

Т. Л. Кацадзе<sup>1</sup>  
В. А. Баженов<sup>1</sup>  
О. М. Паненко<sup>1</sup>  
О. М. Янковська<sup>1</sup>  
К. М. Новіков<sup>1</sup>

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ВИЗНАЧЕННЯ ЕКСТРЕМАЛЬНОЇ ЗА НАПРУГОЮ ТОЧКИ В ДАЛЬНІЙ ЛІНІЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ ЗМІННОГО СТРУМУ

<sup>1</sup>Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

*Подано результати дослідження режиму напруги в проміжних точках дальньої лінії електропередачі змінного струму. Представлені математичні моделі розподілу реактивної потужності та профілю напруги вздовж фактичної та ідеалізованої лінії. Запропоновано спосіб та математичні моделі визначення координат екстремальних точок поточкорозділу за реактивною потужністю та за напругою вздовж траси лінії. Запропоновано застосовувати лінеаризовані математичні моделі лінії електропередачі, а також детальніші моделі другого та третього порядку для визначення координати екстремальної точки за напругою вздовж лінії електропередачі. Показано, що підвищення точності розрахунків можна досягти із застосуванням математичних моделей другого та третього порядків. Деталізація моделювання зумовлює підвищення точності моделі, проте це пов'язано з ускладненням математичної моделі, а застосування моделі третього порядку вимагає ще й залучення апарату комплексних чисел для реалізації відповідних розрахунків. Досліджено вплив на точність розрахунку координати екстремальної точки величини активного та реактивного навантаження, а також втрат активної потужності під час коронного розряду. Показано можливість застосування запропонованих моделей в задачах регулювання та налагодження параметрів гнучких електропередач на базі ліній надвисокої номінальної напруги. Так, для типових конструкцій магістральних електропередач ОЕС України достатню точність розрахунків забезпечують моделі першого та другого порядку і тільки для електропередач надвеликої довжини доцільно використовувати математичну модель третього порядку.*

**Ключові слова.** дальня лінія електропередачі змінного струму, ефект Ферранті, гнучка електропередача, розподіл напруги.

### Вступ

Відомо, що експлуатаційні характеристики робочих режимів магістральних електричних мереж значною мірою визначаються надвеликими зарядними струмами ліній електропередачі надвисокої номінальної напруги, протікання яких зумовлює виникнення ефекту Ферранті — збільшення рівня напруги ближче до кінця електропередачі [1], [2]. Як наслідок, у певних режимах електропередачі енергія передається від вузла з меншою напругою до вузла з більшою напругою. Слід зважати на певні особливості виникнення ефекту Ферранті в дальніх електропередачах, де зарядні потужності лінії розподіляються між вузловими підстанціями на початку та наприкінці лінії, що зумовлює збільшення напруги в проміжних точках електропередачі та виникнення «горба» профілю розподілу напруги вздовж лінії [2], [3]. Очевидно, найбільше зростання напруги внаслідок прояву ефекту Ферранті має місце в режимах малих навантажень, коли зарядна потужність лінії не скомпенсована індуктивними втратами, зумовленими робочими струмами лінії.

Водночас слід зважати на жорсткі обмеження щодо допустимості режиму напруги в лініях електропередачі надвисокої номінальної напруги. Відповідно до [4], ізоляційні підвіси повітряних ліній надвисокої напруги, зовнішня ізоляція електроустановок та ізолятори розподільчих пристроїв повинні мати 50 % розрядні напруги не нижче 315 кВ для електропередач напругою 330 кВ; 460 кВ для електропередач напругою 500 кВ; 685 кВ для електропередач напругою 750 кВ на відміну від ізоляції

ліній напругою до 220 кВ, які повинні мати такий показник на рівні лінійної номінальної напруги. Це зумовлює обмеження допустимої перенапруги в нормальних режимах електропередач надвисокої напруги не більше 10 % в мережах напругою 330 кВ та 5 % в мережах напругою 500 кВ і 750 кВ [5].

Така ситуація визначає проблему організації ефективного налаштування та регулювання режимів пристроїв компенсації зарядної потужності ліній електропередачі надвисокої номінальної напруги, зокрема керованих шунтувальних реакторів [6], [7]. Тут, з одного боку, для забезпечення економічності режиму дальньої електропередачі слід підтримувати підвищений профіль напруги вздовж лінії електропередачі [3], [8], але, з другого боку — запобігати виникненню недопустимої перенапруги в нормальних режимах електричної мережі. Таким чином, постає проблема визначення координати екстремальної точки за напругою та найбільшої робочої напруги електропередачі лінії з метою оптимізації заходів, направлених на нормалізацію профілю напруги вздовж траси лінії. Відомі підходи до моделювання розподілу напруги вздовж лінії електропередачі базуються на громіздких викладках [9], ідеалізації електропередачі [10], [11] або дискретизації лінії електропередачі [12], що ускладнює оперативне визначення максимальної напруги вздовж траси лінії, до прикладу, під час налагодження параметрів КШР у складі гнучкої електропередачі відповідно до умов поточного режиму лінії електропередачі, та зумовлює похибку моделювання дальньої електропередачі.

*Метою статті є підвищення якості регулювання режиму дальньої лінії електропередачі з урахуванням збільшення профілю розподілу напруги вздовж лінії через виникнення ефекту Ферранті.*

Відповідно до вказаної мети в роботі вирішуються *задачі*:

1. Дослідження законів розподілу напруги та реактивної потужності вздовж дальньої лінії електропередачі;
2. Формування математичної моделі визначення координати екстремальної за напругою точки вздовж лінії електропередачі;
3. Дослідження точності запропонованої моделі відповідно до зміни параметрів режиму електропередачі.

### Результати досліджень

Вище зазначалось, що збільшення профілю напруги в експлуатаційних режимах дальніх ліній електропередач пов'язано з виникненням ефекту Ферранті, зумовленим протіканням ємнісних зарядних струмів лінії. Це визначає безпосередній зв'язок між режимами реактивної потужності та напруги в дальній лінії електропередачі. Водночас слід зважати на те, що хвильові процеси в дальніх лініях електропередач, зумовлені запізненням електромагнітної хвилі наприкінці лінії через обмеження швидкості її поширення, визначає нелінійний характер розподілу режимних параметрів (напруги, струму, потоків потужності) вздовж лінії.

На рис. 1 показано суміщені епюри розподілу напруги та реактивної потужності вздовж типової лінії електропередачі напругою 750 кВ завдовжки 363 км з конструкцією фази 4×АС-400/93, що відповідає проєктній документації лінії «Західноукраїнська–Вінницька».

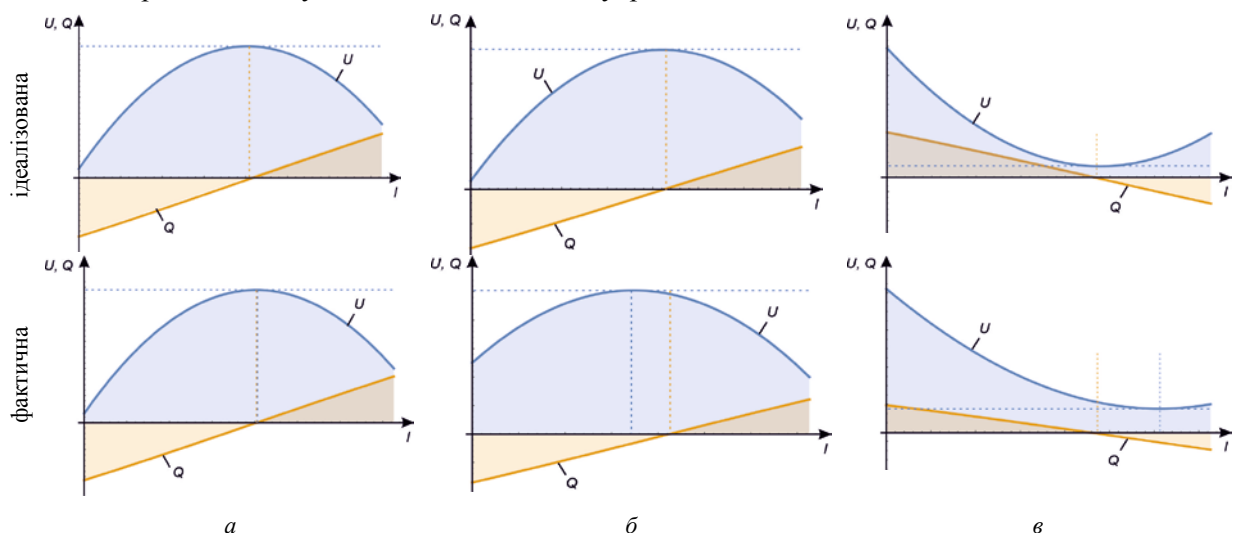


Рис. 1. Епюри розподілу напруги та реактивної потужності вздовж дальньої електропередачі:

*а* — за індуктивного навантаження; *б* — за активно-індуктивного навантаження, меншого натуральної потужності; *в* — за активно-ємнісного навантаження, більшого натуральної потужності

Моделювання виконано в середовищі Wolfram Mathematica для фактичної та ідеалізованої лінії в таких режимах електропередачі: за індуктивного навантаження лінії (рис. 1а); за активно-індуктивного навантаження лінії, меншого за натуральну потужність (рис. 1б); за активно-ємнісного навантаження лінії, що перевищує натуральну потужність (рис. 1в).

З аналізу рис. 2, випливають такі висновки:

1) для ідеалізованої електропередачі екстремальна за напругою точка збігається з точкою поточкорозділу за реактивною потужністю;

2) для фактичної електропередачі за відсутності активного навантаження точка з найбільшою напругою практично збігається з точкою поточкорозділу за реактивною потужністю. Зі зростанням активного навантаження лінії відстань між цими точками збільшується.

Це означає, що використання математичної моделі ідеалізованої електропередачі для визначення координати екстремальної за напругою точки допустимо тільки в режимах ненавантаженої лінії та за малих навантажень. У цьому разі точка поточкорозділу за реактивною потужністю визначає місце в лінії з екстремальною напругою — найбільшою в режимах малих навантажень та найменшою в режимах навантажень, які перевищують натуральну потужність електропередачі.

Для ідеалізованої електропередачі розподіл реактивної потужності визначається виразами:

$$Q(x) = 0,5SIL \left[ 2Q_{1*} \cos(2\beta_0^i x) - \left( U_{1*}^2 - \frac{P_{1*}^2 + Q_{1*}^2}{U_{1*}^2} \right) \sin(2\beta_0^i x) \right];$$

$$Q(x) = 0,5SIL \left[ 2Q_{2*} \cos(2\beta_0^i x) + \left( U_{2*}^2 - \frac{P_{2*}^2 + Q_{2*}^2}{U_{2*}^2} \right) \sin(2\beta_0^i x) \right],$$

де  $SIL$  — натуральна потужність електропередачі;  $\beta_0^i$  — коефіцієнт фази ідеалізованої електропередачі; індексом «\*» позначені відповідні параметри у відносних одиницях, для напруги за базисну величину вибрано номінальну напругу електропередачі, для потоків потужності — натуральну потужність лінії.

Для визначення координати точки поточкорозділу, наприклад, за умовами кінця електропередачі необхідно розв'язати рівняння

$$0,5SIL \left[ 2Q_{2*} \cos(2\beta_0^i x) + \left( U_{2*}^2 - \frac{P_{2*}^2 + Q_{2*}^2}{U_{2*}^2} \right) \sin(2\beta_0^i x) \right] = 0,$$

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

Той самий результат можна отримати, розв'язуючи екстремальну задачу для кривої розподілу напруги вздовж ідеалізованої електропередачі [13]

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

$$\frac{\partial U(x)}{\partial x} = \frac{U_{1*} \beta_0^i \left( -2Q_{1*} U_{1*}^2 \cos(2\beta_0^i x) - (U_{1*}^4 - P_{1*}^2 - Q_{1*}^2) \sin(2\beta_0^i x) \right)}{2U_{1*}^4 \sqrt{\left( \cos(\beta_0^i x) - \frac{Q_{1*}}{U_{1*}^2} \sin(\beta_0^i x) \right)^2 + \left( \frac{P_{1*}}{U_{1*}^2} \sin(\beta_0^i x) \right)^2}} = 0.$$

Розв'язуючи задачу за умови початку електропередачі координату екстремальної точки визначають за виразом

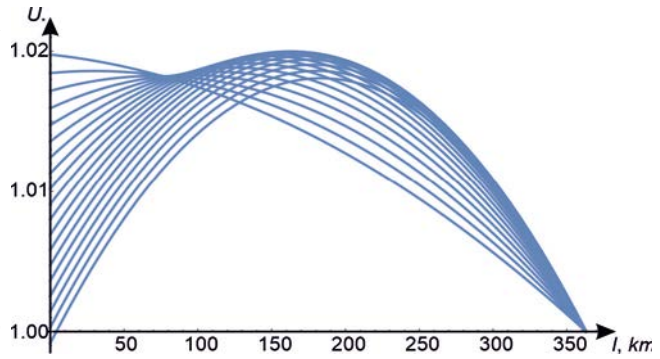


Рис. 2. Сімейство кривих розподілу напруги вздовж ДЕП за зміни активного навантаження лінії

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

Можливий випадок, коли розрахунки за виразами (1) або (2) дадуть від'ємне значення координати шуканої точки або величину, більшу ніж довжина лінії. Це означає, що точка з найбільшою робочою напругою знаходиться на початку або наприкінці лінії електропередачі відповідно до порушеної межі.

Разом з тим, як зазначалось вище, активне навантаження, яке несе електропередача, зумовлює похибку визначення координати екстремальної за напругою точки, величина якої збільшується зі зростанням навантаження. Така ситуація проілюстрована, наприклад, на рис. 1б та 1в.

Якщо розглядати задачу з визначення розподілу напруги вздовж траси лінії за умовами кінця, то для точного знаходження координати точки з найбільшою робочою напругою слід розв'язати рівняння

$$2(P_2p_c + Q_2q_c)\alpha_0 \cosh(2\alpha_0x) + (U_2^2 + I_2^2Z_c^2)\alpha_0 \sinh(2\alpha_0x) = 2(P_2q_c - Q_2p_c)\beta_0 \cos(2\beta_0x) + (U_2^2 - I_2^2Z_c^2)\beta_0 \sin(2\beta_0x). \quad (3)$$

Для розв'язання рівняння (3) в [13] запропоновано підхід, який базується на розкладанні гіперболічних та тригонометричних функцій в обмежений ряд Тейлора. В залежності від необхідної точності розрахунків можна сформулювати моделі першого, другого та третього порядків:

$$a_1x + a_0 = 0;$$

$$a_2x^2 + a_1x + a_0 = 0;$$

$$a_3x^3 + a_2x^2 + a_1x + a_0 = 0,$$

де  $a_0 = 2(P_2(p_c\alpha_0 - q_c\beta_0) + Q_2(p_c\beta_0 + q_c\alpha_0)); a_1 = 2\alpha_0^2(U_2^2 + Z_c^2I_2^2) - 2\beta_0^2(U_2^2 - Z_c^2I_2^2);$

$$a_2 = 4(P_2p_c + Q_2q_c)\alpha_0^3 + 4(P_2q_c - Q_2p_c)\beta_0^3; a_3 = \frac{4}{3}\alpha_0^4(U_2^2 + Z_c^2I_2^2) + \frac{4}{3}\beta_0^4(U_2^2 - Z_c^2I_2^2).$$

У разі застосування лінійної розрахункової моделі координату екстремальної за напругою точки визначають за виразом

$$x_e^{(1)} = \frac{-P_2(p_c\alpha_0 - q_c\beta_0) - Q_2(p_c\beta_0 + q_c\alpha_0)}{\alpha_0^2(U_2^2 + Z_c^2I_2^2) - \beta_0^2(U_2^2 - Z_c^2I_2^2)}. \quad (4)$$

Для моделі другого порядку практичний зміст має менший за модулем корінь

$$x_e^{(2)} = \frac{-a_2 - \sqrt{a_2^2 - 4a_0a_3}}{2a_0}. \quad (5)$$

Для моделі третього порядку практичний зміст також має менший за модулем дійсний корінь

$$x_e^{(3)} = -\frac{a_2}{3a_3} + \frac{(1 - j\sqrt{3})(-a_2^2 + 3a_1a_3)}{3\sqrt[3]{4a_3b}} - \frac{(1 + j\sqrt{3})b}{6\sqrt[3]{2a_3}}, \quad (6)$$

де  $b = \sqrt[3]{-2a_2^3 + 9a_1a_2a_3 - 27a_0a_3^2 + \sqrt{4(-a_2^2 + 3a_1a_3)^3 + (-2a_2^3 + 9a_1a_2a_3 - 27a_0a_3^2)^2}}.$

### Обговорення отриманих результатів

Верифікацію запропонованих в роботі моделей реалізовано на прикладі типової лінії напругою 750 кВ завдовжки 363 км. На рис. 2 показано сімейство кривих розподілу напруги вздовж траси лінії в діапазоні навантажень 0...0,9 натуральної потужності електропередачі за фіксації напруги наприкінці на рівні номінальної. Реактивна потужність наприкінці лінії дорівнює половині оціночного значення «надлишкової» зарядної потужності електропередачі. Очевидно, що зміна активної потужності навантаження зумовлює пересування екстремальної на напругою точки вздовж лінії електропередачі.

На рис. 3 показані діаграми похибки визначення координати екстремальної точки за напругою за ідеалізації лінії електропередачі за виразом (1), для лінеаризованої моделі за виразом (4) та для моделей другого та третього порядку за виразами (5) та (6), відповідно.

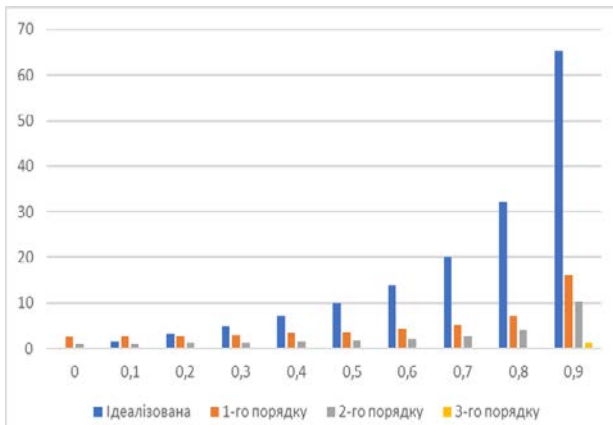


Рис. 3. Похибка визначення координати екстремальної точки вздовж ДЕП за зміни активного навантаження лінії

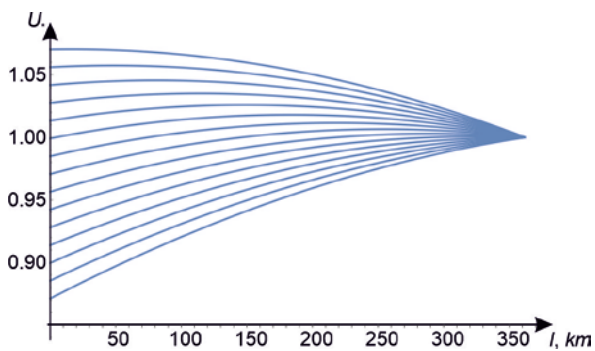


Рис. 4. Сімейство кривих розподілу напруги вздовж ДЕП за зміни реактивного навантаження лінії

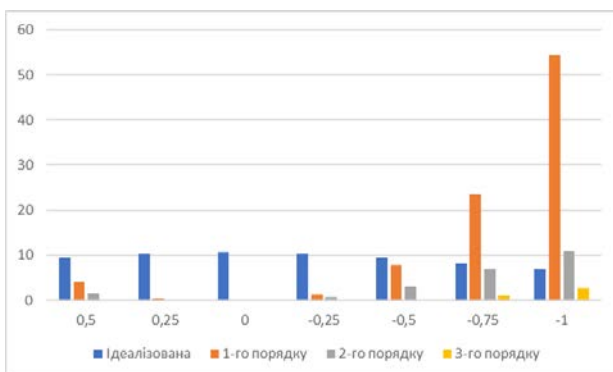


Рис. 5. Похибка визначення координати екстремальної точки вздовж ДЕП за зміни реактивного навантаження лінії

лінії. Використання моделей вищих порядків забезпечує, очевидно, підвищення точності розрахунків за варіювання реактивного навантаження, яке несе лінія електропередачі.

Порівняльний аналіз розрахункових моделей визначення координати екстремальної точки вздовж траси повітряної лінії свідчить про високу точність моделі ідеалізованої електропередачі виключно в діапазоні малих навантажень активною потужністю. Причому висока точність моделювання практично не залежить від реактивного навантаження, яке несе лінія.

В діапазоні середніх та великих навантажень меншу похибку моделювання забезпечують лінеаризована модель електропередачі та моделі другого і третього порядку, причому збільшення деталізації моделі очевидно підвищує її точність. Разом з тим, моделі вищих порядків характеризуються більшою громіздкістю, до того ж модель третього порядку вимагає залучення апарату комплексних чисел, що ускладнює її застосування. Більше того, висока точність моделі третього порядку в діапазоні великих навантажень може виявитись не виправданою, адже в таких режимах екстремальна точка за напругою знаходиться поза межами ділянки лінії електропередачі і найбільша напруга спостерігається на початку або наприкінці лінії відповідно до порушеної межі.

З аналізу рис. 3 випливає, що в діапазоні малих навантажень меншу похибку дає модель ідеалізованої електропередачі, а в діапазоні середніх та великих навантажень — лінеаризована модель. Збільшення деталізації у разі використання розрахункової моделі другого та третього порядку зумовлює підвищення точності розрахунку. Разом з тим, застосування найточнішої моделі третього порядку вимагає залучення апарату комплексних чисел, що ускладнює її використання в режимі реального часу, наприклад, для визначення закону регулювання індуктивності КШР.

На рис. 4 показано сімейство кривих розподілу напруги вздовж траси лінії в діапазоні реактивних навантажень від 0,5 (ємн.) до 1,0 (інд.) зарядної потужності електропередачі за фіксації напруги наприкінці електропередачі на рівні номінальної та активного навантаження наприкінці лінії, що становить 0,25 натуральної потужності лінії. Зміна реактивної потужності навантаження обумовлює пересування екстремальної на напругою точки вздовж лінії електропередачі.

На рис. 5 подані діаграми похибки визначення координати екстремальної точки за напругою за ідеалізації електропередачі за виразом (1), для лінеаризованої моделі за виразом (4) та для моделей другого та третього порядку за виразами (5) та (6), відповідно.

Аналіз інформації, наведеної на діаграмі рис. 5, свідчить про те, що точність лінеаризованої моделі визначається в основному активним навантаженням, яке несе лінія. Водночас збільшення реактивного навантаження як у бік ємнісного, так і у бік індуктивного навантаження зумовлює невелике зменшення похибки моделювання. Лінеаризована розрахункова модель характеризується високою точністю в діапазоні малих навантажень реактивною потужністю. Похибка визначення екстремальної точки за напругою істотно збільшується за великих індуктивних навантажень електропередачі, більших за 60...65 % зарядної потужності

Відомо, що хвильові параметри повітряних ліній електропередачі визначаються, разом з втратами енергії під час коронного розряду, які носять кліматичний характер. Відповідно до [14] втрачають активної потужності на корону для типової конструкції повітряної лінії напругою 750 кВ становлять: за ясної погоди 4,6 кВт/км, під час снігу — 17,5 кВт/км, за дощової погоди — 65,0 кВт/км, у разі паморозі — 130 кВт/км. Це зумовлює їх зміну протягом експлуатації електропередачі відповідно до поточних погодних умов в районі траси лінії. Водночас, очевидно, змінюється і координата екстремальної точки з найбільшою робочою напругою.

В таблиці подана інформація про визначення екстремальної точки з максимальною напругою вздовж траси лінії за типових груп погоди та навантаження, що становить 0, 25, 50 та 75 % натуральної потужності електропередачі та похибка визначення екстремальної точки у разі нехтування втратами на корону.

**Похибка визначення координати екстремальної точки вздовж ДЕМ з урахуванням втрат енергії на корону**

$P_2^*$	$x_e$ , км	ясно		сніг		дощ		паморозь	
		$x_e$ , км	$\Delta_{x_e}$ , %	$x_e$ , км	$\Delta_{x_e}$ , %	$x_e$ , км	$\Delta_{x_e}$ , %	$x_e$ , км	$\Delta_{x_e}$ , %
0,00	183,65	183,63	0,01	183,56	0,02	183,32	0,09	182,99	0,18
0,25	169,61	169,56	0,01	169,43	0,05	168,92	0,19	168,24	0,38
0,50	149,49	149,39	0,03	149,11	0,10	148,07	0,39	146,60	0,80
0,75	97,71	97,39	0,09	96,49	0,34	93,07	1,28	88,09	2,65

Аналіз інформації, наведеної в таблиці, свідчить про допустимість нехтування втратами на корону для визначення координати екстремальної точки з максимальною напругою вздовж траси досліджуваної лінії. Це дозволяє спростити формулу (4) лінеаризованої моделі та визначити координату екстремальної точки за виразом

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

Так само спрощуються розрахункові моделі вищих порядків. Формально вигляд таких моделей залишається таким самим, як представлено у виразах (5) та (6), але на етапі визначення коефіцієнтів відповідних поліномів необхідно враховувати нульові значення погонних кондуктансів ліній електропередачі, що спрощує відповідні розрахункові моделі.

### Висновки

1. Надвелика зарядна потужність магістральних ліній електропередачі надвисокої номінальної напруги зумовлює виникнення ефекту Ферранті в режимах неробочого ходу за малих навантажень лінії електропередачі. Особливість ефекту Ферранті в дальніх електропередачах полягає у тому, що, зазвичай, зарядна потужність лінії розподіляється певним чином між підстанціями на початку та наприкінці електропередачі, зумовлюючи найбільшу напругу в проміжних точках лінії.

2. Визначення координати екстремальної точки за напругою вздовж траси лінії потребує розв'язання складного нелінійного рівняння, яке не має аналітичного розв'язку, що ускладнює розв'язання задачі налаштування пристроїв налагодження та компенсації параметрів електропередачі відповідно до поточного режиму лінії. Показано, що застосування моделі ідеалізованої електропередачі для визначення координати екстремальної точки забезпечує високу точність моделювання тільки в режимах малих навантажень електропередачі. Висока точність при цьому практично не залежить від реактивного навантаження, яке несе лінія та від довжини лінії електропередачі.

3. Запропоновано застосовувати лінеаризовані математичні моделі електропередачі, а також детальніші моделі другого та третього порядку для визначення координати екстремальної точки за напругою вздовж електропередачі.

Показано, що застосування моделі першого порядку забезпечує прийнятну похибку моделювання в широкому діапазоні навантажень лінії електропередачі, за виключенням режимів великих навантажень, коли екстремальна точка за напругою знаходиться поза межами ділянки і найбільша напруга спостерігається на початку або наприкінці лінії. Разом з тим, модель першого порядку виявилась чутливою до реактивного навантаження, що несе лінія, зі збільшенням якого в індуктивному або в ємнісному напрямі похибка моделювання істотно зростає.

Показано, що збільшення точності розрахунків можна досягти у разі застосування математичних моделей другого та третього порядку. Очевидно, що збільшення деталізації моделювання зумовлює



підвищення точності моделі, проте це ускладнює математичну модель, а застосування моделі третього порядку вимагає залучення апарату комплексних чисел для реалізації відповідних розрахунків.

4. Показано, що неврахування втрат активної потужності на корону практично не впливає на точність розрахунку координати екстремальної точки за напругою, що дозволяє спростити лінійну розрахункову модель та моделі другого та третього порядку.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Y. Hase, *Handbook of Power Systems Engineering with Power Electronics Applications*, 2nd Edition. John Wiley & Sons, Ltd, 2013. XXVIII, 768 p. <https://doi.org/10.1002/9781118443156>.
- [2] N. Petcharaks, Yu. Cunyi, and C. Panprommin, "A study of Ferranti and energization overvoltages case of 500 kV line in Thailand," in *1999 Eleventh International Symposium on High Voltage Engineering*, London, UK, 1999. <https://doi.org/10.1049/cp:19990564>.
- [3] В. М. Сулейманов, і Т. Л. Кацадзе, *Електричні мережі та системи*. Київ, Україна: НТУУ «КПІ», 2008, 456 p. ISBN 978-966-622-300-8.
- [4] Міненерговугілля України, *Правила улаштування електроустановок*, Харків, Україна: вид-во Форт, 2017.
- [5] Міністерство палива та енергетики України, ГKD 34.20.507-2003, *Технічна експлуатація електричних станцій і мереж. Правила*. [Електронний ресурс]. Режим доступу: [http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id\\_doc=86234](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=86234).
- [6] X. Zhang, C. Rehtanz, and B. Pal, *Flexible AC Transmission Systems: Modelling and Control*. Springer, 2012, 546 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-28241-6>.
- [7] Ю. І. Тугай, В. В. Кучанський, і І. Ю. Тугай, «Застосування керованих пристроїв компенсації зарядної потужності ЛЕП НВН в електричних мережах», *Технічна електродинаміка*, № 1, с. 53-56, 2021. <https://doi.org/10.15407/techned2021.01.053>
- [8] В. Г. Холмський, *Расчет и оптимизация режимов электрических сетей*. М.: Высшая школа, 1975, 280 с.
- [9] В. А. Веников, и Ю. П. Рыжов, *Дальние электропередачи переменного и постоянного тока*, учеб. пос. для вузов, Москва: Энергоатомиздат, 1985, 272 с.
- [10] Ю. П. Рыжов, *Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения*. Москва: Издательский дом МЭИ, 2007, 478 с. ISBN 978-5-383-00158-5.
- [11] Г. Н. Александров, *Передача электрической энергии*. С.Пб.: изд-во Политехнического ун-та, 2009, 412 с. ISBN 978-5-7422-2155-5.
- [12] X. Qin, et al., "Transmission-line theory based study on voltage distribution along the line and the disposition scheme of series capacitors of UHV transmission lines with series capacitors," in *2010 International Conference on Power System Technology*, Zhejiang, China, 2010. <https://doi.org/10.1109/POWERCON.2010.5666658>.
- [13] Т. Л. Кацадзе, Д. В. Настенко, О. М. Паненко, і О. М. Янковська, «Дослідження режиму напруги в дальніх електропередачах змінного струму», *Праці інституту електродинаміки*, вип. 59, с. 43-55, 2021. <https://doi.org/10.15407/publishing2021.59.043>.
- [14] Міністерство енергетики та вугільної промисловості України, СОУ-Н ЕЕ 40.1-37471933-82:2013, *Методичні рекомендації визначення технологічних витрат електричної енергії в трансформаторах і лініях електропередавання*, 2013. [Електронний ресурс]. Режим доступу: [http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id\\_doc=59948](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=59948).

Рекомендована кафедрою електричних станцій та систем ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 25.10.2021

**Кацадзе Теймураз Луарсабович** — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електричних мереж та систем, e-mail: teymuraz@ukr.net ;

**Баженов Володимир Андрійович** — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електричних мереж та систем;

**Паненко Олена Миколаївна** — асистент кафедри електричних мереж та систем;

**Янковська Олена Максимівна** — старший викладач кафедри електричних мереж та систем;

**Новіков Кирило Михайлович** — студент факультету електроенерготехніки та автоматики.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ

**T. L. Katsadze<sup>1</sup>**  
**V. A. Bazhenov<sup>1</sup>**  
**O. M. Panienco<sup>1</sup>**  
**O. M. Yankovska<sup>1</sup>**  
**K. M. Novikov<sup>1</sup>**

## Mathematical Model for Determination of Extreme Voltage Point in Long-Distance AC Power Transmission

<sup>1</sup>National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

The paper presents the results of the study of the voltage regime at intermediate points of the long-distance AC power line. Mathematical models of distribution of reactive power and voltage profile along the actual and idealized line are presented. A method and mathematical models for determining the coordinates of the extreme points of the flow section by

reactive power and voltage along the line route are proposed. It is proposed to use mathematical models of linearized power transmission, as well as more detailed models of the second and third order to determine the coordinates of the extreme point on the voltage along the power transmission. It is shown that the increase of accuracy of calculations can be reached in case of application of mathematical models of the second and third order. Increasing the detail of modeling causes an increase in the accuracy of the model, but is associated with an increase in the cumbersome of the mathematical model, and the application of the third-order model generally requires the involvement of complex numbers to implement appropriate calculations. The influence on the accuracy of calculation of the coordinate of the extreme point of the magnitude of the active and reactive load, as well as the loss of active power during the corona discharge is investigated. The possibility of application of the offered models in problems of regulation and adjustment of parameters of flexible power transmissions on the basis of lines of ultrahigh nominal voltage is shown. Thus, for typical designs of main power transmission systems of the UES of Ukraine, sufficient accuracy of calculations is provided by first- and second-order models, and only for ultra-long power transmission lines it is expedient to use a third-order mathematical model.

**Keywords:** long-distance AC power transmission, Ferranti effect, flexible power transmission, voltage distribution.

**Katsadze Teimuraz L.** — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of the Chair of Power Network and Systems, e-mail: teymuraz@ukr.net ;

**Bazhenov Volodymyr A.** — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of the Chair of Power Network and Systems;

**Panienko Olena M.** — Assistant of the Chair of Power Network and Systems;

**Yankovska Olena M.** — Senior Lecturer of the Chair of Power Network and Systems;

**Novikov Kyrylo M.** — Student of the Department of Electrical Engineering and Automation

**Т. Л. Кацадзе<sup>1</sup>**  
**В. А. Баженов<sup>1</sup>**  
**Е. Н. Паненко<sup>1</sup>**  
**Е. М. Янковская<sup>1</sup>**  
**К. М. Новиков<sup>1</sup>**

## Математическая модель определения экстремальной по напряжению точки в дальней линии электропередачи переменного тока

<sup>1</sup>Национальный технический университет Украины  
 «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

Представлены результаты исследования режима напряжения в промежуточных точках дальней линии электропередачи переменного тока. Представлены математические модели распределения реактивной мощности и профиля напряжений вдоль фактической и идеализированной линии. Предложен способ и математические модели определения координат экстремальных точек потокораздела по реактивной мощности и по напряжению вдоль трассы линии. Предложено применять математические модели линеаризованной электропередачи, а также более детальные модели второго и третьего порядка для определения координаты экстремальной точки по напряжению вдоль электропередачи. Показано, что увеличение точности расчетов может быть достигнуто в случае применения математических моделей второго и третьего порядка. Повышение детализации моделирования обуславливает увеличение точности модели, однако связано с возрастанием громоздкости математической модели, а применение третьего порядка вообще требует привлечения аппарата комплексных чисел для реализации соответствующих расчетов. Исследовано влияние на точность расчета координат экстремальной точки величины активной и реактивной нагрузки, а также потерь активной мощности во время коронного разряда. Показана возможность применения предложенных моделей в задачах регулирования и отладки параметров гибких электропередач на базе линий сверхвысокого номинального напряжения. Так, для типовых конструкций магистральных электропередач ОЭС Украины достаточную точность расчетов обеспечивают модели первого и второго порядка и только для электропередач сверхбольшой длины целесообразно использовать математическую модель третьего порядка.

**Ключевые слова:** дальняя линия электропередачи переменного тока, эффект Ферранти, гибкая электропередача, распределение напряжения.

**Кацадзе Теймураз Луарсабович** — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электрических сетей и систем, e-mail: teymuraz@ukr.net ;

**Баженов Владимир Андреевич** — канд. техн. наук, доцент кафедры электрических сетей и систем;

**Паненко Елена Николаевна** — ассистент кафедры электрических сетей и систем;

**Янковская Елена Максимовна** — старший преподаватель кафедры электрических сетей и систем;

**Новиков Кирилл Михайлович** — студент факультета электроэнерготехники и автоматизи