

А.В. Красножон, А.О. Квицинський, Р.О. Буйний, І.В. Діхтярук, О.В. Красножон

## Дослідження впливу параметрів сучасних грозозахисних тросів на величину втрат потужності в них для повітряних ліній електропередавання 330-750 кВ

Досліджено втрати електроенергії в грозозахисних системах повітряних ліній електропередавання напругою 330-750 кВ з грозозахисними тросами, що містять вбудований оптоволоконний кабель. Показано, що ці втрати є значними, залежать від взаємного розташування фаз та тросу, навантаження лінії за струмом та параметрів самого тросу (співвідношення його активного та реактивного опорів) і можуть становити від 1,6 кВт/км для ліній 750 кВ до сотень Вт/км для ліній 330 кВ. Визначено, що грозозахисні троси з погонним активним опором в діапазоні від 0,32  $\Omega/\text{km}$  до 1,5  $\Omega/\text{km}$  будуть мати втрати, близькі до максимальних. Вперше рекомендовано використовувати грозозахисні троси, які містять вбудований оптоволоконний кабель, з погонним активним опором не більше 0,25  $\Omega/\text{km}$ , що дозволить зменшити втрати потужності та підвищити енергоефективність повітряних ліній електропередавання 330-750 кВ. Бібл. 27, табл. 1, рис. 5.

**Ключові слова:** повітряна лінія електропередавання, грозозахисна система, грозозахисний трос, втрати електроенергії, погонний активний опір.

**Вступ.** В сучасному світі повітряні лінії електропередавання (ПЛ) все частіше обладнуються грозозахисними тросами (ГЗТ) з вбудованим оптоволоконним кабелем (троси типу ОКГТ). Такі троси не тільки захищають фази ПЛ від прямих ударів блискавки, але й одночасно мають вбудовані канали для передачі інформації. Процес оснащення ПЛ такими тросами триває і в Україні, в першу чергу це магістральні ПЛ класу напруги 220-400 кВ. Слід зазначити, що грозозахисна система ПЛ вищезазначених класів напруги найчастіше складається з двох ГЗТ.

Згідно з вимогами ПУЕ [1], ГЗТ типу ОКГТ мають бути приєднані до кожної опори ПЛ, які, в свою чергу, заземлені. При цьому в грозозахисній системі ПЛ у нормальному режимі роботи будуть мати місце додаткові втрати електричної енергії. Магнітне поле фазних проводів ПЛ утворює змінний магнітний потік, зчеплений з грозозахисною системою ПЛ. Цей потік призводить до появи у ГЗТ наведених струмів та, як наслідок, втрат енергії на нагрівання самих ГЗТ, які мають певний активний опір.

**Огляд публікацій.** У роботі [2] розглянутий підхід щодо розрахунку втрат потужності у грозозахисній системі ПЛ 330 кВ, яка має один ГЗТ та виконана на опорах марки ПС330-2 з вертикальним розташуванням фаз. Автори показують, що у разі застосування ГЗТ типу ОКГТ наведений струм у ГЗТ може призводити до значних втрат потужності. Проте, більшість ПЛ 330-750 кВ мають горизонтальне розміщення проводів та два ГЗТ. Слід зазначити, що найчастіше в ході модернізації зазначених ПЛ в Україні заміняють лише один з двох ГЗТ на ОКГТ: інший залишається поділеним на сегменти сталевим канатом, причому кожен з сегментів, відповідно до ПУЕ, заземлений в одній точці з метою унеможливлення протікання в такому ГЗТ наведеного струму.

Дослідження режимів роботи грозозахисних систем ПЛ високої і надвисокої напруги мають давню історію [3, 4]. Проте, нестаріючий інтерес до цих питань обумовлений як використанням нових матеріалів, так і розробкою нових типів опор ПЛ, зміною параметрів самих ГЗТ, зміною навантаження ПЛ тощо. Питання улаштування і режимів роботи грозоза-

хисних систем розглядаються у публікаціях [5-7]. Однак в них увага приділяється багатоголовим ПЛ з одним або двома грозозахисними тросами [5] та вертикальним розташуванням фаз. При цьому обирається оптимальне взаємне розташування фаз різних кіл такої ПЛ з метою зменшення втрат потужності в її грозозахисній системі.

ПЛ класів напруги 330-750 кВ, що зустрічаються на території нашої країни, мають горизонтальне розташування фаз та є здебільшого одноголовими. Характерною особливістю українських ПЛ є значні розміри опор та відстаней між фазами та ГЗТ, тому наведені у роботах [5-7] методи зменшення втрат потужності в грозозахисній системі не можуть бути застосовані для них.

Зменшенню втрат потужності в електричних мережах присвячено багато робіт, зокрема [8-13]. Проте, більшість цих робіт направлена на вирішення проблеми зменшення технологічних втрат електричної енергії у фазних провідниках електричної мережі та силових трансформаторах.

Питання зменшення втрат є також актуальними для кабельних ліній, де за схожим механізмом впливу відбувається наведення струмів в екранах одножильних кабелів (за наявності умов для їх протікання) [1, 14-17].

Аналіз нормативних документів щодо улаштування волоконно-оптичних ліній зв'язку (ВОЛЗ) на ПЛ показав, що під час вибору ОКГТ враховують їх механічну міцність та стійкість до струмів блискавки та короткого замикання і не беруть до уваги втрати потужності, які виникають в них в нормальному режимі роботи ПЛ [1]. Очевидно, що варто запропонувати додаткові критерії вибору ГЗТ з метою зменшення цих втрат.

**Метою статті** є пошук та обґрунтування критерію вибору ОКГТ для ПЛ напругою 330, 400, 500 та 750 кВ, який забезпечить зменшення втрат потужності в грозозахисних системах таких ПЛ.

**Основні матеріали дослідження.** Нижче наведено методику розрахунку та числові значення втрат потужності в грозозахисній системі ПЛ 330-750 кВ на прикладі опор марок ПП-750, ПП-500 та ПЗ30-9 (рис. 1).

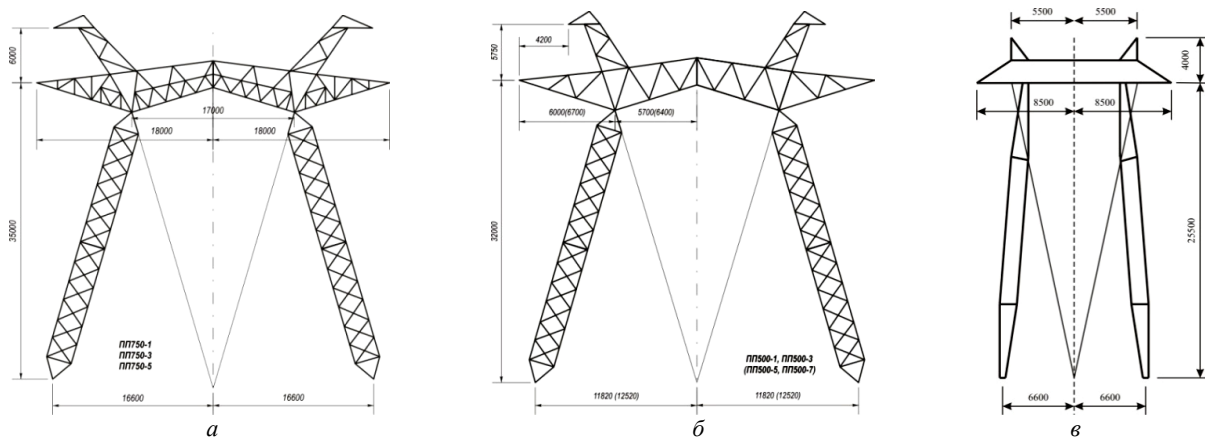


Рис. 1. Зовнішній вигляд та геометричні розміри опор високовольтних ПЛ: а) ПП-750; б) ПП-500; в) ПЗ30-9

Для ПЛ 750 kV, які збудовані на опорах типу ПП-750 (рис. 1,а) [18] будуть мати місце найбільші відстані між фазами та ГЗТ, що утворюють грозозахисну систему ПЛ. Такі ПЛ розраховані на транспортування до 2,25 GW потужності (струм у фазі приблизно дорівнює 1,7 kA), а навантаження ПЛ протягом доби, як правило, змінюється несуттєво. В Україні вказані ПЛ найчастіше мають навантаження до 1 GW (струм у фазі приблизно дорівнює 770 A). Все це означає, що саме в таких ПЛ можуть мати місце значні втрати в грозозахисній системі. Так, наприклад, максимальні річні втрати в одному ГЗТ ПЛ 750 kV за максимального навантаження 2000 MW і кількості годин використання максимуму навантаження у 6000 hours/year можуть сягати 50 000 kW·h/km [4].

З'ясуємо, для яких ГЗТ будуть мати місце найбільші втрати в грозозахисній системі ПЛ.

Струми, наведені в суміжних контурах із заземленого на кожній опорі ОКГТ, тіла опор та землі, стікають через опори ПЛ у протилежних напрямках і компенсують один одного у разі рівності довжин прогонів. Також слід зазначити, що опір одного прогону троса є значно меншим за опір заземлення однієї опори ПЛ. За таких умов струми з ОКГТ у землю стікають лише з кінцевих опор ПЛ, опір яких унормовано табл. 2.5.29 ПУЕ [1]. Контур для протікання цього струму має певний активний опір  $R_{GW}$  та індуктивний опір  $X_{GW}$ , які обумовлені параметрами ОКГТ (за умови, якщо опори заземлення кінцевих опор ПЛ є малими відносно  $R_{GW}$  та  $X_{GW}$  ОКГТ на довжині ПЛ).

Знаючи наведену напругу  $U_{GW}$ , можемо визначити наведений струм  $I_{GW}$  за формулою:

$$I_{GW} = \frac{U_{GW}}{\sqrt{R_{GW}^2 + X_{GW}^2}}. \quad (1)$$

Втрати активної потужності в грозозахисній системі можна визначити за формулою:

$$P_{GW} = I_{GW}^2 \cdot R_{GW} = U_{GW}^2 \cdot \frac{R_{GW}}{R_{GW}^2 + X_{GW}^2}. \quad (2)$$

Умова максимальних активних втрат може бути знайдена шляхом визначення екстремуму виразу (2):

$$\frac{dP_{GW}}{dR_{GW}} = U_{GW}^2 \cdot \frac{(R_{GW}^2 + X_{GW}^2) - 2 \cdot R_{GW}^2}{(R_{GW}^2 + X_{GW}^2)^2} = 0. \quad (3)$$

З (3) випливає, що умова максимальних активних втрат в ГЗТ має вигляд:

$$R_{GW} = X_{GW}. \quad (4)$$

Очевидно, що максимальні втрати потужності будуть дорівнювати:

$$P_{GW \max} = \frac{U_{GW}^2 \cdot X_{GW}}{X_{GW}^2 + X_{GW}^2} = U_{GW}^2 \cdot \frac{1}{2 \cdot X_{GW}}. \quad (5)$$

Визначимо величину приведених втрат у вигляді відношення  $P_{GW}$  до  $P_{GW \max}$ :

$$\frac{P_{GW}}{P_{GW \max}} = \frac{2 \cdot R_{GW} \cdot X_{GW}}{R_{GW}^2 + X_{GW}^2}. \quad (6)$$

Розділивши чисельник і знаменник виразу (6) на квадрат реактивного опору можна отримати величину приведених втрат в грозозахисній системі як функцію відношення її активного та реактивного опорів:

$$\frac{P_{GW}}{P_{GW \max}} = f\left(\frac{R_{GW}}{X_{GW}}\right) = \frac{2 \cdot \frac{R_{GW}}{X_{GW}}}{1 + \left(\frac{R_{GW}}{X_{GW}}\right)^2}. \quad (7)$$

Побудовану за виразом (7) залежність наведено на рис. 2.

Очевидно, що з метою уникнення максимальних втрат в грозозахисній системі слід обирати такі ОКГТ, для яких співвідношення  $R_{GW}/X_{GW}$  буде або менше 1, або ж більше одиниці. Так на рис. 2 видно, що за умови вибору ОКГТ, для яких  $R_{GW}/X_{GW} = 0,5$  або 2 p.u., маємо величину питомих втрат 0,8 p.u., що означає зниження втрат відносно максимальних всього на 20%. За умови, якщо  $R_{GW}/X_{GW} \leq 0,4$  або ж  $R_{GW}/X_{GW} \geq 2,5$ , маємо зниження втрат в грозозахисній системі більше, ніж на 30% у будь-якому режимі роботи ПЛ. Очевидно, що саме таким критерієм співвідношення  $R_{GW}/X_{GW}$  і варто керуватись при виборі ОКГТ для ПЛ. При цьому також слід брати до уваги і економічні міркування, адже троси з малим співвідношенням активного та реактивного опорів мають більший діаметр та масу на кілометр довжини, а також і більшу ціну, але при цьому будуть забезпечувати кращий рівень грозозахисту та мати більшу стійкість до струмів блискавки і короткого замикання (КЗ).

Слід зазначити, що вищезазначені міркування справедливі для випадку, коли опір ОКГТ на довжині

всієї ПЛ значно більший, ніж опори заземлювачів кінцевих опор ПЛ, що фактично виконується для ПЛ значної довжини (у випадку коротких ПЛ вищезазначені опори заземлювачів слід враховувати).

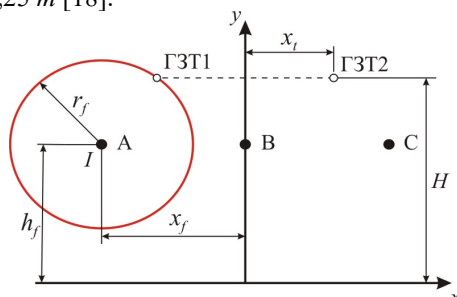


Рис. 2. Залежність приведених втрат активної потужності у грозозахисному тросі ПЛ від співвідношення його активного та реактивного опорів

Розрахуємо втрати активної потужності в грозозахисній системі ПЛ за умови використання різних марок ОКГТ. Взаємне розташування фазних провідників ПЛ та грозозахисних тросів з усіма необхідними відстанями показано на рис. 3.

На рис. 3 показано відстань  $r_f$  між фазою та ГЗТ1, а також інші відстані, необхідні для розрахунку. У випадках, коли ПЛ побудовані на опорах типу:

- ПП-750 (рис. 1,а) –  $x_f = 18 \text{ m}$ ,  $x_t = 16,75 \text{ m}$ ,  $h_f = 15,9 \text{ m}$ ,  $H = 27,75 \text{ m}$ ;
- ПП-500 (рис. 1,б) –  $x_f = 11,7 \text{ m}$ ,  $x_t = 7,5 \text{ m}$ ,  $h_f = 17 \text{ m}$ ,  $H = 26,5 \text{ m}$ ;
- П330-9 (рис. 1,в):  $x_f = 8,5 \text{ m}$ ,  $x_t = 5,5 \text{ m}$ ,  $h_f = 13,8 \text{ m}$ ,  $H = 20,25 \text{ m}$  [18].



$h_f$  – висота розташування фазних провідників;  
 $H$  – висота розташування ГЗТ;  
 $x_f$  – відстань від вертикальної осі симетрії опори до фаз;  
 $x_t$  – відповідна відстань до ГЗТ

Рис. 3. Геометрична модель ПЛ для розрахунку

Будемо вважати, що на рис. 3 ГЗТ1 типу ОКГТ, в якому слід визначити втрати потужності. У якості

ГЗТ2 передбачається сталевий канат, який поділено на односторонньо заземлені сегменти.

Варто також зазначити, що протікання струму  $I$  у фазі ПЛ буде призводити до утворення електромагнітного поля навколо провідника та, у випадку проходження ПЛ вздовж житлової забудови, створювати шкідливу дію на організм людини [19-23].

На рис. 3 видно, що відстань між фазою ПЛ та ОКГТ можна розрахувати за формулою:

$$r_f = \sqrt{(x_f - x_t)^2 + (H - h_f)^2} \quad (8)$$

Глибину протікання струму в землі та погонну напругу, у  $V/km$ , наведену на ГЗТ1 типу ОКГТ від струму однієї фази ПЛ, можна визначити згідно з [4, 24] як:

$$D_{gr} = \frac{2,1}{\sqrt{f \cdot \gamma \cdot 10^{-5}}}; \quad (9)$$

$$U_{GW1P} = 0,1447 \cdot I \cdot \lg(D_{gr}/r_f), \quad (10)$$

де  $f$  – частота струму;  $\gamma$  – питома електрична провідність ґрунту (приймається рівною  $0,01 \text{ S/m}$ );  $I$  – діюче значення струму однієї фази ПЛ.

Наведена на ОКГТ погонна напруга від всіх фаз ПЛ буде визначатися як:

$$\dot{U}_{GW1} = U_{GW1A} \cdot e^{j \cdot 0} + U_{GW1B} \cdot e^{-j \cdot \frac{2 \cdot \pi}{3}} + U_{GW1C} \cdot e^{j \cdot \frac{2 \cdot \pi}{3}} \quad (11)$$

Активний та реактивний опори одного кілометра ОКГТ з урахуванням струму в землі дорівнюють [4]:

$$R_{GW} = R_p + 0,05; \quad (12)$$

$$X_{GW} = 0,1447 \cdot \lg\left(\frac{D_{gr}}{d/2}\right), \quad (13)$$

де  $R_p$  – погонний активний опір ОКГТ певної марки;  $d$  – його діаметр.

Наведений у грозозахисній системі струм розраховують за (1). За відомим діючим значенням цього струму можна знайти втрати в грозозахисній системі ПЛ за (2).

Паспортні параметри ОКГТ різних марок, а також розраховані погонні активний та реактивний опори грозозахисних систем ПЛ 330, 500 та 750  $kV$  та їх співвідношення наведені в табл. 1 [25]. Як видно в табл. 1, активний опір грозозахисної системи дуже сильно залежить від обраної марки ОКГТ, при цьому реактивний опір змінюється значно менше. Тому при виборі марки ГЗТ потрібно орієнтуватись, в першу чергу, на його погонний активний опір.

Таблиця 1

Параметри ОКГТ для ПЛ 330-750  $kV$

Марка ГЗТ	Параметри ОКГТ		Погонний активний та реактивний опори ОКГТ ПЛ напругою 330-750 $kV$		$R_{GW} / X_{GW}, p.u.$ для ПЛ напругою 330-750 $kV$
	$d, mm$	$R_p, \Omega/km$	$R_{GW}, \Omega/km$	$X_{GW}, \Omega/km$	
OPGW 426-AL1/56-A20SA	28,8	0,065	0,115	0,697	0,165
OPGW 264-AL3/29-A20SA	22,5	0,12	0,17	0,712	0,239
OPGW 34-AL3/34-A20SA	11,4	0,681	0,731	0,755	0,969
OPGW 11-AL3/15-A20SA	7,3	1,856	1,906	0,783	2,435
OPGW 27-A20SA	7,3	3,022	3,072	0,783	3,925

За (1), (2), (8) – (13) для всіх тросів, зазначених у табл. 1, побудовано залежності питомих втрат активної потужності в грозозахисній системі від струму у фазі ПЛ, наведені на рис. 4.

Легко бачити, що трос типу OPGW 34-AL3/34-A20SA (крива 3 на рис. 4) забезпечує значно більший рівень втрат, ніж ОКГТ інших марок. За умов діючого значення струму фази ПЛ 750  $kV$  у 770  $A$  при вико-

ристанні тросу OPGW 34-AL3/34-A20SA втрати потужності у грозозахисній системі ПЛ 750 кВ становитимуть біля  $1,472 \text{ kW/km}$  (див. рис. 4,а). При довжині ПЛ 500 *km* втрати активної потужності на всій довжині ГЗТ становитимуть  $0,736 \text{ MW}$ . Вартість таких втрат за рік за умови роботи ПЛ з незмінним навантаженням при існуючому тарифі на передачу електроенергії магістральними мережами ( $397,85 \text{ UAH}$  за  $\text{MW}\cdot\text{h}$ . станом на грудень 2022 року) буде становити  $2,565 \text{ millions UAH/year}$ . Очевидно, що використання

тросів інших марок дозволить суттєво економити електроенергію, особливо, якщо прийняти до уваги нормативний термін експлуатації ПЛ, який за чинним законодавством складає 40 років, а також і той факт, що ціни на електроенергію постійно зростають. Так, наприклад, для тросу марки OPGW 426-AL1/56-A20SA при тій же величині струму втрати потужності складають  $0,513 \text{ kW/km}$ , при цьому вартість таких втрат протягом року становитиме  $0,893 \text{ millions UAH/year}$ .

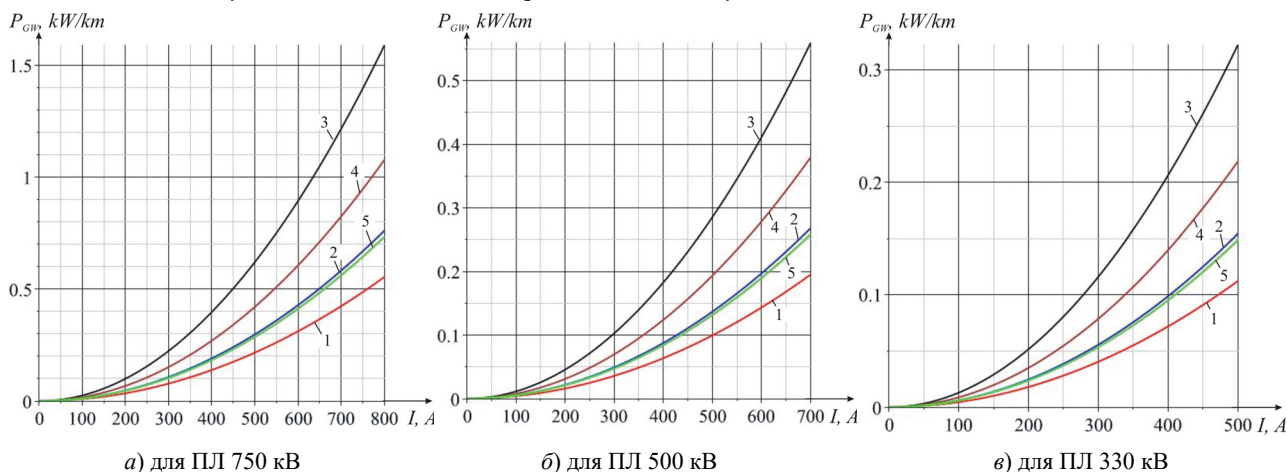


Рис. 4. Залежності втрат потужності в грозозахисній системі ПЛ 330-750 кВ від струму фази для різних марок ГЗТ:  
1 – OPGW 426-AL1/56-A20SA; 2 – OPGW 264-AL3/29-A20SA; 3 – OPGW 34-AL3/34-A20SA;  
4 – OPGW 11-AL3/15-A20SA; 5 – OPGW 27-A20SA

На рис. 4,б видно, що втрати потужності в грозозахисній системі ПЛ 500 *kV* можуть становити сотні Вт на 1 км її довжини. Такі втрати теж є значними, особливо з огляду на сумарну протяжність ПЛ (за струму у 500 *A* втрати у грозозахисній системі ПЛ з тросом марки OPGW 34-AL3/34-A20SA можуть сягати  $0,285 \text{ kW/km}$ ). Правильний вибір марки ГЗТ дозволяє зменшити величину, а, значить, і вартість таких втрат в декілька разів.

Інтерес щодо величини втрат в грозозахисній системі також становлять ПЛ класу напруги 330 *kV*. Такі ПЛ також працюють тривалий час зі значним навантаженням за струмом. На рис. 4,в видно, що використання певних марок ОКГТ дозволяє знизити втрати до величини десятків Вт на км довжини ПЛ 330 *kV* (за струму у 300 *A* втрати у грозозахисній системі ПЛ з тросом марки OPGW 34-AL3/34-A20SA можуть сягати  $116 \text{ W/km}$ , а з тросом OPGW 426-AL1/56-A20SA – всього  $40,5 \text{ W/km}$ ).

Слід також зазначити, що при зміні марки ОКГТ реактивний опір грозозахисної системи змінюється значно менше, ніж активний опір (див. табл. 1), тому саме величина погонного активного опору ОКГТ має бути критерієм вибору задля мінімізації втрат потужності та електричної енергії.

Аналіз кривих на рис. 4 свідчить про те, що трояк з малим, так і з великим погонним активним опором на ПЛ 330-750 *kV* дозволяють отримати суттєве зменшення втрат потужності в грозозахисній системі, але при цьому ОКГТ зі значним погонним активним опором мають менший діаметр, меншу міцність та термічну стійкість до струмів блискавки та КЗ [26, 27].

За даними табл. 1 побудовано залежності співвідношення активного та реактивного опорів грозозахисної системи  $R_{GW}/X_{GW}$  від погонного активного опору ГЗТ  $R_p$  (рис. 5).

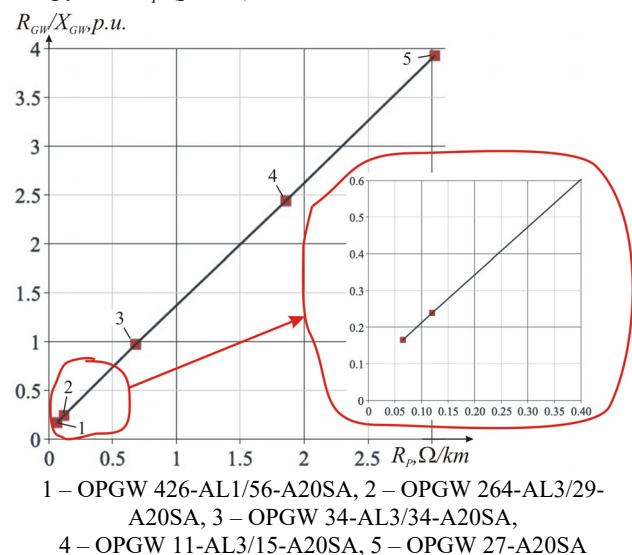


Рис. 5. Залежності співвідношення  $R_{GW}/X_{GW}$  від погонного активного опору ОКГТ  $R_p$  для грозозахисних систем ПЛ 330-750 *kV*  
1 – OPGW 426-AL1/56-A20SA, 2 – OPGW 264-AL3/29-A20SA, 3 – OPGW 34-AL3/34-A20SA,  
4 – OPGW 11-AL3/15-A20SA, 5 – OPGW 27-A20SA

На рис. 5 видно, що при використанні ОКГТ з погонним активним опором  $0,25 \text{ Ohm/km}$  маємо величину  $R_{GW}/X_{GW}$  приблизно рівною  $0,4 \text{ p.u.}$ , що згідно з кривою на рис. 2 забезпечує зниження втрат на 30 % від їх максимально можливого значення. При виборі ГЗТ з меншими значеннями погонного активного опору втрати в грозозахисній системі ПЛ 330-750 *kV*

будуть ще меншими. Таким чином, при виборі ГЗТ типу ОКГТ для розглянутих ПЛ варто обирати троси з погонним активним опором не більше, ніж  $0,25 \Omega/km$ . Зменшення втрат можна також досягти, обираючи троси з погонним активним опором, більшим за  $1,85 \Omega/km$ , що відповідає  $R_{GW}/X_{GW}$  не менше, ніж  $2,45 p.u.$ , що також забезпечує зниження втрат на  $30\%$  і більше. Однак, такі троси мають менший переріз, меншу механічну міцність і термічну стійкість до струмів блискавки та КЗ, тому їх обирати не рекомендується.

Також слід зазначити, що ГЗТ з погонним активним опором в межах від  $0,32 \Omega/km$  до  $1,5 \Omega/km$  краще не обирати взагалі, бо саме для них відношення  $R_{GW}/X_{GW}$  змінюється в межах від  $0,5$  до  $2 p.u.$ , що у відповідності до рис. 3 буде забезпечувати втрати в грозозахисній системі в межах  $80-100\%$  від максимально можливих.

**Висновки.** Показано, що величина питомих втрат потужності в грозозахисних системах ПЛ  $330-750 kV$  в нормальних режимах їх роботи може становити від  $1,6 kW/km$  для ПЛ  $750 kV$  до сотень  $W/km$  для ПЛ  $330 kV$  і суттєво залежить від взаємного розташування проводів фаз і ОКГТ, струму навантаження ПЛ та характеристик ОКГТ.

Визначено, що грозозахисні троси з погонним активним опором в діапазоні від  $0,32 \Omega/km$  до  $1,5 \Omega/km$  будуть мати втрати, близькі до максимальних, тому їх слід уникати. Менші втрати будуть у разі застосування ОКГТ з погонним активним опором, меншим за  $0,25 \Omega/km$  (як правило – значної вартості), або більшим за  $1,85 \Omega/km$  (зазвичай – недостатньої механічної міцності та термічної стійкості до струмів блискавки та КЗ).

Вперше рекомендовано використовувати ОКГТ з погонним активним опором не більше  $0,25 \Omega/km$ , що дозволить мінімізувати втрати потужності та підвищити енергоефективність ПЛ  $330-750 kV$  на етапі їх проектування.

**Конфлікт інтересів.** Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Правила улаштування електроустановок. Харків: Видавництво «Форт», 2017. 760 с.
2. 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. doi: <https://doi.org/10.15407/techned2016.04.023>.
3. Мельников Н.А., Рокотян С.С., Шеренцис А.Н. Проектирование электрической части воздушных линий электропередачи 330-500 кВ. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: «Энергия», 1974. 472 с.
4. Брацлавский С.Х., Гершенгорн А.И., Лосев С.Б. Специальные расчеты электропередач сверхвысокого напряжения. М.: Энергоатомиздат, 1985. 312 с.
5. Hui Wang, Luyang Wang, Yufei Wang, Hua Xue, Changhui Yang, Tianyou Yan. The electric energy loss in overhead ground wires of 110kV six-circuit transmission line on the same tower. *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies*, 2012, pp. 1-5. doi: <https://doi.org/10.1109/ISGT-Asia.2012.6303319>.
6. Ning Zhou, Zhan Shu, Yongchun Su, Bo Chen, Zheng Cheng. Research on the selection method of phase sequence arrangement of double-circuit transmission lines on the same tower. *2016 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, 2016, pp. 2592-2596. doi: <https://doi.org/10.1109/APPEEC.2016.7779958>.

7. Taoning Jiang, Liang Xu, Peng Bian, Jia Jia, Dongsheng Kang, Chengqiu Sun, Jun Li. Effects of phase sequences and conductor transposition modes on the characteristics power loss of ground wire. *Electric Power Construction*, 2011, vol. 31, pp. 41-44.
8. Atteya I.I., Ashour H., Fahmi N., Strickland D. Radial distribution network reconfiguration for power losses reduction using a modified particle swarm optimisation. *CIREC - Open Access Proceedings Journal*, 2017, vol. 2017, no. 1, pp. 2505-2508. doi: <https://doi.org/10.1049/oap-cired.2017.1286>.
9. Lazzeroni P., Repetto M. Optimal planning of battery systems for power losses reduction in distribution grids. *Electric Power Systems Research*, 2019, vol. 167, pp. 94-112. doi: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2018.10.027>.
10. Kalantari Khandani M., Askarzadeh A. Optimal MV/LV transformer allocation in distribution network for power losses reduction and cost minimization: A new multi-objective framework. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2020, vol. 30, no. 6, art. no. e12361. doi: <https://doi.org/10.1002/2050-7038.12361>.
11. Blinov I., Zaitsev I.O., Kuchansky V.V. Problems, Methods and Means of Monitoring Power Losses in Overhead Transmission Lines. *Studies in Systems, Decision and Control*, 2020, vol. 298, pp. 123-136. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-48583-2\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-030-48583-2_8).
12. Буйний Р.О., Красножон А.В., Зорін В.В., Квицинський А.О. Обґрунтування області використання класу напруги 20 кВ у міських електричних мережах України. *Технічна електродинаміка*, 2019, № 1, С. 68-71. doi: <https://doi.org/10.15407/techned2019.01.068>.
13. Bezruchko V., Buinyi R., Bodunov V., Krasnozhon A., Miroshnyk O. Choosing the Cross-section of Cable Core for Wind Power Electrical Collector Network taking into account the economic factor. *2022 IEEE 8th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*, 2022, pp. 59-62. doi: <https://doi.org/10.1109/ESS57819.2022.9969259>.
14. Grinchenko V.S., Tkachenko A.O., Grinchenko N.V. Improving calculation accuracy of currents in cable shields at double-sided grounding of three-phase cable line. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2017, no. 2, pp. 39-42. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2017.2.06>.
15. Al Issa H.A., Qawaqzeh M., Khasawneh A., Buinyi R., Bezruchko V., Miroshnyk O. Correct Cross-Section of Cable Screen in a Medium Voltage Collector Network with Isolated Neutral of a Wind Power Plant. *Energies*, 2021, vol. 14, no. 11, art. no. 3026. doi: <https://doi.org/10.3390/en14113026>.
16. IEEE Guide for Bonding Shields and Sheaths of Single-Conductor Power Cables Rated 5 kV through 500 kV. *IEEE Std 575-2014 (Revision of IEEE Std 575-1988)*, 2014. 83 p. doi: <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2014.6905681>.
17. Li L., Yang Z., Luo Z., Liu K. Transient Disturbances Based Non-Intrusive Ageing Condition Assessment for Cross-Bonded Cables. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 176651-176660. doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3026650>.
18. Макаров Е.Ф. *Справочник по электрическим сетям 0,4-35 кВ и 110-1150 кВ В 4-х т. Т.2*. М.: Папирус Про, 2003. 640 с.
19. Krasnozhon A.V., Buinyi R.O., Dihtyaruk I.V., Kvytsynskiy A.O. The investigation of distribution of the magnetic flux density of operating two-circuit power line 110 kV «СНТНП-Чернигів-330» in the residential area and methods of its decreasing to a safe level. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2020, no. 6, pp. 55-62. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2020.6.08>.
20. Geri A., Locatelli A., Veca G.M. Magnetic fields generated by power lines. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1995, vol. 31, no. 3, pp. 1508-1511. doi: <https://doi.org/10.1109/20.376316>.
21. Розов В.Ю., Реуцкий С.Ю., Пелевин Д.Е., Яковенко В.Н. Исследование магнитного поля высоковольтных линий электропередачи переменного тока. *Технічна електродинаміка*, 2012, № 1, С. 3-9.

22. Розов В.Ю., Гринченко В.С., Пелевин Д.Е., Чунихин К.В. Моделирование электромагнитного поля в помещениях жилых домов, расположенных вблизи линий электропередачи. *Технічна електродинаміка*, 2016, № 3, С. 6-8. doi: <https://doi.org/10.15407/techned2016.03.006>.

23. Grinchenko V.S., Chunikhin K.V. Magnetic field normalization in residential building located near overhead line by grid shield. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2020, no. 5, pp. 38-43. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2020.5.06>.

24. Kim I. A New Single-Logarithmic Approximation of Carson's Ground-Return Impedances – Part 1. *IEEE Access*, 2021, vol. 9, pp. 103850-103861. doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3097377>.

25. *Оптический кабель в грозозащитном тросе*. М.: НКТ Кейблс, 2014. 16 с.

26. *ГКД 34.48.151-2003 Проектування, будівництво та експлуатація волоконно-оптичних ліній зв'язку по повітряних лініях електропередавання. Інструкція*.

27. *СТО 56947007-33.180.10.173-2014 Методические указания по расчету термического воздействия токов короткого замыкания и термической устойчивости грозозащитных тросов и оптических кабелей*.

#### REFERENCES

1. *Electrical installation regulations*. Kharkiv, Fort Publ., 2017. 760 p. (Ukr).
2. Krasnozhan A.V., Buinyi R.O., Pentegov I.V. Calculation of active power losses in the grounding wire of overhead power lines. *Technical Electrodynamics*, 2016, no. 4, pp. 23-25. (Ukr). doi: <https://doi.org/10.15407/techned2016.04.023>.
3. Melnykov N.A., Rokotian S.S., Sherentsys A.N. *Design of the electrical part of overhead power lines 330-500 kV*. Moscow, Enerhyia Publ., 1974. 472 p. (Rus).
4. Bratslavskiy S.H., Hershennhorn A.Y., Losev S.B. *Special calculations of extra-high voltage power transmission*. Moscow, Enerhoatomizdat Publ., 1985. 312 p. (Rus).
5. Hui Wang, Luyang Wang, Yufei Wang, Hua Xue, Changhui Yang, Tianyou Yan. The electric energy loss in overhead ground wires of 110kV six-circuit transmission line on the same tower. *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies*, 2012, pp. 1-5. doi: <https://doi.org/10.1109/ISGT-Asia.2012.6303319>.
6. Ning Zhou, Zhan Shu, Yongchun Su, Bo Chen, Zheng Cheng. Research on the selection method of phase sequence arrangement of double-circuit transmission lines on the same tower. *2016 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, 2016, pp. 2592-2596. doi: <https://doi.org/10.1109/APPEEC.2016.7779958>.
7. Taoning Jiang, Liang Xu, Peng Bian, Jia Jia, Dongsheng Kang, Chengqiu Sun, Jun Li. Effects of phase sequences and conductor transposition modes on the characteristics power loss of ground wire. *Electric Power Construction*, 2011, vol. 31, pp. 41-44.
8. Atteya I.I., Ashour H., Fahmi N., Strickland D. Radial distribution network reconfiguration for power losses reduction using a modified particle swarm optimisation. *CIGRE - Open Access Proceedings Journal*, 2017, vol. 2017, no. 1, pp. 2505-2508. doi: <https://doi.org/10.1049/oap-cired.2017.1286>.
9. Lazzeroni P., Repetto M. Optimal planning of battery systems for power losses reduction in distribution grids. *Electric Power Systems Research*, 2019, vol. 167, pp. 94-112. doi: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2018.10.027>.
10. Kalantari Khandani M., Askarzadeh A. Optimal MV/LV transformer allocation in distribution network for power losses reduction and cost minimization: A new multi-objective framework. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2020, vol. 30, no. 6, art. no. e12361. doi: <https://doi.org/10.1002/2050-7038.12361>.
11. Blinov I., Zaitsev I.O., Kuchanskyy V.V. Problems, Methods and Means of Monitoring Power Losses in Overhead Transmission Lines. *Studies in Systems, Decision and Control*, 2020, vol. 298, pp. 123-136. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-48583-2\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-030-48583-2_8).
12. Buinyi R.O., Krasnozhan A.V., Zorin V.V., Kvytsynskiy A.O. Justification for use of voltage class 20 kV in urban electrical networks. *Technical Electrodynamics*, 2019, no. 1, pp. 68-71. (Ukr). doi: <https://doi.org/10.15407/techned2019.01.068>.
13. Bezruchko V., Buinyi R., Bodunov V., Krasnozhan A., Miroshnyk O. Choosing the Cross-section of Cable Core for Wind Power Electrical Collector Network taking into account the economic factor. *2022 IEEE 8th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*, 2022, pp. 59-62. doi: <https://doi.org/10.1109/ESS57819.2022.9969259>.
14. Grinchenko V.S., Tkachenko A.O., Grinchenko N.V. Improving calculation accuracy of currents in cable shields at double-sided grounding of three-phase cable line. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2017, no. 2, pp. 39-42. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2017.2.06>.
15. Al Issa H.A., Qawaqzeh M., Khasawneh A., Buinyi R., Bezruchko V., Miroshnyk O. Correct Cross-Section of Cable Screen in a Medium Voltage Collector Network with Isolated Neutral of a Wind Power Plant. *Energies*, 2021, vol. 14, no. 11, art. no. 3026. doi: <https://doi.org/10.3390/en14113026>.
16. IEEE Guide for Bonding Shields and Sheaths of Single-Conductor Power Cables Rated 5 kV through 500 kV. *IEEE Std 575-2014 (Revision of IEEE Std 575-1988)*, 2014. 83 p. doi: <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2014.6905681>.
17. Li L., Yang Z., Luo Z., Liu K. Transient Disturbances Based Non-Intrusive Ageing Condition Assessment for Cross-Bonded Cables. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 176651-176660. doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3026650>.
18. Makarov Ye.F. *Reference book on electrical networks 0.4-35 kV and 110-1150 kV. In 4 vols. Vol. 2*. Moscow, Papirus Pro Publ., 2003.640 p. (Rus).
19. Krasnozhan A.V., Buinyi R.O., Dihtyaruk I.V., Kvytsynskiy A.O. The investigation of distribution of the magnetic flux density of operating two-circuit power line 110 kV «CHTPP-Chernihiv-330» in the residential area and methods of its decreasing to a safe level. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2020, no. 6, pp. 55-62. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2020.6.08>.
20. Geri A., Locatelli A., Veca G.M. Magnetic fields generated by power lines. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1995, vol. 31, no. 3, pp. 1508-1511. doi: <https://doi.org/10.1109/20.376316>.
21. Rozov V.Yu., Reutskiy S.Yu., Pelevin D.Ye., Yakovenko V.N. The research of magnetic field of high-voltage AC transmissions lines. *Technical Electrodynamics*, 2012, no. 1, pp. 3-9. (Rus).
22. Rozov V.Y., Grinchenko V.S., Pelevin D.Y., Chunikhin K.V. Simulation of electromagnetic field in residential buildings located near overhead lines. *Technical Electrodynamics*, 2016, no. 3, pp. 6-8. doi: <https://doi.org/10.15407/techned2016.03.006>.
23. Grinchenko V.S., Chunikhin K.V. Magnetic field normalization in residential building located near overhead line by grid shield. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2020, no. 5, pp. 38-43. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2020.5.06>.
24. Kim I. A New Single-Logarithmic Approximation of Carson's Ground-Return Impedances – Part 1. *IEEE Access*, 2021, vol. 9, pp. 103850-103861. doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3097377>.
25. *Optical cable in lightning wire*. Moscow, NKT Keibls Publ., 2014. 16 p. (Rus).
26. *State Standard HKD 34.48.151-2003 Design, construction and operation of fiber-optic communication lines over overhead power lines. Instruction*. (Ukr).
27. *State Standard STO 56947007-33.180.10.173-2014 Guidelines for calculating the thermal effects of short-circuit currents and thermal stability of lightning protection cables and optical cables*. (Rus).

Надійшла (Received) 10.01.2023  
 Прийнята (Accepted) 07.03.2023  
 Опублікована (Published) 02.11.2023

Красножон Андрій Васильович<sup>1</sup>, к.т.н., доц.,  
Квицинський Анатолій Олександрович<sup>2</sup>, к.т.н., доц.,  
Буйний Роман Олександрович<sup>1</sup>, к.т.н., доц.,  
Діхтярук Ігор Віталійович<sup>1</sup>, к.т.н.,  
Красножон Олексій Васильович<sup>1</sup>, к.т.н.,

<sup>1</sup> Національний університет «Чернігівська політехніка»,  
95, вул. Шевченко, Чернігів, 14035,  
e-mail: red\_john@ukr.net; buinyiroman@gmail.com;  
dihtyaruk.ihor@gmail.com (Corresponding Author);  
krasnozhon08@gmail.com

<sup>2</sup> Відділ науково-дослідного супроводу  
нормативного забезпечення НЕК «Укренерго»,  
11/8, вул. Дорогожицька, Київ, 04112,  
e-mail: Kvytsynskyi.AO@ua.energy

A.V. Krasnozhon<sup>1</sup>, A.O. Kvytsynskyi<sup>2</sup>, R.O. Buinyi<sup>1</sup>,  
I.V. Dihtyaruk<sup>1</sup>, O.V. Krasnozhon<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Chernihiv Polytechnic National University,  
95, Shevchenko Str., Chernihiv, 14035, Ukraine.

<sup>2</sup> Department of research support of regulatory support  
of the NPC Ukrenergo,  
11/8, Dorohozhytska Str., Kyiv, 04112, Ukraine.

### **Study of the influence of the parameters of modern grounding wires on the value of power losses in them for overhead power lines of 330-750 kV.**

**Introduction.** The problem of estimating power losses in grounding wires with built-in fiber optic cable for overhead power lines of voltage class 330-750 kV is relevant, while it is obvious that the amount of losses depends on the chosen brand of wire. **Problem.** In

the article, an analysis of the influence of the parameters of grounding wires on the amount of losses that occur in them in the normal mode of operation of the overhead power lines is carried out. **Goal.** The purpose of the work is to determine the criterion for the selection of grounding wires with a built-in optical fiber cable under the condition of increasing the energy efficiency of electricity transmission. **Methodology.** To calculate power losses in grounding wires, the methods of electromagnetic field theory were used, while taking into account the location of phase conductors on various types of towers of operating 330-750 kV overhead power lines and the possible current load of such lines. **Results.** The paper analyzed the dependence of losses in the grounding wires of the overhead power lines on the ratio of its active and reactive resistances, determined in which range of this ratio the losses will be close to the maximum. It is shown that the amount of specific power losses in the grounding wires of 330-750 kV overhead power lines in its normal operating modes can range from 1.6 kW/km for the 750 kV lines to hundreds of W/km for the 330 kV power lines. **Originality.** For the first time, it is recommended to use grounding wires with built-in fiber optic cable with running active resistance in the range of no more than 0.25 Ohm/km, which will minimize power losses and increase the energy efficiency of the 330-750 kV overhead power lines. **Practical value.** The obtained results can be applied at the stage of designing new or modernizing existing overhead power lines in order to reduce losses and increase the energy efficiency of lines. References 27, tables 1, figures 5.

**Key words:** overhead power line, lightning protection system, grounding wire, electricity losses, running active resistance.

#### How to cite this article:

Krasnozhon A.V., Kvytsynskyi A.O., Buinyi R.O., Dihtyaruk I.V., Krasnozhon O.V. Study of the influence of the parameters of modern grounding wires on the value of power losses in them for overhead power lines of 330-750 kV. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2023, no. 6, pp. 77-83. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2023.6.14>