

УДК 621.311:621.315

ЗМЕНШЕННЯ ВТРАТ АКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В ГРОЗОЗАХИСНОМУ ТРОСІ ДВОКОЛОВОЇ ПОВІТРЯНОЇ ЛІНІЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ ШЛЯХОМ ЗМІНИ РОЗТАШУВАННЯ ЇЇ ФАЗ

А.В. Красножон¹, канд. техн. наук, І.В. Пентегов², докт. техн. наук, О.В. Красножон³, інж., З.О. Тимошенко⁴, інж.

1, 3 – Чернігівський національний технологічний університет,
вул. Шевченка, 95, Чернігів, 14035, Україна,

e-mail: krasnozhon08@gmail.com, o.krasnozhon@inel.stu.cn.ua,

2 – Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України,
вул. Боженка, 11, Київ, 03150, Україна,

e-mail: magn@i.com.ua,

4 – ПАТ «Чернігівобленерго»,

вул. Гонча, 40, Чернігів, 14000, Україна,

e-mail: zarya12345@gmail.com.

Запропоновано маловитратний метод зменшення втрат активної потужності в грозозахисних тросах двоколових повітряних ЛЕП традиційної конструкції, суть якого полягає у зміні просторового розташування фаз різних кіл двоколової ЛЕП. На прикладі двоколової ЛЕП напругою 330 кВ показано, що запропонований метод дає змогу досягти значного зменшення втрат у тросі та підвищення ефективності передачі електричної енергії. Розглянута проблема є актуальною як у разі спорудження нових повітряних ЛЕП, так і у разі модернізації існуючих. Бібл. 6, рис. 3.

Ключові слова: повітряна ЛЕП, грозозахисний трос, магнітна індукція, магнітний потік, наведений струм, втрати потужності.

Вступ. В Україні набирає обертів процес модернізації повітряних ЛЕП, у ході якого сталеві грозозахисні троси (ГЗТ), що захищають фазні провідники ЛЕП від прямих ударів блискавки, замінюють на ГЗТ з вбудованим оптоволоконним кабелем. Згідно з правилами улаштування електроустановок (ПУЕ) [1], такі ГЗТ з'єднують з кожною опорою ЛЕП, яка у свою чергу є заземленою. За такої умови в ГЗТ модернізованих ЛЕП будуть виникати певні втрати потужності, спричинені струмом, який постійно протікатиме по ГЗТ у нормальному режимі роботи ЛЕП. Причиною появи струму в ГЗТ є напруга, наведена на ГЗТ магнітним потоком, створеним фазними провідниками ЛЕП. У роботах [2, 3] показано, що ці втрати можуть бути значними, але розглядалися лише одноколові повітряні ЛЕП, разом з тим значний відсоток повітряних ЛЕП в Україні – це двоколові ЛЕП, втрати в ГЗТ яких є ще більшими.

Метою цієї статті є створення маловитратного методу зменшення втрат в ГЗТ двоколових повітряних ЛЕП.

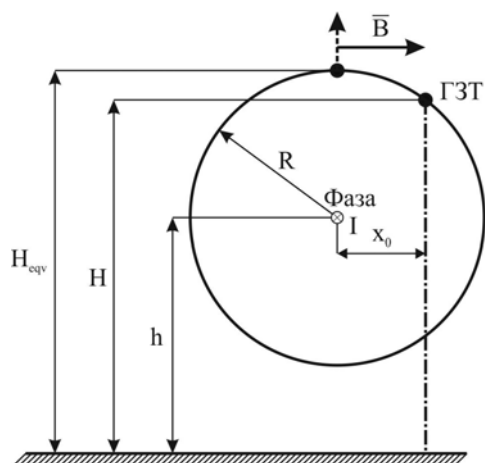


Рис. 1

Основні матеріали дослідження. Розрахунок втрат в ГЗТ повітряної ЛЕП необхідно розпочати зі знаходження зчепленого з ГЗТ магнітного потоку від кожної з фаз ЛЕП. На рис. 1 показано одну з фаз ЛЕП з деяким струмом I , ГЗТ, а також зчеплену з ГЗТ силову лінію магнітного поля фазного провідника ЛЕП. На рисунку також позначено висоту підвісу ГЗТ H , висоту підвісу фазного провідника h , радіус R зчепленої з ГЗТ силової лінії магнітного поля однієї фази ЛЕП, відстань H_{eqv} від землі до найвищої точки зчепленої з ГЗТ силової лінії, а також відстань x_0 між фазою та ГЗТ за горизонталлю.

Магнітну індукцію від струму фазного провідника ЛЕП знаходимо за формулою

$$B(r, h, I) = \frac{\mu_0 \cdot I}{2\pi} \cdot \frac{1}{r}, \quad (1)$$

де r – відстань від центра фазного провідника до точки, де розраховується індукція; I – діюче значення струму фази.

Слід зазначити, що для розрахунків застосовано циліндричну систему координат, початок якої співпадає з центром фазного провідника ЛЕП. Радіус зчепленої з ГЗТ силової лінії визначаємо з такої формули:

$$R(H, h, x_0) = \sqrt{(H - h)^2 + x_0^2}. \quad (2)$$

Зчеплений з ГЗТ магнітний потік від струму однієї фази ЛЕП доцільно визначати за шляхом, який розпочинається у найвищій точці зчепленої з ГЗТ силової лінії та спрямований перпендикулярно поверхні землі.

Очевидно, що цей магнітний потік знаходимо з виразу

$$\Phi_f(h, H, I, x_0) = I \cdot \int_{R(H, h, x_0)}^{\infty} B(r, h, I) \cdot dr, \quad (3)$$

де l – довжина ЛЕП.

Надалі розрахунок доцільно проводити символічним методом. Діюче значення зчепленого з ГЗТ сумарного магнітного потоку від фазних провідників першого кола ЛЕП знаходимо за формулою

$$\dot{\Phi}_1(I_1) = \Phi_f(h_1, H, x_{01}, I_1) \cdot e^{j \cdot 0} + \Phi_f(h_2, H, x_{02}, I_1) \cdot e^{-j \cdot \frac{2}{3} \cdot \pi} + \Phi_f(h_3, H, x_{03}, I_1) \cdot e^{j \cdot \frac{2}{3} \cdot \pi}, \quad (4)$$

де h_1, h_2, h_3 – висота підвішування фазних провідників першого кола ЛЕП (1...3); H – висота підвішування ГЗТ; x_{01}, x_{02}, x_{03} – відстані між фазами та ГЗТ за горизонталлю; I_1 – діюче значення струму фази першого кола ЛЕП.

У формулі (4) враховано зсув у часі між струмами фазних провідників ЛЕП. Аналогічно можна знайти зчеплений з ГЗТ магнітний потік від фазних провідників другого кола ЛЕП:

$$\dot{\Phi}_2(I_2) = \Phi_f(h_4, H, x_{04}, I_2) \cdot e^{j \cdot 0} + \Phi_f(h_5, H, x_{05}, I_2) \cdot e^{-j \cdot \frac{2}{3} \cdot \pi} + \Phi_f(h_6, H, x_{06}, I_2) \cdot e^{j \cdot \frac{2}{3} \cdot \pi}, \quad (5)$$

де h_4, h_5, h_6 – висота підвішування фазних провідників другого кола ЛЕП (4...6); x_{04}, x_{05}, x_{06} – відстані між фазами та ГЗТ за горизонталлю; I_2 – діюче значення струму фази другого кола ЛЕП.

Індуктивність ГЗТ знаходимо за формулою [4]

$$L_{ГЗТ} = \frac{l \cdot \mu_0}{2\pi} \cdot \left(\ln \left(\frac{2 \cdot (H + h_k)}{d} \right) + \frac{1}{4} \right), \quad (6)$$

де d – діаметр ГЗТ; h_k – глибина повернення струму ГЗТ в землі за Карсоном, яку зазвичай приймають рівною 1000 м.

Комплексне діюче значення зчепленого з ГЗТ сумарного магнітного потоку дорівнює

$$\dot{\Phi} \Sigma(I_1, I_2, I_{ГЗТ}, \psi) = \dot{\Phi}_1(I_1) + \dot{\Phi}_2(I_2) - L_{ГЗТ} \cdot I_{ГЗТ} \cdot e^{j \cdot \psi}, \quad (7)$$

де $I_{ГЗТ}$ – діюче значення струму у ГЗТ; ψ – початкова фаза струму ГЗТ.

У формулі (7) остання складова враховує магнітний потік від струму самого ГЗТ.

Знаючи магнітний потік, можемо розрахувати наведену на ГЗТ напругу:

$$\dot{U}_{ГЗТ}(I_1, I_2, I_{ГЗТ}, \psi) = j \cdot \omega \cdot \dot{\Phi} \Sigma(I_1, I_2, I_{ГЗТ}, \psi). \quad (8)$$

Повний комплексний опір ГЗТ дорівнює

$$Z_{ГЗТ} = R_{ГЗТ} + j \cdot X_{ГЗТ}, \quad (9)$$

де $R_{ГЗТ}, X_{ГЗТ}$ – активний та індуктивний опори ГЗТ відповідно.

Для знаходження струму ГЗТ застосуємо закон Ома:

$$I_{ГЗТ} \cdot e^{j \cdot \psi} = \frac{\dot{U}_{ГЗТ}(I_1, I_2, I_{ГЗТ}, \psi)}{Z_{ГЗТ}}. \quad (10)$$

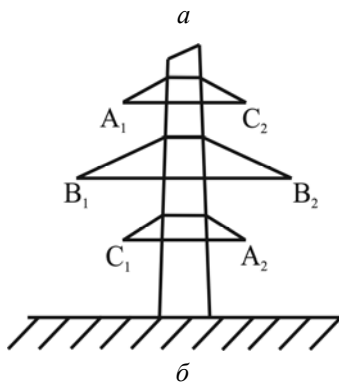
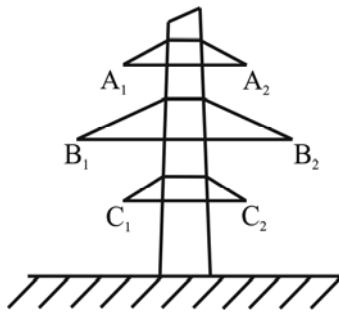


Рис. 2

Якщо розв'язати рівняння (10), то можна знайти діюче значення струму ГЗТ $I_{ГЗТ}$, яке буде залежати від діючих значень струмів фаз різних кіл ЛЕП та від взаємного розташування фаз на опорі двоколової ЛЕП.

Втрати потужності в ГЗТ двоколової ЛЕП знаходимо за формулою

$$P_{ГЗТ} = I_{ГЗТ}^2 \cdot R_{ГЗТ}. \quad (11)$$

Використовуючи формули (1)...(11) для ЛЕП напругою 330 кВ довжиною 300 км, яка виконана на опорах типу ПС330-6 з ГЗТ марки OPGW-49-A20SA при діючому значенні струмів фаз обох кіл ЛЕП $I_1 = I_2 = 800$ А, отримуємо втрати в ГЗТ 459,5 кВт при діючому значенні струму ГЗТ 30,7 А. Слід зазначити, що втрати є досить значними, а розрахунок було проведено для типового порядку розташування фаз двоколової ЛЕП, показаного на рис. 2 а.

У подальшому розташування фаз першого кола ЛЕП було незмінним, при цьому розраховано втрати для всіх можливих комбінацій розташування фаз другого кола ЛЕП. У результаті з'ясовано, що найменші втрати в ГЗТ 27,7 кВт у разі струму ГЗТ 7,5 А забезпечує розташування фаз, показане на рис. 2 б. Очевидно, що воно є найбільш енергоефективним з точки зору зменшення

втрат в ГЗТ. Також слід зазначити, що порівняно з традиційним розташуванням фаз, втрати стають у 16,5 разу меншими.

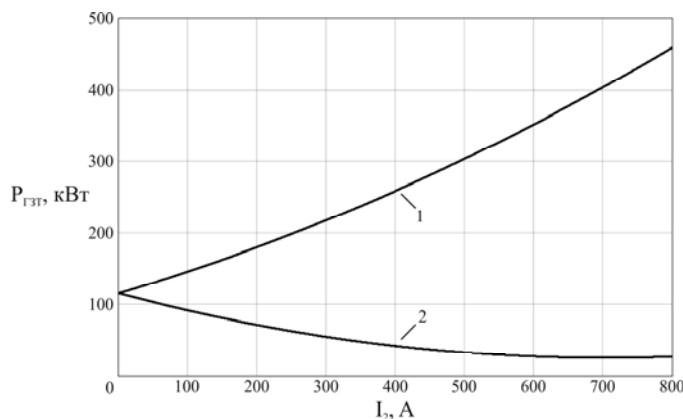


Рис. 3

На практиці струми фаз різних кіл ЛЕП рідко бувають однаковими, тому було проведено дослідження залежності втрат потужності в ГЗТ $P_{ГЗТ}$ від величини діючого значення струму фази другого кола ЛЕП I_2 у разі незмінного значення струму фази першого кола ЛЕП $I_1 = 800$ А. Результати такого дослідження показано на рис. 3. Крива 1 відповідає типовому розташуванню фаз обох кіл ЛЕП, а крива 2 – найбільш енергоефективному взаємному розташуванню фаз. Очевидно, що у разі будь-якого струму другого кола в

межах від 0 до I_1 варіант 2 забезпечує суттєво менші втрати в ГЗТ.

Запропонований метод зменшення втрат у ГЗТ не вимагає значних витрат на впровадження, оскільки для його практичної реалізації достатньо змінити розташування фаз другого кола на порталі підстанції, з якої виходить двоколова ЛЕП. Також слід зазначити, що найбільш енергоефективне розташування фаз забезпечує і значно менший рівень магнітного поля на висоті 1,8 м від поверхні землі [5], яке може впливати на людей та об'єкти, розташовані поблизу ЛЕП [6].

Висновки. Запропоновано маловитратний метод зменшення втрат потужності в ГЗТ двоколових повітряних ЛЕП та доведено його ефективність.

1. Правила улаштування електроустановок. Видання офіційне. Міненерговугілля України. Харків: Форт, 2017. 760 с.
2. Красножон А.В. Оцінювання втрат активної потужності в грозозахисному тросі повітряних ліній електропередавання. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2015. № 6(123). С. 52–56.
3. Красножон А.В., Буйний Р.О., Пентегов І.В. Розрахунок втрат активної потужності в грозозахисному тросі повітряних ліній електропередачі. *Технічна електродинаміка*. 2016. № 4. С. 23–25.

4. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники. Т.2 Москва-Ленинград: Энергия, 1967. 407 с.
5. Розов В.Ю., Реуцкий С.Ю., Пелевин Д.Е., Пилогина О.Ю. Магнитное поле линий электропередачи и методы его снижения до безопасного уровня. *Технічна електродинаміка*. 2013. № 2. С. 3–9.
6. Щерба А.А., Резинкина М.М. Электромагнитные поля и их воздействие на объекты. Киев: Наукова думка, 2009. 191 с.

УДК 621.311:621.315

А.В. Красножон¹, канд. техн. наук, **И.В. Пентегов**², докт. техн. наук, **А.В. Красножон**³, инж., **З.О. Тимошенко**⁴, инж.

1, 3 – Черниговский национальный технологический университет,

ул. Шевченко, 95, Чернигов, 14035, Украина,

2 – Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины,

ул. Боженко, 11, Киев, 03150, Украина,

4 – ПАО «Черниговоблэнерго»,

ул. Гончая, 40, Чернигов, 14000, Украина

УМЕНЬШЕНИЕ ПОТЕРЬ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ГРОЗОЗАЩИТНОМ ТРОСЕ ДВУХЦЕПНОЙ ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ПУТЁМ ИЗМЕНЕНИЯ РАСПОЛОЖЕНИЯ ЕЁ ФАЗ

Предложен малозатратный метод уменьшения потерь активной мощности в грозозащитных тросах двухцепных воздушных ЛЭП традиционной конструкции, суть которого заключается в изменении пространственного расположения фаз разных цепей двухцепной ЛЭП. На примере двухцепной ЛЭП напряжением 330 кВ показано, что предложенный метод позволяет достичь значительного уменьшения потерь в тросе и увеличения эффективности передачи электрической энергии. Рассмотренная проблема является актуальной как при построении новых воздушных ЛЭП, так и при модернизации существующих. Библи. 6, рис. 3.

Ключевые слова: воздушная ЛЭП, грозозащитный трос, магнитная индукция, магнитный поток, наведенный ток, потери мощности.

A.V. Krasnozhon¹, **I.V. Pentegov**², **O.V. Krasnozhon**³, **Z.O. Tymoshenko**⁴

1, 3 – Chernihiv National University of Technology,

str. Shevchenka, 95, Chernihiv, 14035, Ukraine,

2 – The E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine,

str. Bozhenka, 11, Kyiv, 03150, Ukraine,

4 – JSC «Chernihivoblenergo»,

str. Goncha, 40, Chernihiv, 14000, Ukraine

DECREASE OF ACTIVE POWER LOSSES IN THE GROUNDING WIRE OF DOUBLE-CIRCUIT OVERHEAD POWER LINE BY CHANGING THE LOCATION OF ITS PHASES

A low-cost method is proposed for reducing active power losses in grounding wires of double-circuit overhead power lines of traditional design, the essence of which is to change the spatial arrangement of the phases of different circuits of a double-circuit power line. Using the example of a double-circuit power line with a voltage of 330 kV, it is shown that the proposed method allows to achieve a significant reduction in losses in the wire and increase the efficiency of electric power transmission. The problem considered is topical, both in case of construction of new overhead power lines and in case of modernization of existing ones. References 6, figures 3.

Key words: overhead power line, grounding wire, magnetic induction, magnetic flux, induced current, power losses.

1. Rules of Electrical Installation Arrangement. Official edition. Mienergovugillya of Ukraine. Kharkiv: Fort, 2017. 760 p. (Ukr)
2. Krasnozhon A.V. Evaluation of active power losses in grounding wire of overhead power lines. *Visnyk Vinnytskogo politechnichnogo institutu*. 2015. № 6(123). P. 52–56. (Ukr)
3. Krasnozhon A.V., Buinyi R.O., Pentegov I.V. Calculation of active power losses in the grounding wire of overhead power lines. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2016. № 4. P. 23–25. (Ukr)
4. Neiman L.R., Demyrchian K.S. Theoretical Foundations of Electrical Engineering. Vol.2. Moskva-Leningrad: Energiia, 1967. 407 p. (Rus)
5. Rozov V.Yu., Reutskyi S.Yu., Pelevin D.Ye., Pyliugina O.Yu. The magnetic field of power transmission lines and methods of its mitigation to a safe level. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2013. № 2. P. 3–9. (Rus)
6. Scherba A.A., Rezinkina M.M. Electromagnetic fields and their effect on the objects. Kyiv: Naukova dumka, 2009. 191 p. (Rus)

Надійшла 02.03.2018

Received 02.03.2018