \sqrt{\frac{712.5^2 \cdot 750^2}{101.18^2} - \left(\frac{6.17}{101.18^2} \cdot 750^2 \right)^2} = -122.67 \text{ МВАр.}$$

Розподіл напруги вздовж траси лінії в режимі неробочого ходу електропередачі представлений на рис. 2.1. Моделювання здійснено за умовами кінця. Точка початку координат відповідає кінцю електропередачі. Аналогічно виконується моделювання для інших режимів. Результати приведені на рис. 2.1-2.3.

					ДП6109.141.006.ПЗ	Арк.
						41
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

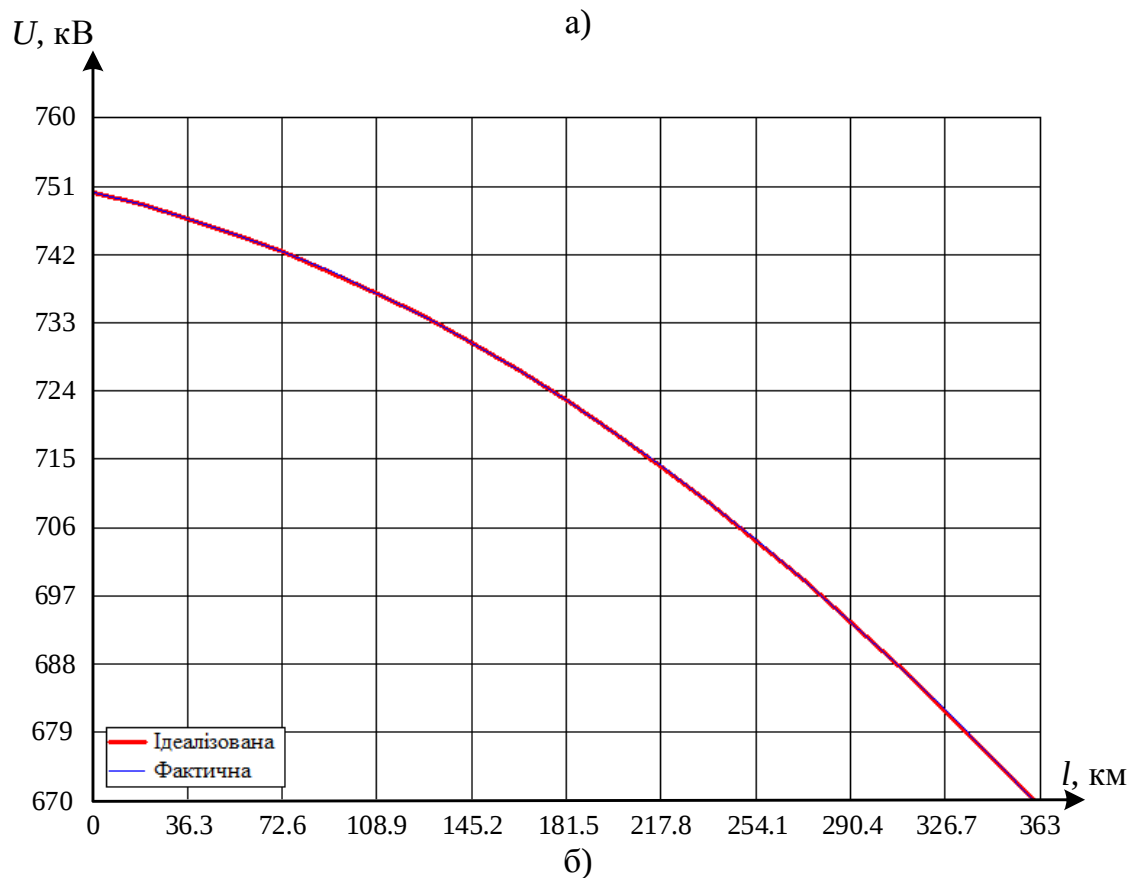
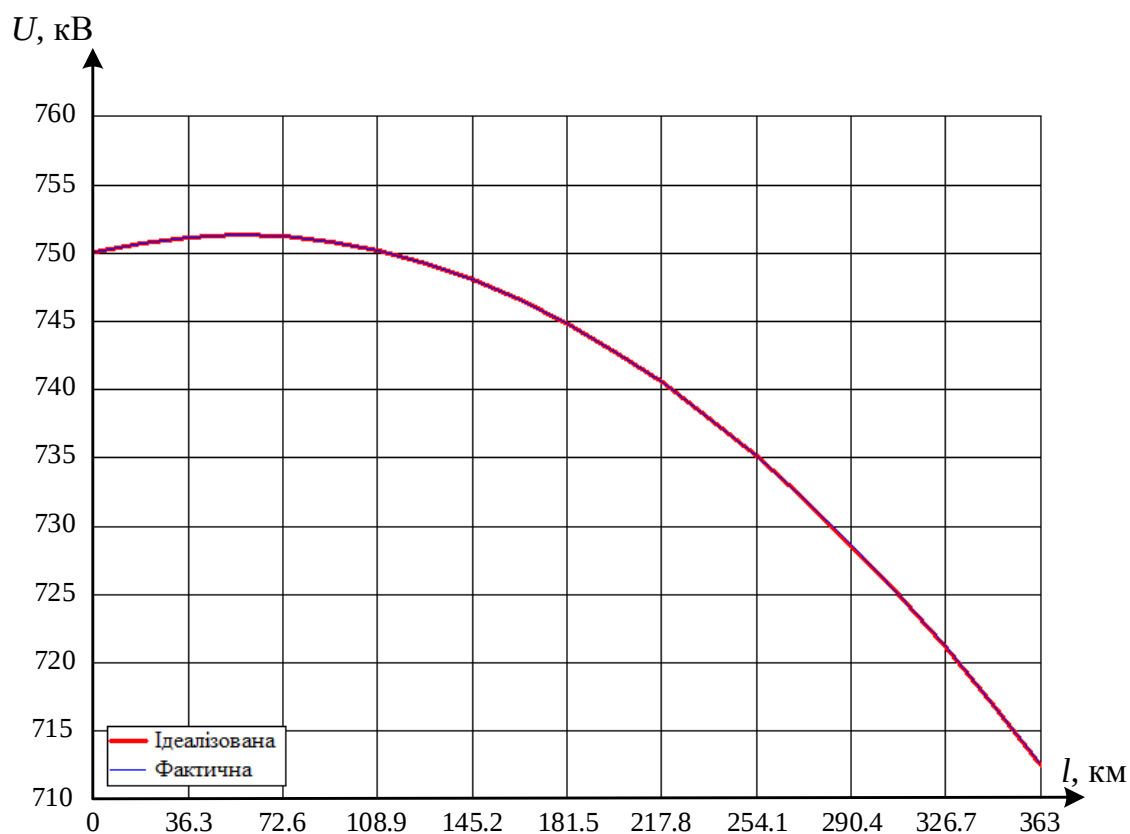


Рисунок 2.1 – Епюр розподілу напруги вздовж траси лінії для режимів:
а) неробочого ходу; б) ємнісного навантаження

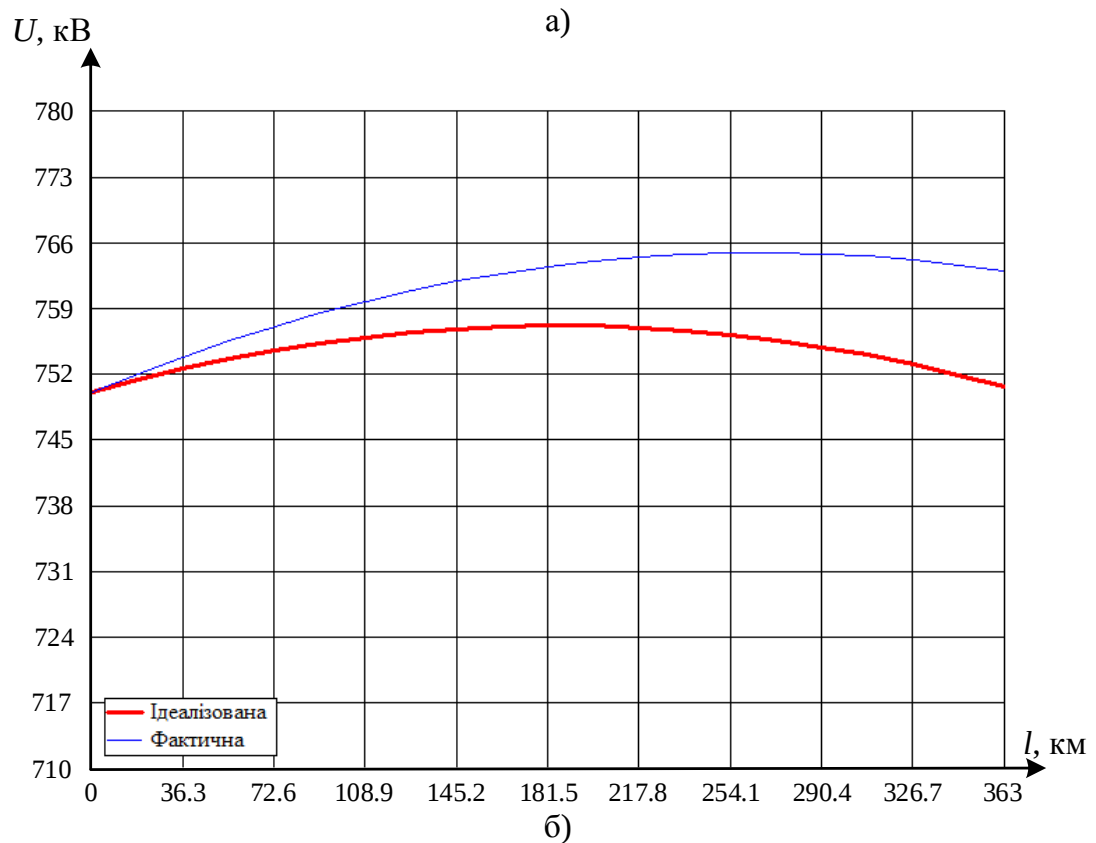
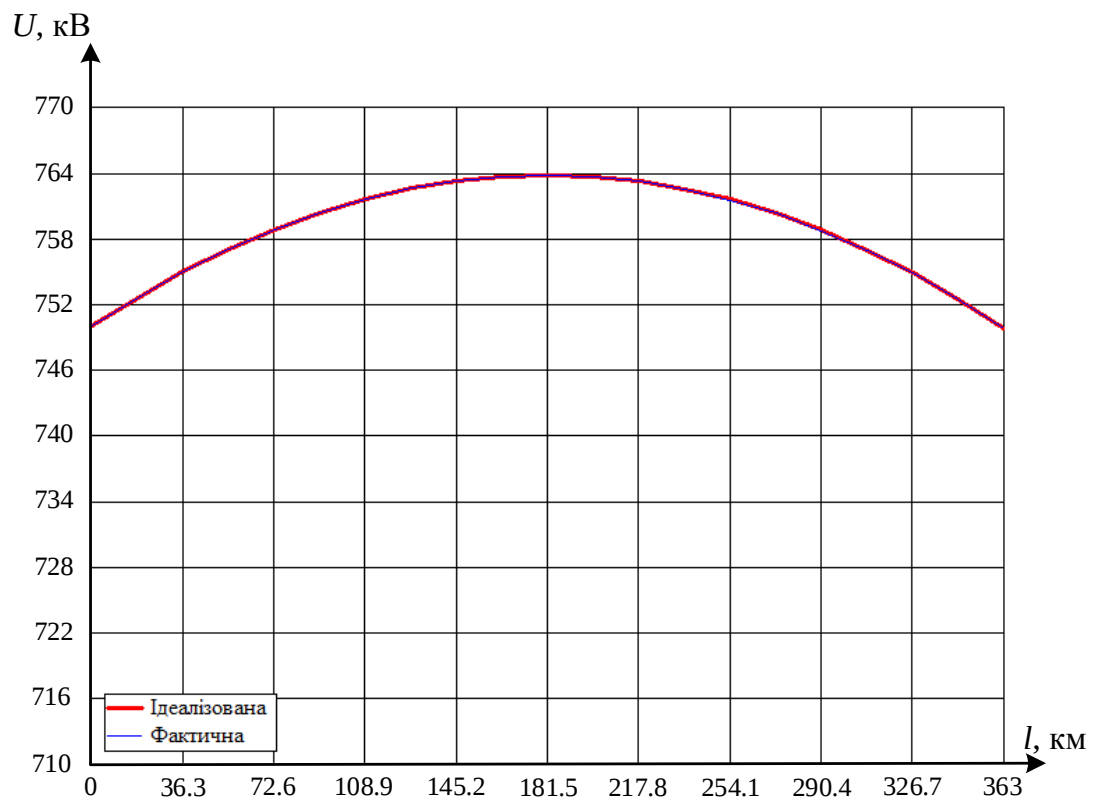


Рисунок 2.2 – Епюр розподілу напруги вздовж траси лінії для режимів:
а) індуктивного навантаження; б) активно-індуктивного навантаження,
меншого за натуральну потужність

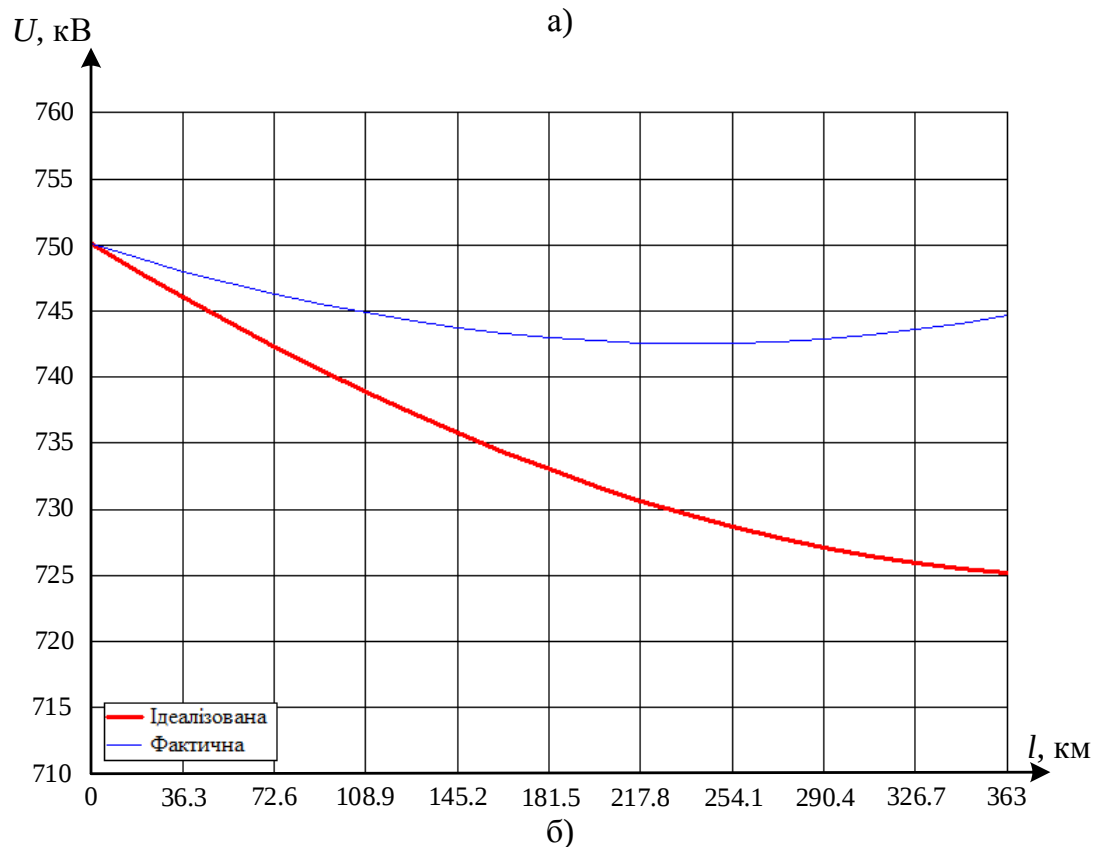


Рисунок 2.3 – Елюр розподілу напруги вздовж траси лінії для режимів:
а) активного навантаження рівного натуральній потужності;
б) активно-ємнісного навантаження, більшого за натуральну потужність

Аналіз інформації, що наведена на рис. 2.1-2.3, дозволяє зробити наступні висновки:

1) У випадку відсутності активного навантаження електропередачі криві розподілу напруги ідеалізованої та фактичної лінії практично збігаються (див. рис. 2.1 а-б та рис. 2.2 а). При збільшенні активного навантаження електропередачі збільшується розбіг між даними кривими (див. рис. 2.2 б та рис. 2.3 а-б).

2) В режимі неробочого ходу лінії електропередавання максимальна напруга спостерігається в кінці лінії, що обумовлено ефектом Ферранті при протіканні ємнісних зарядних струмів по лінії електропередавання (див. рис. 3.1 а). Подібна ситуація спостерігається при чисто ємнісному навантаженні електропередачі, коли потоки реактивної потужності направлені у бік енергосистеми на початку електропередачі (див. рис. 2.1 б).

3) У випадку чисто індуктивного навантаження в кінці електропередачі (в приймальну енергосистему надходить частина надлишкової зарядної потужності лінії) спостерігається «горб» профілю напруги, що обумовлено розподілом ємнісних зарядних струмів між поєднаними енергосистемами (див. рис. 2.2 а). Аналогічна, але менш виражена ситуація спостерігається у випадку активно-індуктивного навантаження, що є меншим за натуральну потужність лінії електропередавання (див. рис. 2.2 б).

4) У випадку навантаження лінії, що дорівнює натуральній потужності спостерігається майже лінійний спад напруги вздовж лінії електропередавання, а для ідеалізованої електропередачі профіль напруги залишається незмінним вздовж всієї лінії (див. рис. 2.3 а).

5) У випадку навантаження лінії, яке перевищує натуральну потужність лінії електропередавання спостерігається «провал» профілю напруги, що обумовлений потоками реактивної потужності в лінію із суміжних енергосистем в режимах, коли індуктивні втрати реактивної потужності є більшими за ємнісну зарядну потужність лінії (див. рис. 2.3 б).

					ДП6109.141.006.ПЗ	Арк.
						45
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Висновки до розділу 2

В даному розділі досліджено розподіл напруги вздовж траси лінії номінальною наругою 750 кВ завдовжки 363 км з конструкцією фази $4 \times \text{АС-400/93}$. Погонний опір даної лінії складає $0.02 + j0.29$ Ом/км, погонна провідність – $2.44 \cdot 10^{-8} + j3.88 \cdot 10^{-6}$ См/км, хвильовий опір – $271.09 - j7.58$ Ом, а коефіцієнт поширення електромагнітної хвилі – $3.604 \cdot 10^{-5} + j1.053 \cdot 10^{-3}$ 1/км. Натуральна потужність ЛЕП становить 2075 МВт.

Здійснено моделювання розподілу напруги вздовж траси лінії при фіксації рівня напруги в кінці ЛЕП на рівні 750 кВ. Моделювання виконано для режиму неробочого ходу, в якому приймальної системи стікає потужність 122,67 МВАр., ємнісного навантаження лінії на рівні 200 МВАр, індуктивного навантаження лінії на рівні –400 МВАр; активно-індуктивного навантаження - $1500 - j200$ МВАр; активного навантаження лінії, що дорівнює натуральній потужності лінії електропередачі; активно-ємнісного навантаження лінії – $2300 + j300$ МВАр.

Для режимів неробочого ходу та ємнісного навантаження найбільше значення напруги спостерігається в кінці електропередачі, 751.31 кВ для режиму неробочого ходу та 750 кВ для режиму ємнісного навантаження. Для режимів індуктивного навантаження та активно-індуктивного навантаження, що є меншим за натуральну потужність максимальне значення напруги спостерігається всередині електропередачі, 763.82 кВ для режиму індуктивного навантаження та 764.91 для активно-індуктивного навантаження меншого за натуральну потужність лінії. В режимі активного навантаження, що дорівнює натуральній потужності відбувається лінійний спад напруги вздовж траси лінії від 767.05 кВ до 750 кВ. В режимі активно-ємнісного навантаження, що є більшим за натуральну потужність спостерігається провал профілю напруги до 744.23 кВ.

					ДП6109.141.006.ПЗ	Арк.
						46
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

З ВИЗНАЧЕННЯ КООРДИНАТИ ЕКСТРЕМАЛЬНОЇ ТОЧКИ ЗА НАРУГОЮ ВЗДОВЖ ПЛ

3.1 Теоретичні відомості

Метою дослідження розподілу напруги вздовж траси лінії електропередавання є визначення допустимості перенапруги, що виникає в режимах малих навантажень за умовами обмежень лінійної ізоляції. За умовами роботи лінійної ізоляції тривале перевищення фактичної робочої напруги жорстко обмежено.

Для жодної вузлової чи проміжної точки лінії електропередачі не має порушуватись умова:

$$U \leq k_{\max} U_n, \quad (3.1)$$

де U - фактичне значення робочої напруги у вузлових та проміжних точках електропередачі;

$k_{\max}$ - коефіцієнт допустимості перенапруги, який має значення 1.1 для ліній із номінальною напругою 330 кВ та 1,05 для ліній із номінальною напругою 500 кВ та вище.

Як видно з рис. 2.1-2.3 в режимі малих навантажень найбільше значення рівня напруги спостерігається переважно в проміжних точках ліній електропередавання. Тому одним із основних практичних завдань при дослідженні режимів роботи дальніх ліній електропередавання є знаходження координат точок із максимальним значенням рівня напруги.

Дане завдання можна розглядати, як задачу пошуку екстремальної точки, в якій похідна $\partial U(x)/\partial x$ змінює свій знак з додатного на від'ємний при проходженні від початку лінії електропередавання.

Для оціночних розрахунків доцільно знаходити координату точки із максимальною напругою для ідеалізованої лінії. В цьому випадку дорівнювати до нуля маємо наступну похідну:

					ДП6109.141.006.ПЗ	Арк.
						47
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

$$\frac{\partial U(x)}{\partial x} = \frac{U_1 \beta'_0 (-2Q_{1*} U_1^2 \cos(2\beta_0^i x) - (U_{1*}^4 - P_{1*}^2 - Q_{1*}^2) \sin(2\beta_0^i x))}{2U_{1*}^4 \sqrt{\left(\cos(\beta_0^i x) - \frac{Q_{1*}}{U_{1*}^2} \sin(\beta_0^i x)\right)^2 + \left(\frac{P_{1*}}{U_{1*}^2} \sin(\beta_0^i x)\right)^2}} = 0, \quad (3.2)$$

або

$$-2Q_{1*} U_1^2 \cos(2\beta_0^i x) = (U_{1*}^4 - P_{1*}^2 - Q_{1*}^2) \sin(2\beta_0^i x), \quad (3.3)$$

звідки

$$x_e = \frac{1}{2\beta_0^i} \arctan\left(\frac{-2Q_{1*} U_{1*}^2}{U_{1*}^4 - P_{1*}^2 - Q_{1*}^2}\right), \quad (3.4)$$

де P_{1*} , Q_{1*} - активна та реактивна потужність у відносних одиницях щодо натуральної потужності лінії електропередачі.

Аналогічно можна знайти розв'язок задачі пошуку координати точки із максимальним значенням рівня напруги за умовами кінця електропередачі. У випадку ідеалізованої електропередачі до нуля необхідно прирівнювати похідну наступного виразу:

$$\frac{\partial U(x)}{\partial x} = \frac{U_2 \beta'_0 (2Q_{2*} U_2^2 \cos(2\beta_0^i x) - (U_{2*}^4 - P_{2*}^2 - Q_{2*}^2) \sin(2\beta_0^i x))}{2U_{2*}^4 \sqrt{\left(\cos(\beta_0^i x) + \frac{Q_{2*}}{U_{2*}^2} \sin(\beta_0^i x)\right)^2 + \left(\frac{P_{2*}}{U_{2*}^2} \sin(\beta_0^i x)\right)^2}} = 0, \quad (3.5)$$

звідки

$$x_e = \frac{1}{2\beta_0^i} \arctan\left(\frac{2Q_{2*} U_{2*}^2}{U_{2*}^4 - P_{2*}^2 - Q_{2*}^2}\right). \quad (3.6)$$

При розрахунках за умовами кінця відстань відраховується від кінця лінії електропередавання.

					ДП6109.141.006.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		48

Можливі випадки від'ємного значення координати шуканої точки, або величини більшої за фактичну довжину лінії. Це означає, що точка із найбільшою напругою знаходиться на початку або в кінці електропередачі.

Також необхідно відмітити, що знайдене значення координати точки матиме наближене значення. Це обумовлено ідеалізацією електропередачі. Фактична координата точки з максимальною напругою буде віддалена від знайденою на відстань тим більше, чим більше навантаження електропередачі.

У випадку вирішення задачі пошуку розподілу напруги вздовж траси лінії за умовами кінця, то для знаходження точки з максимальною напругою необхідно розв'язати наступне рівняння:

$$\frac{\partial U(x)}{\partial x} = \frac{dk_{20}^U U_2^2 + dk_{2k}^U I_2^2 + dk_{2P}^U P_2 + dk_{2Q}^U Q_2}{2\sqrt{k_{20}^U U_2^2 + k_{2k}^U I_2^2 + k_{2P}^U P_2 + k_{2Q}^U Q_2}} = 0, \quad (3.7)$$

або

$$dk_{20}^U U_2^2 + dk_{2k}^U I_2^2 + dk_{2P}^U P_2 + dk_{2Q}^U Q_2, \quad (3.8)$$

де

$$dk_{20}^U = \frac{\partial k_{20}^U}{\partial x} = \alpha_0 \sinh(2\alpha_0 x) - \beta_0 \sin(2\beta_0 x); \quad (3.9)$$

$$dk_{2k}^U = \frac{\partial k_{2k}^U}{\partial x} = \alpha_0 \sinh(2\alpha_0 x) - \beta_0 \sin(2\beta_0 x); \quad (3.10)$$

$$dk_{2P}^U = \frac{\partial k_{2P}^U}{\partial x} = 2(p_c \alpha_0 \cosh(2\alpha_0 x) - q_c \beta_0 \cos(2\beta_0 x)); \quad (3.11)$$

$$dk_{2Q}^U = \frac{\partial k_{2Q}^U}{\partial x} = 2(p_c \beta_0 \cos(2\beta_0 x) + q_c \alpha_0 \cosh(2\alpha_0 x)). \quad (3.12)$$

В результаті перетворень отримаємо наступне рівняння:

					ДП6109.141.006.ПЗ	Арк.
						49
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

$$\begin{aligned}
& 2(P_2 p_c + Q_2 q_c) \alpha_0 \cosh(2\alpha_0 x) + (U_2^2 + I_2^2 + Z_c^2) \alpha_0 \sinh(2\alpha_0 x) = \\
& = 2(P_2 q_2 - Q_2 p_c) \beta_0 \cos(2\beta_0 x) + (U_2^2 - I_2^2 Z_c^2) \beta_0 \sin(2\beta_0 x).
\end{aligned}
\tag{3.13}$$

Аналітичного розв'язку попереднього рівняння не існує. Тому, щоб знайти координати точки із максимальною напругою необхідно використати числові методи розв'язання нелінійних алгебраїчних рівнянь. Як вже зазначалося, найсуттєвіше збільшення напруги в проміжних точках лінії електропередавання відбувається в режимах малих навантажень електропередачі, коли лінією протікають істотні зарядні струми не скомпенсовані індуктивними втратами в елементах електропередачі. В даних режимах епюри розподілу напруги вздовж траси лінії ідеалізованої та фактичної електропередачі майже збігаються (див. рис. 2.2 а). Тому координати точки з найбільшою напругою можна визначити за допомогою виразу для ідеалізованої системи за умовами кінця чи початку.

Якщо необхідно більш точне визначення координати точки вздовж траси електропередачі з максимальним значенням рівня напруги можна використати лінеаризацію задачі, що базується на розкладанні в обмежений ступеневий ряд тригонометричних та гіперболічних функцій попереднього рівняння:

$$\cosh(\alpha_0 \lambda) \approx 1; \tag{3.14}$$

$$\sinh(\alpha_0 \lambda) \approx \alpha_0 \lambda; \tag{3.15}$$

$$\cos(\beta_0 \lambda) \approx 1; \tag{3.16}$$

$$\sin(\beta_0 \lambda) \approx \beta_0 \lambda. \tag{3.17}$$

В результаті отримаємо:

$$\begin{aligned}
& 2(P_2 p_c + Q_2 q_c) \alpha_0 + (U_2^2 + I_2^2 + Z_c^2) 2\alpha_0^2 x = \\
& = 2(P_2 q_2 - Q_2 p_c) \beta_0 + (U_2^2 - I_2^2 Z_c^2) 2\beta_0^2 x.
\end{aligned}
\tag{3.18}$$

Звідки

					ДП6109.141.006.ПЗ	Арк.
						50
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

$$x_e = \frac{-P_2(p_c\alpha_0 - q_c\beta_0) - Q_2(p_c\beta_0 + q_c\alpha_0)}{U_2^2(\alpha_0^2 - \beta_0^2) + I_2^2 Z_c^2(\alpha_0^2 + \beta_0^2)}. \quad (3.19)$$

Очевидно, що використання попереднього виразу для пошуку екстремальної точки вздовж траси лінії електропередавання пов'язане із похибкою, що обумовлена обмеженням розкладання в ряд Тейлора гіперболічних і тригонометричних функцій. Підвищити точність розрахунку координати екстремальної точки можливо, якщо розкладання гіперболічних та тригонометричних функцій обмежити вищими ступенями. Для розрахункової моделі другого порядку необхідно розв'язати наступне квадратне рівняння:

$$a_{(2)}x_e^2 + b_{(2)}x_e + c_{(2)} = 0, \quad (3.20)$$

де коефіцієнти поліному складають:

$$a_{(2)} = 4(P_2 p_c + Q_2 q_c)\alpha_0^3 + 4(P_2 q_c - Q_2 p_c)\beta_0^3; \quad (3.21)$$

$$b_{(2)} = 2\alpha_0^2(U_2^2 + Z_c^2 I_2^2) - 2\beta_0^2(U_2^2 - Z_c^2 I_2^2); \quad (3.22)$$

$$c_{(2)} = 2(P_2(p_c\alpha_0 - q_c\beta_0) + Q_2(p_c\beta_0 + q_c\alpha_0)). \quad (3.23)$$

В даному випадку практичний зміст має менший за модулем корінь, який знаходиться наступним чином:

$$x_e = \frac{-b_{(2)} - \sqrt{b_{(2)}^2 - 4a_{(2)}c_{(2)}}}{2a_{(2)}}. \quad (3.24)$$

Розрахункова модель третього ступеня у свою чергу визначається наступним кубічним рівнянням:

$$a_{(3)}x_e^3 + b_{(3)}x_e^2 + c_{(2)}x_{(e)} + d_{(3)} = 0, \quad (3.25)$$

					ДП6109.141.006.ПЗ	Арк.
						51
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

де коефіцієнти розраховуються наступним чином:

$$a_{(3)} = \frac{4}{3} \alpha_0^4 (U_2^2 + Z_c^2 I_2^2) + \frac{4}{3} \beta_0^4 (U_2^2 - Z_c^2 I_2^2); \quad (3.26)$$

$$b_{(3)} = 4(P_2 p_c + Q_2 q_c) \alpha_0^3 + 4(P_2 q_c - Q_2 p_c) \beta_0^3; \quad (3.27)$$

$$c_{(3)} = 2\alpha_0^2 (U_2^2 + Z_c^2 I_2^2) - 2\beta_0^2 (U_2^2 - Z_c^2 I_2^2); \quad (3.28)$$

$$d_{(3)} = 2(P_2(p_c \alpha_0 - q_c \beta_0) + Q_2(p_c \beta_0 + q_c \alpha_0)). \quad (3.29)$$

Аналогічно до моделі другого ступеня практичний зміст має менший за модулем дійсний корінь, що знаходиться за допомогою наступного виразу:

$$x_e = -\frac{b_{(3)}}{3a_{(3)}} + \frac{(1 - j\sqrt{3})(-b_{(3)}^2 + 3a_{(3)}c_{(3)})}{3\sqrt[3]{4}a_{(3)}e_{(3)}} - \frac{(1 + j\sqrt{3})e_{(3)}}{6\sqrt[3]{2}a_{(3)}}. \quad (3.30)$$

де

$$e_{(3)} = \sqrt[3]{-2b_{(3)}^3 + 9a_{(3)}b_{(3)}c_{(3)} - 27a_{(3)}^2d_{(3)} + \sqrt{4(-b_{(3)}^2 + 3a_{(3)}c_{(3)})^3 + (-2b_{(3)}^3 + 9a_{(3)}b_{(3)}c_{(3)})^2}}. \quad (3.31)$$

3.2 Визначення координати екстремальної точки

Здійснимо пошук координати точки з максимальною напругою для дальньої лінії електропередачі номінальною напругою 750 кВ завдовжки 363 км. Розрахунки виконаємо для навантажень в діапазоні 0...0,9 натуральної потужності електропередачі (*SIL*). Напругу на кінці електропередачі фіксуємо на рівні номінальної напруги. Реактивну потужність в кінці електропередачі приймаємо рівною половині оціночного значення надлишкової зарядної потужності електропередачі.

Розглянемо випадок із навантаженням 0,1 від номінальної потужності. Повна потужність в кінці електропередачі складе:

$$\dot{S}_2 = 207.49 - j292.22 \text{ МВА.}$$

					ДП6109.141.006.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		52

Струм в кінці електропередачі становить:

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{S}_2}{U_2} = \frac{207.49 - j292.22}{750} = 0.277 - j0.39 \text{ кА.}$$

Приведемо значення напруги, активної та реактивної потужності до базисних умов. За базисні приймаємо номінальну напругу та натуральну потужність електропередачі. В результаті маємо:

$$U_{2*} = \frac{U_2}{U_\phi} = \frac{750}{750} = 1 \text{ в.о.};$$

$$S_{2*} = \frac{|\dot{S}_2|}{S_\phi} = \frac{358.39}{2074} = 0.173 \text{ в.о.};$$

$$P_{2*} = S_{2*} \cos \varphi = 0.173 \cdot 0.58 = 0.1 \text{ в.о.};$$

$$Q_{2*} = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{0.173^2 - 0.1^2} = 0.141 \text{ в.о.}$$

Для ідеалізованої електропередачі значення координати точки з максимальною напругою складе:

$$x_e = \frac{1}{2\beta_0^i} \arctan \left(\frac{2Q_{2*}U_{2*}^2}{U_{2*}^4 - P_{2*}^2 - Q_{2*}^2} \right) = \frac{1}{2 \cdot 1.053 \cdot 10^{-3}} \arctan \left(\frac{2 \cdot 0.141 \cdot 1^2}{1^2 - 0.1^2 - 0.141^2} \right) = 134.27 \text{ км.}$$

За лінеаризованою моделлю значення координати точки з найбільшою напругою складе:

$$x_e = \frac{-P_2(p_c \alpha_0 - q_c \beta_0) - Q_2(p_c \beta_0 + q_c \alpha_0)}{U_2^2(\alpha_0^2 - \beta_0^2) + I_2^2 Z_c^2(\alpha_0^2 + \beta_0^2)} = \frac{-207.49(271.09 \cdot 3.6 \cdot 10^{-5} + 7.58 \cdot 1.05 \cdot 10^{-3}) - 292.22(271.02 \cdot 1.05 \cdot 10^{-3} - 7.58 \cdot 3.6 \cdot 10^{-5})}{750^2((3.6 \cdot 10^{-5})^2 - (1.05 \cdot 10^{-3})^2) + 0.48^2 \cdot 271.2^2((3.6 \cdot 10^{-5})^2 + (1.05 \cdot 10^{-3})^2)} = 144.05 \text{ км.}$$

За моделлю другого ступеня значення координати точки з найбільшою напругою складе:

$$a_{(2)} = 4(P_2 p_c + Q_2 q_c) \alpha_0^3 + 4(P_2 q_c - Q_2 p_c) \beta_0^3 = 4 \cdot (207.49 \cdot 271.09 + 292.22 \cdot (-7.58)) \times (3.6 \cdot 10^{-5})^3 + 4(207.49 \cdot (-7.58) - 292.22 \cdot 271.09) \cdot (1.05 \cdot 10^{-3})^3 = -3.77 \cdot 10^{-4};$$

					ДП6109.141.006.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		53

$$b_{(2)} = 2\alpha_0^2(U_2^2 + Z_c^2 I_2^2) - 2\beta_0^2(U_2^2 - Z_c^2 I_2^2) = 2 \cdot (3.6 \cdot 10^{-5})^2 \cdot (750^2 + 271.2^2 \cdot 0.48^2) - 2 \cdot (1.05 \cdot 10^{-3})^2 \cdot (750^2 - 271.2^2 \cdot 0.48^2) = -1.21;$$

$$c_{(2)} = 2(P_2(p_c \alpha_0 - q_c \beta_0) + Q_2(p_c \beta_0 + q_c \alpha_0)) = 2 \cdot (207.49 \cdot (271.09 \cdot 3.6 \cdot 10^{-5} + 7.58 \cdot 10^{-3}) + 292.22 \cdot (271.09 \cdot 1.05 \cdot 10^{-3} - 7.58 \cdot 3.6 \cdot 10^{-5})) = 173.97;$$

$$x_e = \frac{-b_{(2)} - \sqrt{b_{(2)}^2 - 4a_{(2)}c_{(2)}}}{2a_{(2)}} = \frac{1.21 - \sqrt{(-1.21)^2 - 4 \cdot (-3.77) \cdot 10^{-4} \cdot 173.97}}{2 \cdot (-3.77 \cdot 10^{-4})} = 138.1 \text{ км.}$$

За моделлю третього ступеня значення координати точки з найбільшою напругою складе:

$$a_{(3)} = \frac{4}{3}\alpha_0^4(U_2^2 + Z_c^2 I_2^2) + \frac{4}{3}\beta_0^4(U_2^2 - Z_c^2 I_2^2) = \frac{4}{3} \cdot (3.6 \cdot 10^{-5})^4 \times \\ \times (750^2 + 271.2^2 \cdot 0.48^2) + \frac{4}{3} \cdot (1.05 \cdot 10^{-3})^4 \cdot (750^2 - 271.2^2 \cdot 0.48^2) = 8.93 \cdot 10^{-7};$$

$$b_{(3)} = 4(P_2 p_c + Q_2 q_c) \alpha_0^3 + 4(P_2 q_c - Q_2 p_c) \beta_0^3 = 4 \cdot (207.49 \cdot 271.09 + 292.22 \cdot (-7.58)) \cdot (3.6 \cdot 10^{-5})^3 + 4 \cdot (207.49 \cdot (-7.58) - 292.22 \cdot 271.09) \cdot (1.05 \cdot 10^{-3})^3 = -3.77 \cdot 10^{-4};$$

$$c_{(3)} = 2\alpha_0^2(U_2^2 + Z_c^2 I_2^2) - 2\beta_0^2(U_2^2 - Z_c^2 I_2^2) = 2 \cdot (3.6 \cdot 10^{-5}) \cdot (750^2 + 271.2^2 \cdot 0.48^2) - 2 \cdot (1.05 \cdot 10^{-3})^2 \cdot (750^2 - 271.2^2 \cdot 0.48^2) = -1.21;$$

$$d_{(3)} = 2(P_2(p_c \alpha_0 - q_c \beta_0) + Q_2(p_c \beta_0 + q_c \alpha_0)) = 2 \cdot (207.49 \cdot (271.09 \cdot 3.6 \cdot 10^{-5} + 7.58 \cdot 1.05 \cdot 10^{-3}) + 292.22 \cdot (271.09 \cdot 1.05 \cdot 10^{-3} - 7.58 \cdot 3.6 \cdot 10^{-5})) = 173.97;$$

$$e_{(3)} = \sqrt[3]{-2b_{(3)}^3 + 9a_{(3)}b_{(3)}c_{(3)} - 27a_{(3)}^2d_{(3)}} + \sqrt{4(-b_{(3)}^2 + 3a_{(3)}c_{(3)})^3 + (-2b_{(3)}^3 + 9a_{(3)}b_{(3)}c_{(3)})^2} = \\ = (2.01 + j1.16) \cdot 10^{-3};$$

$$x_e = -\frac{b_{(3)}}{3a_{(3)}} + \frac{(1 - j\sqrt{3})(-b_{(3)}^2 + 3a_{(3)}c_{(3)})}{3\sqrt[3]{4}a_{(3)}e_{(3)}} - \frac{(1 + j\sqrt{3})e_{(3)}}{6\sqrt[3]{2}a_{(3)}} = -\frac{-3.77 \cdot 10^{-4}}{3 \cdot 8.93 \cdot 10^{-7}} + \\ + \frac{(1 - j\sqrt{3})((3.77 \cdot 10^{-4})^2 - 3 \cdot 8.93 \cdot 10^{-7} \cdot 1.21)}{3 \cdot \sqrt[3]{4} \cdot 8.93 \cdot 10^{-7} (2.01 + j1.16) \cdot 10^{-3}} - \frac{((1 + j\sqrt{3}) \cdot (2.01 + j1.16) \cdot 10^{-3})}{6 \cdot \sqrt[3]{2} \cdot 8.93 \cdot 10^{-7}} = \\ = 139.97 \text{ км.}$$

					ДП6109.141.006.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		54

Фактичне значення координати точки з найбільшим значенням напруги знаходимо розв'язавши наступне нелінійне алгебраїчне рівняння за допомогою програми Mathcad:

$$2(P_2 p_c + Q_2 q_c) \alpha_0 \cosh(2\alpha_0 x) + (U_2^2 + I_2^2 + Z_c^2) \alpha_0 \sinh(2\alpha_0 x) = \\ = 2(P_2 q_2 - Q_2 p_c) \beta_0 \cos(2\beta_0 x) + (U_2^2 - I_2^2 Z_c^2) \beta_0 \sin(2\beta_0 x).$$

В результаті маємо наступний корінь рівняння:

$$x_e = 140 \text{ км.}$$

На рис. 3.1 зображено сімейство кривих розподілу напруги вздовж траси ПЛ напругою 750 завдовжки 363 км в діапазоні активних навантажень 0...0,9 від натуральної потужності лінії електропередавання.

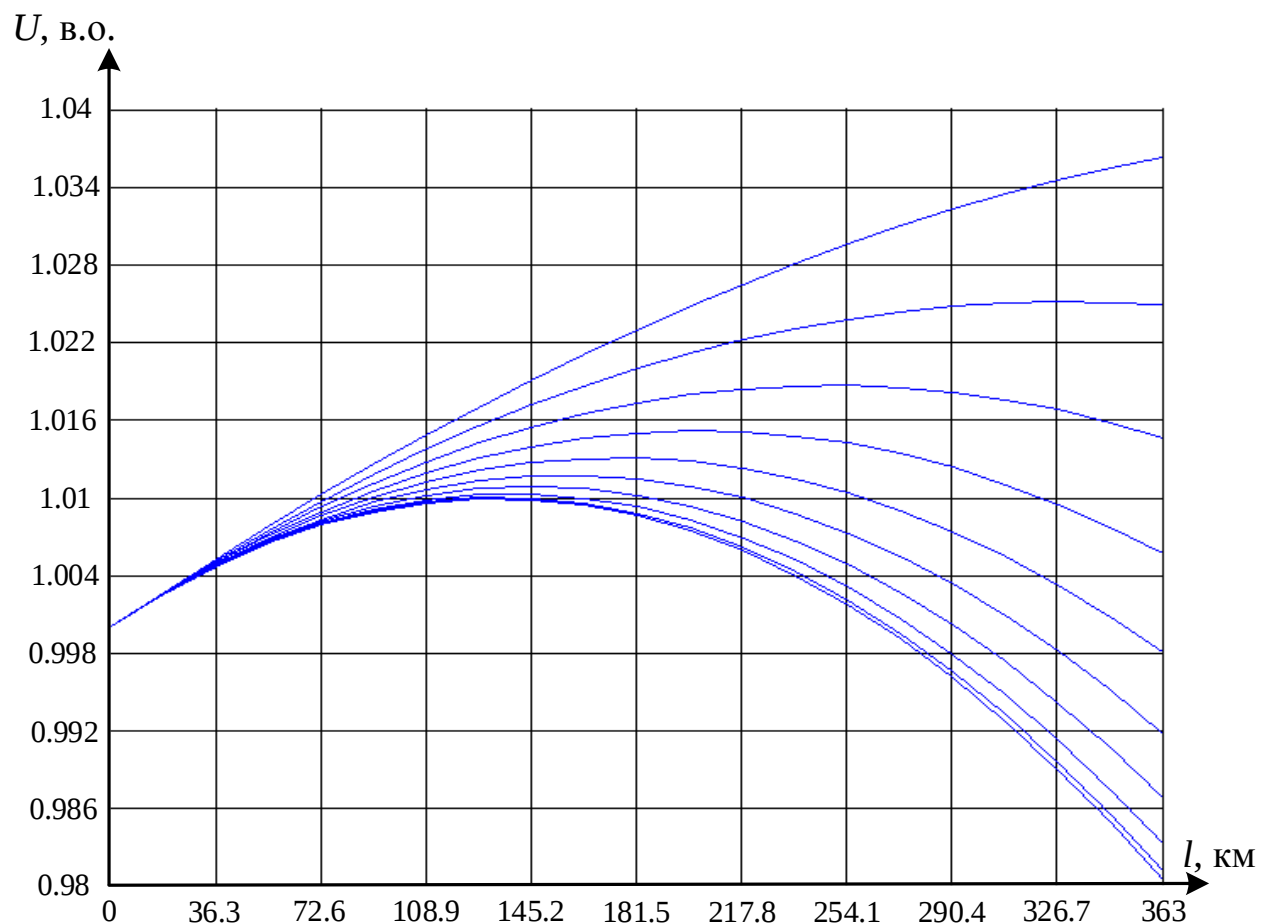


Рис. 3.1 – Сімейство кривих розподілу напруги вздовж ПЛ
при змінні активного навантаження

В табл. 3.1 наведено інформацію про похибку при визначенні координати екстремальної точки за напругою при ідеалізації електропередачі, для лінеаризованої моделі, моделі другого порядку та моделі третього порядку.

Таблиця 3.1 – Похибка визначення координати екстремальної точки вздовж ПЛ при змінні активного навантаження

P_2	Фактичне x_e , км	За моделлю ідеалізованої лінії		За лінеаризованою моделлю		За моделлю другого ступеня		За моделлю третього ступеня	
		x_e , км	Δx , %	x_e , км	Δx , %	x_e , км	Δx , %	x_e , км	Δx , %
0	132.95	132.97	0.01	136.54	2.7	131.32	1.23	132.93	0.02
0.1	140	134.27	4.09	144.05	2.89	138.1	1.36	139.97	0.02
0.2	150.11	138.33	7.85	154.96	3.23	147.79	1.55	150.07	0.03
0.3	164.17	145.64	11.29	170.34	3.76	161.16	1.83	164.1	0.04
0.4	183.68	157.22	14.41	192.16	4.61	179.55	2.25	183.56	0.07
0.5	211.32	174.99	17.19	224.06	6.03	205.22	2.89	211.09	0.11
0.6	251.96	202.67	19.57	273.56	8.57	242.11	3.91	251.41	0.22
0.7	315.15	247.99	21.31	358.68	13.81	297.47	5.61	313.52	0.52
0.8	420.51	328.97	21.77	535.81	27.42	385.03	8.44	414.13	1.52
0.9	604.07	488.89	19.07	1116.41	84.82	530.02	12.26	572.55	5.22

Аналіз даних табл. 3.1 показує, що для діапазону малих навантажень меншу похибку розрахунку дає модель ідеалізованої електропередачі, а для діапазону середніх і великих навантажень – лінеаризована модель. Похибка знаходження екстремальної точки по напрузі істотно збільшується при великих навантаженнях лінії електропередачі, коли екстремальна точка знаходиться за межами ділянки лінії електропередачі. Для даних режимів найбільша напруга спостерігається на початку чи в кінці лінії електропередавання відповідно до порушеної межі. Збільшення деталізації у випадку застосування розрахункової моделі другого і третього порядку дозволяє підвищити точність розрахунку. Проте, використання найбільш точної моделі третього ступеня вимагає застосування апарату комплексних чисел, що ускладнює її використання в режимі реального часу.

Відзначимо, що координата точки з максимальною напругою визначається також реактивною потужністю навантаження, що несе лінія електропередавання. В табл. 3.2 міститься інформація про похибку знаходження координати екстре-

мальної точки по напрузі вздовж траси лінії електропередавання напругою 750 км завдовжки 363 км. Розрахунки виконано в діапазоні реактивних навантажень від 0,5 (ємн) до 1,0 (інд) зарядної потужності лінії електропередавання при фіксації напруги в кінці електропередачі на рівні номінальної та активного навантаження в кінці лінії електропередавання на рівні 0,25*SIL*.

Розрахунки виконано за умовами кінця. Тому відстань до екстремальної точки вимірюється від кінця лінії електропередавання.

Відзначимо, що в діапазоні ємнісного навантаження лінії електропередавання екстремальна точка по напрузі знаходиться поза межами ділянки, про що свідчить від'ємне значення координати екстремальної точки. В даних режимах максимальна напруга спостерігається в кінці лінії електропередавання. Аналогічно при великих індуктивних навантаженнях значення координати екстремальної точки є більшим за довжину лінії електропередавання, що свідчить про її положення за межами ділянки. В даному випадку максимальна напруга буде спостерігатися на початку лінії електропередавання.

Таблиця 3.2 – Похибка визначення координати екстремальної точки вздовж ПЛ при змінні реактивного навантаження

Q_2	Фактичне x_e , км	За моделлю ідеалізованої лінії		За лінеаризованою моделлю		За моделлю другого ступеня		За моделлю третього ступеня	
		x_e , км	Δx , %	x_e , км	Δx , %	x_e , км	Δx , %	x_e , км	Δx , %
0.5 (єм)	-185.85	-200.38	7.82	-196.71	5.84	-181.65	2.26	-185.7	0.08
0.25 (єм)	-88.89	-101.52	17.99	-85.59	1.28	-85.59	0.53	-86.04	0.005
0.25 (інд)	116.91	101.52	13.16	119.05	1.84	115.78	0.97	116.89	0.011
0.5 (інд)	214.76	200.38	6.7	229.7	6.95	208.44	2.95	214.49	0.13
0.75 (інд)	307.34	294.37	4.22	356.47	15.99	291.23	5.24	305.72	0.53
1.0 (інд)	393.38	381.99	2.89	512.52	30.29	364.55	7.33	388.08	1.35

Аналіз даних табл. 3.2 показує, що точність лінеаризованої моделі визначається в першу чергу активним навантаженням, що несе лінія електропередавання, водночас збільшення реактивного навантаження як в бік ємнісного, так і в бік індуктивного навантаження приводить до невеликого збільшення похибки моделювання. Лінеаризована розрахункова модель має високу точність в діапазоні малих

навантажень реактивною потужністю. Похибка визначення екстремальної точки по напрузі істотно збільшується при великих індуктивних навантаженнях електропередачі, більших за 60-65% зарядної потужності лінії електропередачі. Застосування моделей вищих ступенів приводить, очевидно, до підвищення точності розрахунків при змінній реактивного навантаження, що несе лінія електропередачі.

В роботі також здійснено дослідження точності використання розрахункових моделей знаходження координати екстремальної точки по напрузі від довжини лінії електропередавання в діапазоні від 100 до 600 км. В даному випадку нижня межа діапазону обумовлена необхідністю врахування розподілу параметрів вздовж ліній електропередавання середньої довжини, а верхня межа визначається згідно економічно обґрунтованої межі, вище якої доцільно використовувати технології постійного струму для здійснення передавання електроенергії на понад дальні відстані.

В табл. 3.3 міститься інформацію про похибку знаходження координати екстремальної точки по напрузі вздовж траси лінії електропередавання напругою 750 кВ за фіксації напруги в кінці лінії електропередавання на рівні номінальної та активного навантаження в кінці лінії електропередавання на рівні 0,25SIL та реактивного навантаження, що дорівнює половині оціночного значення «надлишкової» зарядної потужності лінії електропередачі.

Розрахунки виконано за умовами кінця.

Таблиця 3.3 – Похибка визначення координати екстремальної точки вздовж ПЛ при змінній довжини лінії

l, км	Фактичне x_e , км	За моделлю ідеалізованої лінії		За лінеаризованою моделлю		За моделлю другого ступеня		За моделлю третього ступеня	
		x_e , км	Δx , %	x_e , км	Δx , %	x_e , км	Δx , %	x_e , км	Δx , %
100	55.01	39.31	28.55	55.2	0.34	54.89	0.22	55.01	0.008
200	93.99	78.45	16.53	95.06	1.14	93.39	0.64	93.98	0.005
300	132.55	117.29	11.51	135.75	2.41	130.92	1.23	132.52	0.018
400	170.56	155.66	8.74	177.69	4.18	167.22	1.96	170.48	0.05
500	207.91	193.44	6.96	221.36	6.47	202.12	2.79	207.68	0.11
600	244.48	230.51	5.72	267.27	9.32	235.53	3.66	243.95	0.22

Аналіз даних табл. 3.3 показує, що у випадку застосування розрахункової моделі ідеалізованої лінії електропередавання абсолютна похибка знаходження координати екстремальної точки є істотно зменшується із збільшенням довжини лінії електропередавання. Лінеарізована розрахункова модель характеризується зневажливо малою похибкою для ліній середньої довжини та зростає при збільшенні довжини лінії електропередавання. Точність розрахунків істотно зростає у випадку використання розрахункової моделі другого і третього ступеня.

Порівняльний аналіз розрахункових моделей знаходження координати екстремальної точки вздовж траси повітряної лінії електропередавання свідчить про високу точність моделі ідеалізованої електропередачі тільки в діапазоні малих навантажень активною потужністю.

В діапазоні середніх і великих навантажень меншу похибку моделювання забезпечує лінеарізована модель лінії електропередавання та моделі другого і третього порядку, причому збільшення деталізації моделі, очевидно, приводить до підвищення її точності. Також моделі вищих порядків характеризуються набагато більшою громіздкістю, крім того модель третього порядку вимагає залучення апарату комплексних чисел, що ускладнює її використання. Крім того висока точність моделі третього порядку в діапазоні великих навантажень може бути невірною, оскільки в даних режимах екстремальна точка по напрузі знаходиться поза межами ділянки ЛЕП та максимальна напруга спостерігається на початку або в кінці ЛЕП відповідно до порушеної межі.

Як відомо, хвильові параметри повітряних ЛЕП визначаються, в тому числі, втратами електричної енергії під час коронного розряду, що носять кліматичний характер. Втрати активної потужності на корону для типових конструкцій повітряних ЛЕП напругою 750 кВ складають: при ясній погоди 4,6 кВт/км, під час снігу – 17,5 кВт/км, при дощовій погоді – 65,0 кВт/км, у випадку паморозі – 130 кВт/км. Це обумовлює їхню зміну пвд час експлуатації ЛЕП відповідно до поточних погодних умов в районі розміщення траси лінії. Також, очевидно, що змінюється координата екстремальної точки з максимальною робочою напругою.

					ДП6109.141.006.ПЗ	Арк.
						59
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

В табл. 3.4 приведена інформація про знаходження екстремальної точки із найбільшою напругою вздовж траси ЛЕП за типових груп погоди за навантаження, що складає 0, 25, 50 та 75% натуральної потужності ЛЕП та похибка знаходження екстремальної точки за нехтування втратами на корону.

Таблиця 3.4 – Похибка визначення координати екстремальної точки вздовж ПЛ із врахуванням втрат енергії на корону

P_{2*}	x_e , км	Ясно		Сніг		Дощ		Паморозь	
		x_e , км	Δx , %	x_e , км	Δx , %	x_e , км	Δx , %	x_e , км	Δx , %
0	136.49	136.51	0.01	136.56	0.05	136.75	0.19	137.01	0.38
0.25	161.93	161.95	0.01	162.01	0.05	162.25	0.2	162.6	0.41
0.5	223.95	223.99	0.02	224.09	0.06	224.5	0.24	225.17	0.55
0.75	428.23	428.33	0.02	428.62	0.09	429.98	0.41	432.6	1.02

Аналіз даних табл. 4.4 говорить про допустимість нехтування втратами на корону при знаходженні координати екстремальної точки із найбільшою напругою вздовж траси досліджуваної ЛЕП. Це дозволяє спростити формулу лінеаризованої моделі та знайти координату екстремальної точки за наступним виразом:

$$x_e = \frac{P_2 r_0 + Q_2 x_0}{U_2^2 \beta_0^{i2} - I_2^2 (r_0^2 + x_0^2)}.$$

Висновки до розділу 3

В даному розділі здійснено дослідження питання пошуку екстремальної точки за напругою лінії електропередавання номінальною напругою 750 кВ, що розглядалася в другому розділі. Визначення координати екстремальної точки виконано при ідеалізації електропередачі, для лінеаризованої моделі, моделі другого порядку та моделі третього порядку.

Модель ідеалізації лінії електропередавання може використовуватись для оціночних розрахунків, оскільки не враховує активні втрати.

Лінеаризована модель – результат розкладання в ряд Тейлора та взяття елементів ряду з аргументом нульового та першого ступеня.

Модель другого ступеня – результат розкладання в ряд Тейлора та взяття елементів ряду з аргументом нульового по другий ступінь включно, а модель третього ступеня - розкладання в ряд Тейлора та взяття елементів ряду з аргументом нульового по третій ступінь включно.

Розкладання в ряд Тейлора здійснюється для тригонометричних та гіперболічних функцій, що входять до рівняння пошуку екстремальної точки.

Досліджено похибку пошуку екстремальної точки за напругою при змінні активного навантаження в межах 0-0.9 від натуральної потужності лінії. Для ідеалізованої моделі похибка визначення екстремальної точки знаходилася в межах від 2.89% до 17.99%, для лінеаризованої моделі – від 1.28% до 30.29%, для моделі другого ступеня – від 1.23% до 12.26%, а для моделі третього ступеня від 0.02% до 5.22%.

Досліджено похибку пошуку екстремальної точки за напругою при змінні реактивного навантаження в межах 0.5(см) до 1.0 (інд) від зарядної потужності лінії. Для ідеалізованої моделі похибка визначення екстремальної точки знаходилася в межах від 0.01% до 21.77%, для лінеаризованої моделі – від 2.7% до 84.82%, для моделі другого ступеня – від 0.53% до 7.33%, а для моделі третього ступеня від 0.005% до 1.35%.

Досліджено похибку пошуку екстремальної точки за напругою при змінні довжини лінії. Для ідеалізованої моделі похибка визначення екстремальної точки знаходилася в межах від 5.72% до 28.55%, для лінеаризованої моделі – від 0.34% до 9.32%, для моделі другого ступеня – від 0.22% до 3.66%, а для моделі третього ступеня від 0.005% до 0.22%.

Також здійснено дослідження похибки пошуку екстремальної точки за напругою із врахуванням втрат на корону. Максимальна похибка склала 1.02 % при паморозі та значенні втрат на корону 130 кВт/км. Це говорить про допустимість нехтування втратами на корону при пошуку екстремальної точки за напругою.

					ДП6109.141.006.ПЗ	Арк.
						61
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

ВИСНОВКИ

В першому розділі розглянуто роль зарядної потужності ліній надвисокої напруги. Взаємозв'язок між параметрами схеми заміщення та хвильовими параметрами, між хвильовими параметрами та натуральною потужністю, зарядною потужністю. Здійснено аналіз розподілу рівня напруги вздовж траси лінії при навантаженнях більших та менших за натуральну потужність лінії.

Розглянуто ефект Ферранті для ліній електропередачі. Також розглянуто особливості ефекту Ферранті для дальніх ліній надвисокої напруги. Особливістю виникнення ефекту Ферранті в електропередачах великої довжини, в яких зарядні потужності лінії певним чином розподіляються між вузовими підстанціями на початку та наприкінці лінії і, як наслідок, збільшення напруги спостерігається в проміжних точках електропередачі, тобто спостерігається, так званий, «горб» профілю напруги вздовж траси лінії.

В другому розділі досліджено розподіл напруги вздовж траси лінії номінальною наругою 750 кВ завдовжки 363 км з конструкцією фази $4 \times \text{АС-400/93}$. Погонний опір даної лінії складає $0.02 + j0.29$ Ом/км, погонна провідність – $2.44 \cdot 10^{-8} + j3.88 \cdot 10^{-6}$ См/км, хвильовий опір – $271.09 - j7.58$ Ом, а коефіцієнт поширення електромагнітної хвилі – $3.604 \cdot 10^{-5} + j1.053 \cdot 10^{-3}$ 1/км. Натуральна потужність ЛЕП становить 2075 МВт.

Здійснено моделювання розподілу напруги вздовж траси лінії при фіксації рівня напруги в кінці ЛЕП на рівні 750 кВ. Моделювання виконано для режиму неробочого ходу, в якому приймальної системи стікає потужність 122,67 МВАр., ємнісного навантаження лінії на рівні 200 МВАр, індуктивного навантаження лінії на рівні -400 МВАр; активно-індуктивного навантаження - $1500 - j200$ МВАр; активного навантаження лінії, що дорівнює натуральній потужності лінії електропередачі; активно-ємнісного навантаження лінії – $2300 + j300$ МВАр.

Для режимів неробочого ходу та ємнісного навантаження найбільше значення напруги спостерігається в кінці електропередачі, 751.31 кВ для режиму не-

					ДП6109.141.006.ПЗ	Арк.
						62
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

робочого ходу та 750 кВ для режиму ємнісного навантаження. Для режимів індуктивного навантаження та активно-індуктивного навантаження, що є меншим за натуральну потужність максимальне значення напруги спостерігається всередині електропередачі, 763.82 кВ для режиму індуктивного навантаження та 764.91 для активно-індуктивного навантаження меншого за натуральну потужність лінії. В режимі активного навантаження, що дорівнює натуральній потужності відбувається лінійний спад напруги вздовж траси лінії від 767.05 кВ до 750 кВ. В режимі активно-ємнісного навантаження, що є більшим за натуральну потужність спостерігається провал профілю напруги до 744.23 кВ.

В третьому розділі здійснено дослідження питання пошуку екстремальної точки за наругою аналогічної лінії електропередавання номінальною напругою 750 кВ, що розглядалася в другому розділі. Визначення координати екстремальної точки виконано при ідеалізації електропередачі, для лінеаризованої моделі, моделі другого порядку та моделі третього порядку. Модель ідеалізації лінії електропередавання може використовуватись для оціночних розрахунків, оскільки не враховує активні втрати. Лінеаризована модель дає похибку обумовлену обмеженням розкладання в ряд Тейлора гіперболічних і тригонометричних функцій. Підвищити точність розрахунку координати екстремальної точки можливо, якщо розкладання гіперболічних та тригонометричних функцій обмежити вищими ступенями. Найбільшу точність розрахунку дає модель третього ступеня.

Аналіз отриманих результатів показує, що в діапазоні середніх і великих навантажень меншу похибку моделювання забезпечує лінеаризована модель лінії електропередавання та моделі другого і третього порядку, причому збільшення деталізації моделі, очевидно, приводить до підвищення її точності. Для моделі другого ступеню максимальна похибка склала 12.26 %, а моделі третього ступеня склала 5.2 %.

					ДП6109.141.006.ПЗ	Арк.
						63
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Сулейманов В.М., Кацадзе Т. Л. Электричні мережі та системи. Підруч. Київ: НТУУ «КПІ», 2008. 504 с.

2. Сулейманов В.М., Кацадзе Т.Л., Янковська О.М. Электричні мережі та системи. Проектування дальньої електропередачі змінного струму надвисокої напруги: метод. вказівки до викон. курсового проекту для студ. та студ.-іноземців напрямку підготов. 6.0507.01 «Електротехніка та електротехнології» спец. «Електричні мережі та системи». Київ: НТУУ «КПІ», 2008. 112 с.

3. Понимание эффекта Ферранти в линиях передачи URL: [https://www.shunlongwei.com/ru/understanding-the-ferranti-effect-in-transmission lines/](https://www.shunlongwei.com/ru/understanding-the-ferranti-effect-in-transmission-lines/) (дата звернення 09.05.2021 р).

4. Эффект Ферранти для энергетической системы URL: <https://zetsila.ru/эффект-ферранти-для-энергосистемы> (дата звернення 10.05.2021 р).

					ДП6109.141.006.ПЗ	Арк.
						64
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

ДОДАТОК А.
Результати перевірки на плагіат

					ДП6109.141.006.ПЗ	Арк.
						65
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		



Ім'я користувача:
Теймураз Кацадзе

Дата перевірки:
03.06.2021 12:12:27 EEST

Дата звіту:
03.06.2021 12:20:31 EEST

ID перевірки:
1008154318

Тип перевірки:
Doc vs Internet + Library

ID користувача:
100007199

Назва документа: Solovei_EC_z71

Кількість сторінок: 57 Кількість слів: 11309 Кількість символів: 74188 Розмір файлу: 1.19 MB ID файлу: 1008233625

Виявлено модифікації тексту (можуть впливати на відсоток схожості)

6.44%
Схожість

Найбільша схожість: 2.57% з Інтернет-джерелом (<http://www.scribd.com/doc/38405525/Quimica-Fisica-Solucionario-Tho..>)

5.94% Джерела з Інтернету 324 Сторінка 59

5.6% Джерела з Бібліотеки 424 Сторінка 67

0% Цитат

Вилучення цитат вимкнене

Вилучення списку бібліографічних посилань вимкнене

0%
Вилучень

Немає вилучених джерел

Модифікації

Виявлено модифікації тексту. Детальна інформація доступна в онлайн-звіті.

Замінені символи 34

Підозріле форматування 9 сторінок