

УДК 621.315.1

DOI: 10.15587/1729-4061.2022.253384

Розробка методу зменшення втрат активної потужності на корону, який базується на зміні конструктивних параметрів лінії електропередавання

**С. Ю. Шевченко, Е. Олубакінде, Д. О. Данильченко, І. П. Назаренко,
Н. О. Савченко, Л. В. Шилкова**

Виконані дослідження впливу основних конструктивних параметрів ліній електропередавання на втрати енергії пов'язані з коронним розрядом та розроблено метод їх зниження. Конструкція розщепленого фазного проводу, відстані до землі та між центрами фаз лінії визначаються на етапі проектування. На базі цих конструктивних параметрів розраховується величина питомих втрат енергії пов'язаних з коронним розрядом. Вивчення впливу на величину втрат кожного з конструктивних параметрів дає можливість на етапі проектування розробити конструкцію лінії електропередавання (ЛЕП) з низькими втратами енергії. Зменшення втрат енергії при транспортуванні її по лінії є одним з найважливіших питань стратегії розвитку енергетичної галузі на етапі «зеленого переходу». Встановлено, що більшість конструктивних параметрів слабо впливає на величини втрат на корону, а якщо є суттєвий вплив, то реалізація подібних рішень призводить до великого підвищення ціни спорудження повітряних ліній електропередавання. На основі аналізу результатів розрахунків втрат на корону у лініях електропередавання було визначено, що втрати на корону на середній фазі лінії електропередавання набагато більші ніж на крайніх фазах. Це дало можливість розробити метод зниження втрат потужності на корону пов'язаний з вирівнюванням ємностей усіх фаз ЛЕП. Цей ефект забезпечується розрахунком, за розробленим методом, кроку розщеплення середньої фази ЛЕП. Розрахунок кроку розщеплення базується на попередньому визначенні ємності крайніх фаз та підстановкою розрахованих значень в отриманий вираз для кроку розщеплення. Можливість такого скорочення втрат на корону мають суттєво підвищити енергоефективність ЛЕП змінного струму, особливо в районах з великими періодами видів погоди, що провокують виникнення коронного розряду на проводах їх фаз. Ця обставина викликає підвищення такого виду втрат потужності.

Ключові слова: лінія електропередавання, конструктивні параметри лінії електропередавання, втрати потужності на корону, ємність фази лінії.

1. Вступ

Однією з пріоритетних задач сучасної енергетики є зниження втрат при передаванні та розподілі електричної енергії. Обсяг втрат електричної енергії впливає на економічні показники роботи енергосистеми та призводить до додаткового використання палива. Скорочення втрат енергії при передаванні дозволяє знизити шкідливі викиди продуктів згоряння органічного палива до атмосфери [1].

Передача електроенергії пов'язана із помітними втратами. Різниця між електроенергією, що надійшла в мережу і відпущеною споживачам, яка визначається за даними системи обліку її надходження та корисного відпуску, називається фактичними або звітними втратами електроенергії. Їх укрупнена структура складається з чотирьох основних частин:

1) технічні втрати енергії, зумовлені що відбуваються в електрообладнанні фізичними процесами, що одержані розрахунковим шляхом;

2) витрата електроенергії на власні потреби підстанцій, необхідна для роботи технологічного обладнання в електричній мережі та життєзабезпечення обслуговуючого персоналу, що реєструється приладами обліку;

3) втрати електроенергії, що виникають при її вимірі від інструментальних похибок, які одержані розрахунковим шляхом на основі даних про метрологічні характеристики;

4) комерційні втрати, завдані розкраданнями електроенергії та невчасністю її оплати.

Втрати електричної енергії залежать від умов експлуатації обладнання електричних мереж та від конструктивних особливостей такого обладнання. Одним з важливіших елементів системи передавання електричної енергії є повітряні лінії електропередавання (ЛЕП). Втрати активної енергії на ЛЕП, обумовлені фізичними процесами, вносять вагомий внесок у сумарні втрати в мережах енергосистеми. Вказані втрати можуть бути розділені на дві частини. Перша частина це втрати на нагрів проводів, які залежать від струму, який протікає по проводах ЛЕП. Друга частина – втрати пов'язані з коронним розрядом на проводах, які, в свою чергу, пов'язані з напругою на проводі ЛЕП [2]. Ці втрати мають різну фізичну сутність та можуть бути розглянуті окремо одні від одних.

Втрати пов'язані з коронним розрядом на ЛЕП мають назву – втрати на корону. Фізично подібні втрати є втратами активної енергії пов'язаними з протіканням струму корони в іонізованій зоні повітря біля проводу. Процес виникнення коронного розряду та його розвиток у часі добре вивчені. Точне визначення величини втрат на корону є досить складним процесом пов'язаним з наявністю засобів фіксації параметрів режиму електричної мережі [3]. На цей час величина втрат на корону нормується у вигляді питомих фіксованих величин для визначеної конструкції фази. Однак таке нормування було доречним при фіксації всіх конструктивних параметрів фази за виключенням кількості проводів та їх діаметру. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ) 2017 року видання дозволяє змінювати всі без виключення конструктивні параметри проводів фаз. Можливість зміни конструктивних параметрів ЛЕП призводить до зміни електричних полів, що виникають на проводах розщеплених фаз. Зміна заряду на фазі викликає зміну напруженості електричного поля на складових розщепленої. Питомі втрати енергії пов'язані з коронним розрядом залежать від співвідношення напруженості початку корони та напруженості на проводі лінії, визначеної її електричним полем. Зміна цього співвідношення впливає на величину втрат енергії. Дієвим засобом боротьби з короною є розщеплення фаз лінії.

На теперішній час втрати на корону становлять 20–25 % від сумарних втрат енергосистеми [2]. Однак при навантаженні мережі у 50–60 % втрати на

корону можуть скласти від 40 до 50 %. Цей факт дозволяє стверджувати, що Тому аналіз впливу конструктивних параметрів лінії електропередавання на величину втрат електроенергії на корону є актуальною проблемою, яка дозволить визначити методи скорочення подібних втрат.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Більшість авторів досліджує вплив на втрати від корони конструктивних параметрів ЛЕП, не враховуючі можливості їх зміни на етапі проектування. В роботі [2] зроблено спробу провести зниження втрат за рахунок покриття проводу полімерним покриттям. Слід зазначити, такий спосіб зниження втрат може бути досить затратним. Автори [4]. пропонують вимірювати втрати на корону за допомогою системи телемеханіки. Така система не дозволить робити прогнози оцінки втрат на корону, які виконуються в енергосистемі. В роботі [5] запропоновано систему моніторингу втрат енергії на корону для диспетчерських служб. Так, система дозволить оперативно приймати рішення щодо регулювання напруги. Однак вона не враховує можливості знизити втрати на корону на етапі проектування.

Автори [6] пропонують зміну втрат від корони робити за рахунок того чи іншого способу регулювання напруги в мережі. Однак реалізація такого регулювання потребує використання специфічних пристроїв. Таке регулювання буде обмежено спроможністю системи витримувати зміни напруги без порушення режиму роботи.

Робота [7] присвячена вивченню впливу корони на величини перенапруг на ЛЕП. При проведенні дослідження слід було вивчити вплив конструктивних параметрів фази ЛЕП на перенапруги та наявність корони. Автори роботи [8]. вивчають динаміку втрат від коронного розряду на ЛЕП 750 кВ в часі. Отримані в роботі результати свідчать про зростання подібних втрат в процесі експлуатації ЛЕП. В роботі [8] не запропоновано жодного засобу чи методу зниження вказаних втрат.

Інтенсивність втрат на корону залежить від погодних умов, наприклад при дощовій погоді втрати на корону збільшуються на порядок. Тому автори [9]. приділили таким змінам велику увагу. Слід зазначити, що точність визначення впливу погодних факторів на втрати на корону є досить низькою, завдяки не точним уявленням про час наявності того чи іншого виду погоди у місцевості де проходить траса повітряної лінії. На етапі проектування інженери проектувальники мають тільки приблизні данні по часу продовження видів погоди, які впливають на розрахунки як електричних так і економічних параметрів повітряної лінії.

Аналіз впливу конструктивних параметрів повітряних ліній на втрати від корони дасть можливість визначити, яким чином кожен з таких параметрів впливає на втрати на корону на лінії. Вивчення літературних джерел показує необхідність дослідження таких впливів. Для цього необхідно виконати ряд розрахунків втрат на корону для повітряних ліній різних конструкцій.

3. Ціль та задачі дослідження

Метою дослідження є розробка метода зниження втрат енергії, пов'язаних з коронним розрядом на ЛЕП з різними конструктивними параметрами. Це

дасть можливість на етапі проектування ЛЕП знизити втрати енергії на корону, за рахунок удосконалення конструкції розщепленої фази ЛЕП.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні завдання:

– провести розрахунки втрат потужності на корону зі зміною конструктивних параметрів ЛЕП;

– визначити можливість зміни конструкції розщепленої фази ЛЕП, як фактору впливу на зменшення втрат потужності на корону.

4. Матеріали та методи дослідження

4. 1. Методика визначення втрат пов'язаних з коронним розрядом на лінії електропередавання

Для аналізу величин втрат електричної енергії, обумовлених коронним розрядом на проводах ЛЕП, було використано рекомендовану методику визначення подібних втрат [10]. Ця методика включає в себе розрахунки напруженості електричного поля на поверхні проводів та порівняння її з напруженістю початку корони при різних видах атмосферних умов. Такий підхід дає змогу розрахувати питомі втрати на корону при різних конструктивних виконаннях фаз та опор лінії. Також вказана методика дозволяє отримати значення втрат електричної енергії на корону при будь яких атмосферних явищах, які впливають на фізичні процеси виникнення коронного розряду на проводах ЛЕП.

4. 2. Досліджувані матеріали та обладнання, що використовувались при розрахунках

Для аналізу залежності втрат на корону від конструкції ЛЕП були обрані основні марки проводів, що використовуються для спорудження ЛЕП надвисокої напруги. Також для розрахунків використані типові схеми опор ЛЕП, які визначають можливі стріли провисання проводів в прольоті. В якості прикладу розрахунки проводилися для ЛЕП напругою 330 кВ. Вибір такої номінальної напруги був обумовлений існуючими представленнями та нормативними документами про втрати на корону на ЛЕП.

5. Результати дослідження втрат на корону на лінях електропередавання різних конструкцій

5. 1. Розрахунки втрат потужності на корону.

Одним з найважливіших факторів, що впливають на показники роботи енергетичних систем, є втрати енергії, що супроводжують її передачу та розподіл. На цей час електричні мережі України мають досить високі показники втрат, які закладаються в тариф на електричну енергію. Величина втрат електричної енергії визначає коефіцієнт корисної дії ЛЕП. Сучасні лінії надвисокої напруги мають досить високі значення к.к.д., які становлять 95–98 %. Однак величина пропускну здатності ЛЕП 330 кВ становить приблизно 300 МВт. Тому зменшення втрат для подібної лінії на 1 % призведе до заощадження потужності у 3 МВт. Враховуючи протяжність подібних ЛЕП економія є суттєвою.

Основним фактором, що впливає на втрати на корону, безумовно є проводи ЛЕП та їх конструктивні особливості. Для ЛЕП номінальною напругою

330 кВ використовують, так звані, розщеплені проводи. Конструктивне виконання такого проводу приведено на рис. 1.

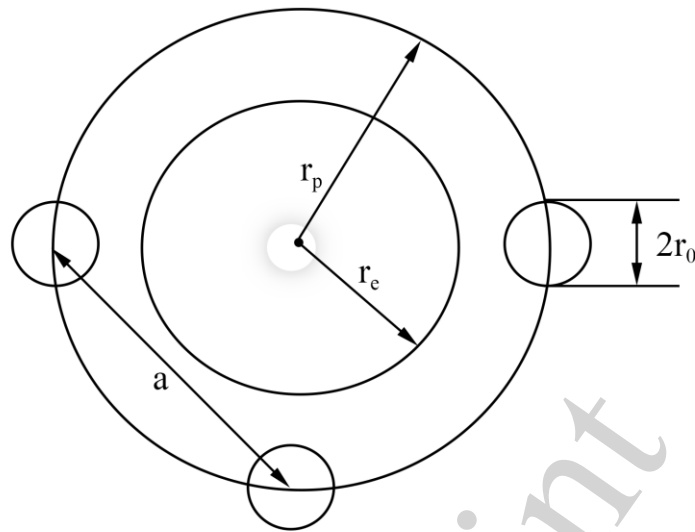


Рис. 1. Конструкція розщепленої фази лінії електропередавання: a – шаг розщеплення проводу, r_p – радіус розщеплення, r_e – еквівалентний радіус проводу, r_0 – радіус складової розщепленої фази.

Радіус розщеплення

$$r_p = \frac{a}{2 \sin\left(\frac{\pi}{n}\right)}, \quad (1)$$

еквівалентний радіус

$$r_e = \sqrt[n]{r_p^{n-1} \cdot n \cdot r_0}, \quad (2)$$

де n – кількість проводів у фазі,

r_0 – радіус складової розщепленої фази.

Ще трьома основними конструктивними параметрами є еквівалентна висота (H_e) підвісу проводу та висота підвісу проводу на опорі (H_n) та відстань між центрами сусідніх фаз (D).

$$H_e = H_n - \frac{2}{3} f,$$

(3)

де H_e – еквівалентна висота підвісу проводу,

f – стріла провисання проводу,

H_n – висота підвісу проводу на опорі,

Використання подібних конструкцій проводів пов'язано з запобіганням виникнення коронного розряду та зменшенням втрат потужності при передаванні енергії по ЛЕП. Параметри конструкції проводу обираються за нормативними документами.

Шаг розщеплення та кількість проводів, що складають фазу, визначають її конструкцію. Решта параметрів може бути розрахована з урахуванням марки проводу. Однак на конструкцію ЛЕП в цілому впливає ще і відстань між фазами та відстань від проводу до землі. Тому в роботі проаналізовано вплив вказаних вище конструктивних параметрів ЛЕП на втрати енергії на корону.

Для аналізу була використана методика рекомендована для розрахунку втрат на корону на повітряних лініях електропередавання з корекцією визначення ємностей фаз. Ємність фаз була розрахована за допомогою програми, розробленої на кафедрі «Передача електричної енергії» Національного технічного університету «Харківській політехнічний інститут». В основу цієї програми закладено принцип розрахунку електростатичних полів на основі потенційних коефіцієнтів. Вказана методика розрахунку напруженості електричного поля на проводах ЛЕП дає можливість урахувати тривалість того чи іншого атмосферного явища та розрахувати питомі втрати на корону

Після розрахунку ємності напруженість електричного поля на кожній фазі ЛЕП була визначена за виразами, які наведено нижче.

Середня напруженість на відповідній фазі

$$E_{\text{сеп } i} = 0.0147 \frac{C_i U}{nr_0}, \quad (4)$$

де C_i – робоча ємність відповідної фази,

U – номінальна напруга ЛЕП.

Напруженість початку корони

$$E_0 = 20.1 \cdot \text{air} \cdot \left(1 + \frac{0.613}{(\text{air} \cdot r_0)^{0.4}} \right), \quad (5)$$

де air – відносна щільність повітря

$$\text{air} = 0.00289 \frac{p}{273.16 + t}, \quad (6)$$

де $p=101325$ Па=760 мм рт. стовпа

t – температура град Цельсія, °С.

Еквівалентна напруженість на проводі

$$E_{ei} = E_{cep\ i} \left(1 + \frac{\alpha \cdot \beta^2 \cdot r_0^2 \cdot E_{cep\ i}}{4 \cdot a^2 \cdot E_0} \right), \quad (7)$$

де $\beta=2 \cdot (n-1) \sin(\pi/n)$, α – коефіцієнт, враховуючий залежність втрат на корону від видів погоди

Розрахунки проводять для чотирьох видів погоди (добра погода, сніг, дощ, паморозь). Для цього необхідно визначити коефіцієнт, який залежить від кількості проводів у фазі k_{ni} . Вираз для нього має вигляд [11]:

$$k_{ni} = x - y \frac{E_{ei}}{E_0}. \quad (8)$$

Коефіцієнт k_n розраховують для вказаних видів погоди по кожній фазі окремо.

Розрахунок відношення еквівалентної напруженості та напруженості початку корони з урахуванням значень коефіцієнтів проводиться за виразом:

$$otn_i = \frac{E_{ei} \cdot k_a k_{ni}}{E_0}. \quad (9)$$

Вказане відношення розраховують для всіх видів погоди, що розглядаються, в кожній фазі.

В залежності від шагу розщеплення змінюється вплив сусідніх складових розщепленої фази на електричне поле, яке існує на кожному з них. Коефіцієнт такого впливу k_a знаходиться з графіку, наведеному на рис. 2 [12].

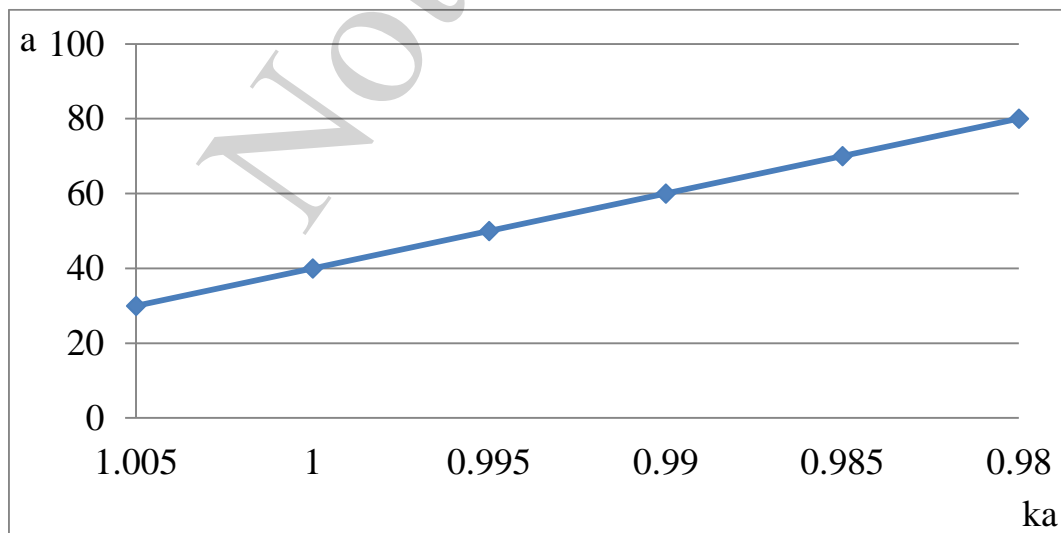


Рис. 2. Залежність уточнюючого коефіцієнту від шагу розщеплення фази лінії електропередавання.

В залежності від розрахованого значення відношення визначаються втрати на корону для всіх видів погоди та фаз ЛЕП

$$\Delta P_{ki} = F n_i r_{0i}^2 E_{\%i} / 10^3 \text{ [кВт/км]}, \quad (10)$$

де $F=f(otn_i)$ – залежність узагальнених втрат на корону від відношення еквівалентної напруженості та напруженості початку корони з уточнюючими коефіцієнтами.

Втрати на корону для заданої конструкції фази розраховуються за виразом

$$\Delta P_{k3f} = \sum_{i=1}^3 \Delta P_{ki} \cdot [\text{кВт/км}]. \quad (11)$$

Втрати потужності на корону з урахуванням часу існування того чи іншого виду погоди розраховуються за наступним виразом

$$\Delta P_{k \text{ погода}} = \Delta P_{kf} t_{\text{погода}} / 8760 \text{ [кВт/км]}. \quad (12)$$

Для кожного виду погоди маємо різний час її дії t_1, t_2, t_3, t_4 відповідно.

Втрати потужності на корону для лінії в цілому на протязі року розраховується за формулою

$$\Delta P_{k \text{ погода}} = \sum \Delta P_{kf} t_{\text{погода}} \text{ [кВт/км]}. \quad (13)$$

Для проведення аналізу впливу на втрати потужності конструктивних параметрів ЛЕП було використано конструкцію ЛЕП номінальною напругою 330 кВ. Подібні ЛЕП мають у складі фази мінімум два проводи, однак у Правилах улаштування електроустановок [13] проектувальник має можливість використати і іншу кількість складових.

На початку були розраховані залежності втрат на корону від відстані проводу фази до поверхні землі, яка має назву габарит до землі. Наявність можливості зміни висоти проводу над землею обумовлена районом проходження траси лінії в різних видах місцевості [8]. Результати розрахунків за представленою вище методикою для ЛЕП з номінальною напругою 330 кВ при двох складових у фазі перетином 400, габариті до землі 7 м, стрілі провисання 12 м, відстані між центрами фаз 8 м та кроку розщеплення 40 см, наведені на рис. 3.

Наступна серія розрахунків, для тієї ж конструкції ЛЕП, стосувалася визначення залежності питомих втрат потужності на корону від стріли провисання. Отримані результати наведені на рис. 4.

Наступним кроком розрахунків було визначено зміни втрат на корону при зміні відстані між сусідніми фазами для тієї ж конструкції ЛЕП. Одержані результати наведено на рис. 5.

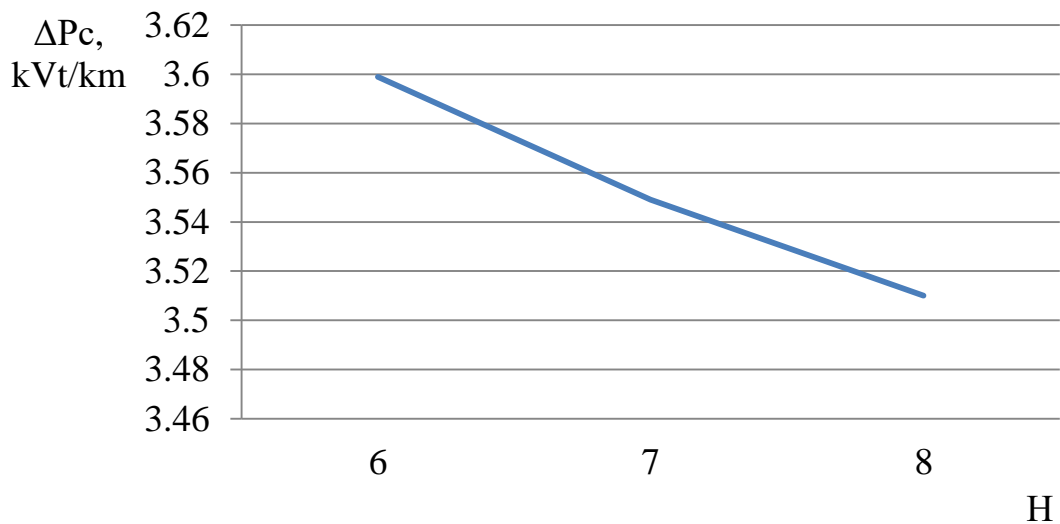


Рис. 3. Залежність питомих втрат на корону від габариту до землі (H) лінії електропередавання при однаковій стрілі провисання

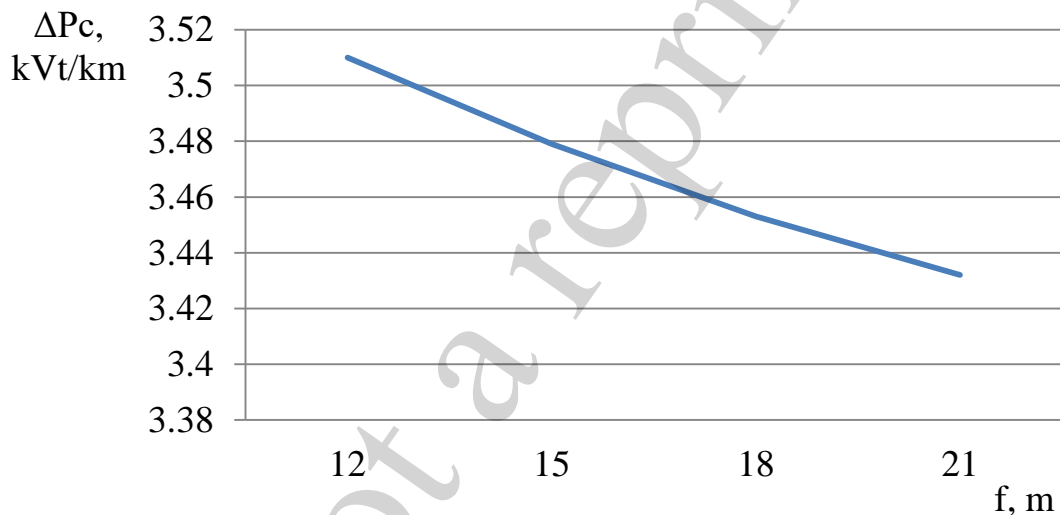


Рис. 4. Залежність питомих втрат на корону від стріли провисання лінії електропередавання при незмінному габариті до землі (H)

В ході роботи було проаналізовано вплив перетину складових розщепленої фази на питомі втрати потужності на корону. Однак порівняти та проаналізувати отримані результати досить складно. Основним чинником неможливості порівняння отриманих результатів є різниця перетинів фаз, які утворюються при використанні різних перетинів проводів. Наприклад, якщо фаза ЛЕП складена з двох проводів то при використанні проводу $2 \times AC\ 400$ перетин фази складає 800 мм, а при проводах $2 \times AC\ 300$ та $2 \times AC\ 240$ – 600 та 480 відповідно.

Для якісного аналізу впливу перетину складових розщепленої фази на втрати на корону було обрано три конструкції фази ЛЕП 330 кВ, які мають близькі сумарні перетини фаз ($2 \times AC\ 400$, $3 \times AC\ 300$ та $4 \times AC\ 240$). Результати розрахунків за представленою методикою значень втрат при зазначених конструкціях фаз наведені на рис. 6 для кожного перетину окремо.

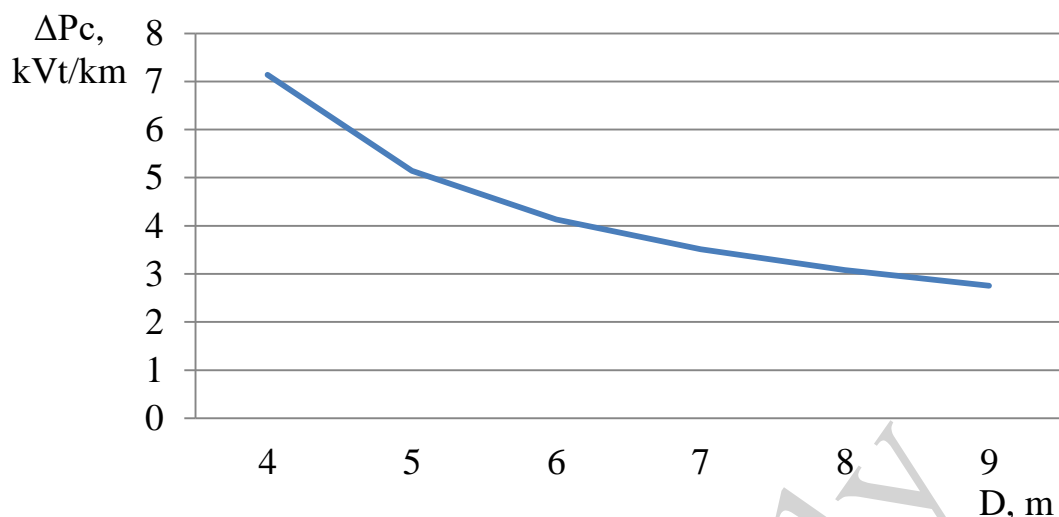


Рис. 5. Залежність питомих втрат на корону від відстані між центрами фаз при незмінній стрілі провисання лінії електропередавання та габариті до землі

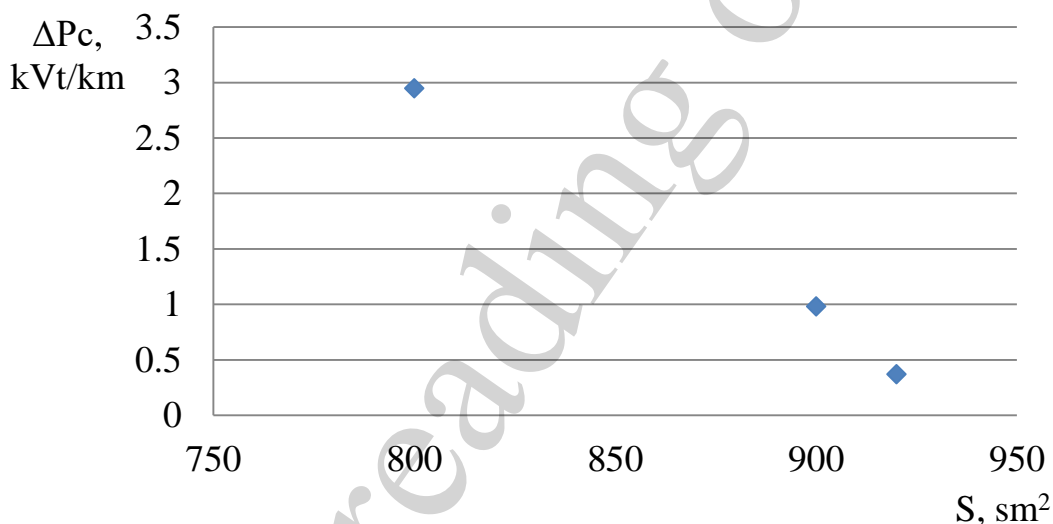


Рис. 6. Залежність питомих втрат на корону від сумарного перетину фази лінії електропередавання при різних конструкціях розщепленої фази (2×АС 400, 3×АС 300 та 4×АС 240)

Наступнім конструктивним параметром дослідженим в роботі є шаг розщеплення фазного проводу. Рекомендованим шагом розщеплення є 40 см. Така рекомендація ґрунтується на класичному представленні про коронний розряд. Вона вказує на те, що при відстані між проводами у 30–40 см напруженість електричного поля на поверхні проводу найменша. Величина напруженості обумовлює кількість втрат на корону. Результати розрахунків за представленою методикою наведені на рис. 7.

Останнім параметром конструкції фаз дослідженим в процесі роботи була кількість проводів, що складають розщеплену фазу ЛЕП. Оразу слід зазначити, що збільшення кількості проводів у фазі призведе до суттєвого зростання перетину. Тому прийняти рішення про використання додаткових проводів на

етапі проектування можливо лише на засадах результатів техніко-економічного порівняння варіантів конструкцій фаз. Потрібно також передбачити необхідності компенсування додаткової реактивної потужності. Результати розрахунків при тих же вихідних параметрах за вказаною методикою наведено на рис. 8.

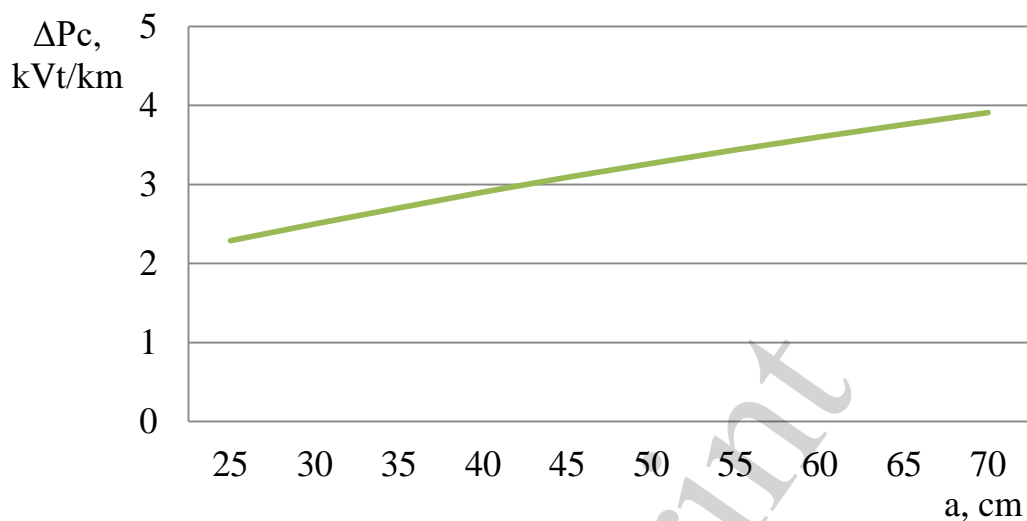


Рис. 7 Залежність питомих втрат на корону від кроку розщеплення фази

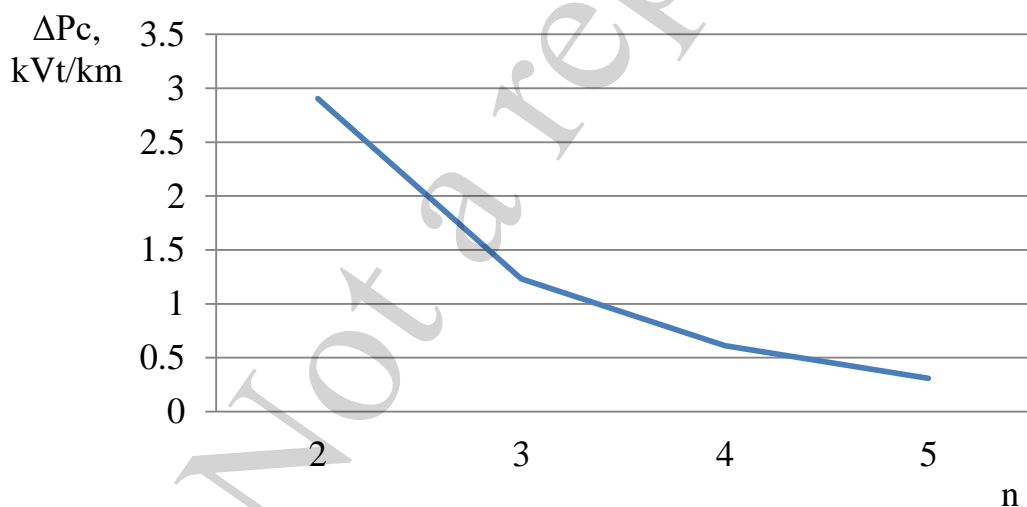


Рис. 8. Залежність питомих втрат на корону від кількості проводів у розщепленій фазі лінії електропередавання

Виконані розрахункові дослідження впливу конструктивних параметрів на втрати пов'язані з коронним розрядом відображають залежність їх від конструкції ЛЕП. Основним припущенням при проведенні розрахунків було розташування всіх фаз ЛЕП горизонтально над поверхнею землі.

5. 2. Визначення можливості зміни конструкції розщепленої фази ЛЕП, в як фактору впливу на зменшення втрат потужності на корону

В процесі проведення розрахунків з'ясувалося, що найбільший вклад у додаток втрат на корону для різних видів погоди вносить середня фаза ЛЕП. Це

стає очевидним, з аналізу зміни ємності фаз. При горизонтальному розміщенні проводів на опорі розрахунки показують, що найбільшу ємність, а відповідно і заряд має середня фаза. Цей факт свідчить про самі важкі, з точки зору напруженості електричного поля, умови експлуатації середньої фази. Для ілюстрації цього факту були взяті розрахункові значення втрат потужності на корону для ЛЕП номінальною напругою 330 кВ, які були отримані з використанням наведеної методики для обраних вище параметрів ЛЕП. Дані табл. 1 свідчать про те, що середня фаза дає приблизно 45 % від загальних втрат потужності на корону. Такий результат дав змогу припустити, що зменшення робочої ємності середньої фази ЛЕП за рахунок зниження шагу розщеплення буде досить суттєво впливати на величину втрат потужності.

Таблиця 1

Результати розрахунків втрат на корону при різних видах погоди

Фази ЛЕП	Види погоди			
	Добра	Сніг	Дощ	Паморозь
А,С	0,267	0,934	3,922	9,429
В	0,463	1,687	6,745	15,163
Summa	0,997	3,554	14,589	34,022

Для аналізу такого припущення було використано відомий вираз для ємності розщепленого проводу [14].

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon}{\ln \left[\frac{\sqrt[3]{2}D_0}{r_e \sqrt[3]{\left[1 + (D_0/H_e)^2\right]} \sqrt{1 + (D/H_e)^2}} \right]}, \quad (14)$$

де ϵ_0 – діелектрична проникність вакууму; ϵ – відносна діелектрична проникність середовища; D – відстань між центрами фаз, r_0 – радіус складової розщепленої фази, H_e – еквівалентна висота підвісу проводу.

Для спрощення виразу для ємності фази лінії було введено наступне позначення

$$T = \sqrt[3]{\left[1 + (D_0/H_e)^2\right]} \sqrt{1 + (D/H_e)^2}. \quad (15)$$

Вираз для визначення еквівалентного радіусу через ємність фази має вигляд:

$$r_e = \frac{\sqrt[3]{2D_0 e^c}}{e^{2\pi\epsilon_0 T}}. \quad (16)$$

На основі виразу (2) для еквівалентного радіусу було отримано розрахункову формулу для радіусу розщеплення фази ЛЕП

$$r_p = \frac{\sqrt[3]{2^{n-1} n r_0 D_0 e^c}}{e^{2\pi\epsilon_0 T}}. \quad (17)$$

Враховуючі вираз (1) для визначення радіусу розщеплення та вираз (15) було отримано формулу для розрахунку кроку розщеплення фази ЛЕП

$$a = \frac{2\sqrt[3]{2} \sin\left(\frac{\pi}{n}\right)^{n-1} \sqrt[n]{n r_0 D_0 e^c}}{e^{2\pi\epsilon_0} \sqrt[3]{\left[1 + \left(D_0/H_e\right)^2\right]} \sqrt{1 + \left(D/H_e\right)^2}}. \quad (18)$$

Таким чином був отриманий вираз для визначення кроку розщеплення фази повітряної лінії, який дозволить зрівняти ємності крайніх фаз з середньою фазою, що дозволить зменшити втрати на корону на ЛЕП. Результати розрахунку для конструкції фази 2×АС 400 наведені на рис. 9.

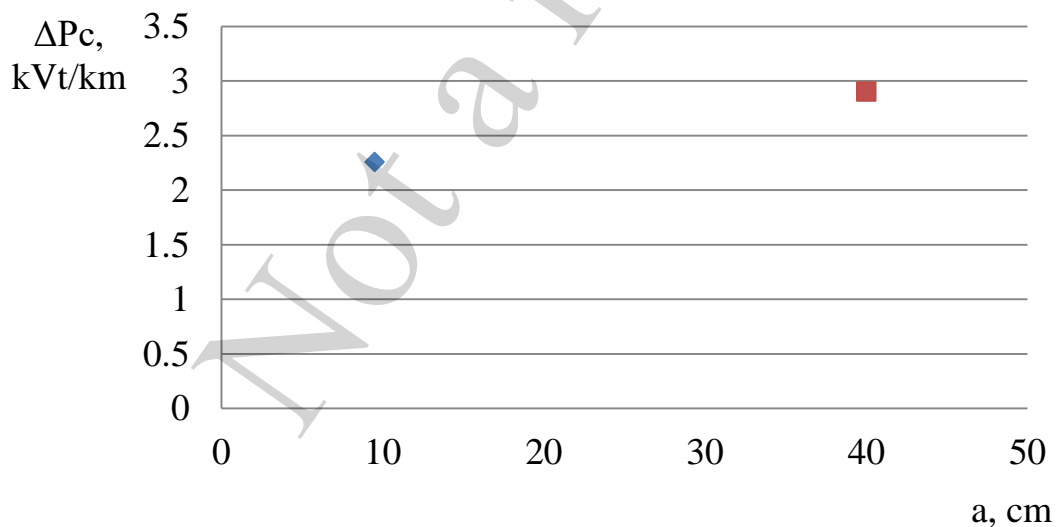


Рис. 9. Залежність питомих втрат на корону від кроку розщеплення середньої фази лінії електропередавання: ♦ – втрати на корону при кроку розщеплення середньої фази $a=10$ см, ■ – втрати на корону при кроку розщеплення $a=40$ см

Проведені розрахунки показали суттєву залежність втрат енергії на корону від радіуса середньої фаз ЛЕП.

6. Обговорення результатів дослідження втрат на корону на лініях електропередавання

Результати розрахунків, які наведено на рис. 3, показують, що втрати на корону можуть бути суттєво зменшені при збільшенні габариту ЛЕП. Однак подібне зменшення потребує досить великих капітальних вкладень за рахунок зміни конструкції опор. Окрім того, практика проектування базується на альбомах типових рішень, які пройшли верифікацію відповідних органів. Ці альбоми базуються на типових конструкціях опор, які виробляє промисловість, що робить зменшення чи збільшення габариту до землі практично неможливим. Зменшення втрат потужності на корону при зміні габариту на 2 м складе всього близько 2 %. Як видно на рис. 4, збільшення стріли провисання на 9 метрів призводить до зменшення втрат потужності на корону приблизно на 3 відсотки. Це робить подібний спосіб не ефективним тому, що для збільшення стріли провисання необхідно підвищити навантаження на опори ЛЕП. Таке збільшення буде мати наслідком необґрунтоване використання металу на конструкцію опор ЛЕП.

Отримані результати вказують на зростання питомих втрат на корону при зміні відстані між центрами фаз ЛЕП в бік зменшення (рис. 5). Такий результат обумовлений зростанням заряду проводу ЛЕП при зближенні фаз, що призводить до зростання напруженості електричного поля на проводі, яка і визначає величину втрат на корону.

Проведене дослідження показує суттєву залежність питомих втрат на корону від конструктивного виконання фази. На рис. 6 видно, що питомі втрати змінюються в рази. Наприклад, при переході від конструкції фази $2 \times AC 400$ до конструкції, яка містить $3 \times AC 300$, втрати зменшилися приблизно у 2,8 разів, однак і сумарний перетин збільшився на 100 мм^2 , що складає його зростання приблизно 12 відсотків. При зміні конструкції фази на $4 \times AC 240$ сумарний перетин збільшиться приблизно на 14 відсотків, а втрати потужності на корону зменшаться у 8 разів. Отримані величини втрат на корону дають змогу стверджувати, що змінення конструкції фази шляхом збільшення кількості складових в ній з меншим одиничним перетином є ефективним методом боротьби з втратами потужності на корону. Однак слід зауважити, що існуюча нормативна база практично не дає можливості на етапі проектування розробити конструктивні елементи ЛЕП таким чином, щоб отримати можливість внести зміни у конструкцію розщепленої фази шляхом збільшення кількості складових. Окрім того, питання про вибір конструкції фази має техніко-економічну складову, яка пов'язана з підвищенням необхідної кількості компенсуючих пристроїв та зі зміною конструкції опор ЛЕП, що проектується.

Рис. 7 ілюструє досить швидке зменшення втрат потужності на корону при збільшенні кількості складових розщепленої фази ЛЕП. Однак зростання загального перетину такої фази є досить великим, що обумовлює необхідність використання більш потужних опор та призводить до зростання зарядної потужності ЛЕП, яка потребує додаткових засобів компенсації. На рис 8 наведено залежність втрат потужності на корону від кроку розщеплення фази лінії. Результати розрахунків свідчать про збільшення втрат на корону при збільшенні кроку розщеплення. Це пов'язане зі збільшенням ємностей фаз за рахунок зростан-

ня радіусу розщеплення, що призводить до зростання напруженості електричного поля на поверхні проводів.

Проведені дослідження впливу конструктивних параметрів ЛЕП на втрату на корону показали досить слабку ефективність їх зміни для зниження вказаних втрат. Отримані величини втрат на корону вказують на те, що зміна одного з конструктивних параметрів ЛЕП на призводить до зменшення втрат на корону. Також можна сказати, що будь яке конструктивне рішення по зменшенню втрат на корону призводить до збільшення вартості спорудження ЛЕП.

На бази виконаних досліджень запропоновано метод зниження втрат на корону, який полягає в вирівнюванні ємностей фаз ЛЕП за рахунок визначення величини кроку розщеплення середньої фази. Слід зауважити, що цей метод може бути використаний при горизонтальному розташуванні фаз ЛЕП. Метод включає в себе два етапи. На першому провадиться розрахунок ємностей для всіх 3-х фаз. На другому вираховується крок розщеплення середньої фази виходячи з розрахункової ємності, що дорівнює ємності крайньої фази при попередніх розрахунках. Як видно з рис. 9, при зменшенні кроку розщеплення середньої фази до приблизно 10 см (визначено за викладеним вище методом зниження втрат на корону ЛЕП) втрати на корону зменшуються на 20 %.

Проведені розрахунки свідчать про можливість технічної реалізації такої фази. Для цього не потрібно змінювати основні конструктивні елементи ЛЕП, які визначені типовими альбомами з проектування ліній. Крім того, не потрібно розробляти нові конструкції опор, тому що практично не змінюються вагові навантаження на них.

Слід зазначити, що розроблений метод може бути використаний тільки під час проектування, спорудження та реконструкції ЛЕП з горизонтальним розташуванням фаз. Для іншого конструктивного виконання ЛЕП необхідно визначати свої засоби зниження втрат на корону. Для визначення методу зменшення втрат енергії на корону для двоколових опор необхідно провести додаткові дослідження. Складність у визначенні такого методу полягає в необхідності створення додаткового математичного апарату розрахунку втрат на корону для двоколових ЛЕП.

7. Висновки

1. Проведені розрахунки питомих втрат потужності на корону для ЛЕП 330 Кв різного конструктивного виконання. Вони виявили слабку залежність подібних втрат від зміни конструктивних параметрів ЛЕП. Така залежність у межах розрахунків коливалася близько 2–3 %. Це свідчить про наявність можливості впливу на втрати на корону конструктивними параметрами ЛЕП. Однак мають суттєві обмеження з точки зору техніко-економічної доцільності використання.

2. Виконані розрахункові дослідження дозволили створити метод зниження втрат на корону, який полягає в вирівнюванні ємностей фаз ЛЕП за рахунок визначення величини кроку розщеплення середньої фази. При умові зменшенні кроку розщеплення середньої фази до приблизно 10 см (визначено за викладеним вище методом зниження втрат на корону ЛЕП) втрати на корону зменшуються на 20 %.

Подяка

Колектив авторів висловлює подяку відомим фахівцям в галузі конструкцій ЛЕП проф. Г. Н. Александрову, проф. Г. В. Підпоркину, В. П. Редкову, Ю. В. Герасимову, доц. Ю. Г. Селезньову та іншим за вагомий внесок в дослідження впливу конструктивних особливостей повітряних ліній електропередавання на режими їх роботи.

Література

1. Breido, I., Kaverin, V., Voytkevich, S. (2018). Distribution of Power Losses on High-Voltage Supports. DAAAM Proceedings, 0329–0337. doi: <https://doi.org/10.2507/29th.daaam.proceedings.047>
2. Shevchenko, S., Koval, A., Danylchenko, D., Koval, V. (2020). Energy Crisis and Electricity Reform of Ukraine - First Results. 2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek). doi: <https://doi.org/10.1109/khpiweek51551.2020.9250119>
3. Diahovchenko, I., Mykhailyshyn, R., Danylchenko, D., Shevchenko, S. (2019). Rogowsky coil applications for power measurement under non-sinusoidal field conditions. Energetika, 65 (1). doi: <https://doi.org/10.6001/energetika.v65i1.3972>
4. Kuchansky, V., Zaitsev, I. O. (2020). Corona Discharge Power Losses Measurement Systems in Extra High Voltage Transmissions Lines. 2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS). doi: <https://doi.org/10.1109/ess50319.2020.9160088>
5. Blinov, I., Zaitsev, I. O., Kuchansky, V. V. (2020). Problems, Methods and Means of Monitoring Power Losses in Overhead Transmission Lines. Studies in Systems, Decision and Control, 123–136. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-48583-2_8
6. Riba, J.-R., Larzelere, W., Rickmann, J. (2018). Voltage Correction Factors for Air-Insulated Transmission Lines Operating in High-Altitude Regions to Limit Corona Activity: A Review. Energies, 11 (7), 1908. doi: <https://doi.org/10.3390/en11071908>
7. Leman, J. T., Olsen, R. G. (2020). Bulk FDTD Simulation of Distributed Corona Effects and Overvoltage Profiles for HSIL Transmission Line Design. Energies, 13 (10), 2474. doi: <https://doi.org/10.3390/en13102474>
8. Liu, Y., Chen, S., Huang, S. (2018). Evaluation of Corona Loss in 750 kV Four-Circuit Transmission Lines on the Same Tower Considering Complex Meteorological Conditions. IEEE Access, 6, 67427–67433. doi: <https://doi.org/10.1109/access.2018.2878763>
9. Bousiou, E. I., Mikropoulos, P. N., Zagkanas, V. N. (2020). Corona inception field of typical overhead line conductors under variable atmospheric conditions. Electric Power Systems Research, 178, 106032. doi: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2019.106032>
10. Тамазов, А. (2016). Потери на корону в высоковольтных воздушных линиях электропередачи. М.: Спутник+, 572.
11. Руководящие указания по учету потерь на корону и помех от короны при выборе проводов воздушных линий электропередачи переменного тока 330 – 750 кВ и постоянного тока 800–1500 кВ (1975). М.: СЦНТИ ОРГРЭС, 87.

12. Гуль, В. И., Нижевский, В. И., Хоменко, И. В., Шевченко, С. Ю., Чевычелов, В. А. (2009). Координация изоляции и перенапряжения в электрических высоковольтных сетях. Харьков, 270.

13. Правила улаштування електроустановок (2017). Київ, 617. URL: <https://art-energetyka.com.ua/Правила-улаштування-електроустановок.pdf>

14. Александров, Г. Н. (1989). Установки сверхвысокого напряжения и охрана окружающей среды. Ленинград: Энергоатомиздат. URL: <https://www.elec.ru/viewer?url=files/2019/11/26/aleksandrov-gn-ustanovki-sverhвысокого-napryazheni.pdf>

Not a reprint