

*Е. ОЛУБАКІНДЕ***ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЄМНОСТІ РОЗЩЕПЛЕНОЇ ФАЗИ НА ВТРАТИ ПОТУЖНОСТІ ПОВ'ЯЗАНІ З КОРОННИМ РОЗРЯДОМ**

Визначальним фактором наявності корони є величина заряду проводу, яка визначає напруженість електричного поля. Кількісні характеристики величини заряду фази лінії залежать від ємності та напруги. Якщо вплив напруги на втрати на корону досліджено багатьма авторами, то вплив ємності практично не вивчений. Пов'язано це насамперед з тим, що конструктивне виконання розщепленої фази повітряної лінії дуже ретельно визначалося нормативними документами. На наш погляд сьогодні існують усі можливості для зміни конструкцій фаз та відповідно їх ємностей. Це стало можливим завдяки зміні підходів до проектування конструкції фазного проводу на повітряній лінії. Визначення електричної ємності проводів розщепленої фази повітряної лінії досить часто виконується за допомогою еквівалентних параметрів, таких як еквівалентна висота підвісу та еквівалентний радіус. Такий підхід дає можливість отримати усереднені значення ємності фази повітряної лінії. Для детального аналізу впливу ємності на втрати на корону необхідно визначити більш достовірні значення ємностей та використати їх при розрахунках втрат на корону. Ємність фази визначається геометричними розмірами розщепленої фази. Отримані результати свідчать про дуже сильну залежність втрат на корону від ємності розщепленої фази. При наближенні до заземленого об'єкту ємність фази може суттєво збільшуватися. Яскравим прикладом такого збільшення є наближення проводів розщеплених фаз до елементів опор повітряних ліній. Відстані до землі в цьому випадку будуть меншими за еквівалентну висоту підвісу, яка використана при розрахунках питомої втрат на корону для визначення ємності фаз повітряної лінії. Необхідно враховувати можливі зміни ємності розщепленої фази на етапі проектування повітряної лінії. Ще одним результатом розрахунків виявився набагато більший вплив ємності середньої фази на величину втрат на корону. Це дає можливість зменшити втрати на корону за рахунок відповідної конструкції середньої фази повітряної лінії, наприклад змінюючи її радіус розщеплення.

Ключові слова: втрати на корону, напруженість електричного поля, ємність розщепленої фази, розщеплена фаза, повітряна лінія.

*Е. OLUBAKINDE***INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF BUNDLED CONDUCTOR CAPACITANCE ON POWER LOSSES ASSOCIATED WITH CORONA DISCHARGE**

The determining factor for the presence of a corona is the value of the charge of the wire, which determines the intensity of the electric field. Quantitative characteristics of the charge value of the line phase depend on the capacity and voltage. If the influence of voltage on corona losses has been studied by many authors, the influence of capacity is practically not studied. This is primarily due to the fact that the constructive implementation of the split phase of the overhead line was very carefully determined by regulatory documents. In our opinion, today there are all possibilities for changing the designs of phases and, accordingly, their capacities. This became possible thanks to a change in approaches to the design of the structure of the phase wire on the substation. Determination of the electric capacity of the overhead line with bundled conductors is quite often performed using equivalent parameters, such as equivalent suspension height and equivalent radius. This approach makes it possible to obtain average values of the phase capacity of the overhead line. For a detailed analysis of the effect of capacity on corona losses, it is necessary to determine more reliable values of capacities and use them in calculations of corona losses. The capacity of the phase is determined by the geometric dimensions of the split phase. The obtained results indicate a very strong dependence of corona losses on the capacity of the split phase. When approaching a grounded object, the phase capacity can significantly increase. A vivid example of such an increase is the approach of bundled conductors to the elements of overhead line supports. The distances to the ground in this case will be smaller than the equivalent height of the suspension, which is used in the calculations of the specific losses per crown to determine the capacity of the phases of the overhead line. It is necessary to take into account possible changes in the capacity of the split phase at the stage of designing the overhead line. Another result of the calculations was a much greater influence of the capacity of the middle phase on the amount of losses per corona. This makes it possible to reduce corona losses due to the appropriate design of the middle phase of the overhead line, for example, by changing its splitting radius.

Keywords: corona losses, electric field strength, capacity of bundled conductors, bundled conductors, overhead line.

Вступ. Наявність коронного розряду на проводах залежить від характеристик електричного поля, яке існує на поверхні проводу. Визначальним фактором наявності корони є величина заряду проводу, яка визначає напруженість електричного поля. Кількісні характеристики величини заряду фази лінії залежать від ємності та напруги. Вивченню впливу напруги на величину втрат потужності присвячено досить багато робіт. Ще на початку минулого століття було встановлено, що коронний розряд викликає появу в повітрі хмари просторових зарядів, на рух яких витрачається енергія електричного поля. У роботах Таунсенда, Холма, Майра, Дойча, Попкова [1–5], які розглядали корону на гладких і чистих проводах, було показано, що втрати на корону як змінного, так і постійного струму залежать від прикладеної до

проводу напруги U і початкової напруги корони $U_{оп}$. Одночасно були проведені експериментальні дослідження корони на проводах [6], які показали, що значення $U_{оп}$ можна визначити з початкової напруженості поля $E_{оп}$, розрахованої за формулами Піка або інших авторів. В [6] було показано, що поверхня проводів, що знаходяться в експлуатації, не буває гладкою і тим більше чистою, тому коронний розряд спостерігається при напругах менших $U_{оп}$. Таким чином, насправді спостерігається два режими, які характеризуються інтенсивністю наростанням втрат на корону при зростанні напруги, причому за невеликого збільшення втрат має місце місцева корона, а за великої – загальна. Найбільш чітко ці два режими видно на редукованих характеристиках втрат $P/U = f(U)$ для змінного струму. Місцева корона

© Е. Олубакінде, 2022

виникає при певній напрузі U_m (напрузі початку місцевої корони), коли починає коронувати перша неоднорідність. По мірі зростання напруги кількість коронуючих неоднорідностей зростає, поки режим не перейде в режим загальної корони, який характеризується критичним напругою коронного розряду U_0 і напругою переходу від місцевої корони до загальної U_L , яка більша за U_0 [7]. Напруга U_0 визначається зарядом проводу, який внаслідок неоднорідності поверхні виявляється меншим за заряд гладкого дроту. Тому величина U_0 залежить тільки від метеорологічних умов, а й від конструкції проводу [8]. Вимірювання втрат від корони на чистих кручених проводах [6] показали, що в порівнянні з гладкими проводами їх початкова напруга менша. Якщо вплив напруги на втрати на корону вивчено багатьма авторами, то вплив ємності практично не вивчений. Пов'язано це на сам перед з тим, що конструктивне виконання розщепленої фази повітряної лінії (ПЛ) дуже ретельно визначалося нормативними документами. На наш погляд сьогодні існують усі можливості для зміни конструкцій фаз та відповідно їх ємностей. Це стало можливим завдяки зміні підходів до проектування конструкції фазного проводу на ПЛ. Тому задача вивчення впливу ємності фази на величину втрат на корону є актуальною.

Мета статті. Проведення аналізу впливу ємності розщепленої фази ПЛ на втрати, пов'язані з коронним розрядом на поверхні проводів.

Постановка задачі. Визначення електричної ємності проводів розщепленої фази ПЛ досить часто виконується за допомогою еквівалентних параметрів, таких як еквівалентна висота підвісу та еквівалентний радіус. Такий підхід дає можливість отримати усереднені значення ємності фази ПЛ. Для детального аналізу впливу ємності на втрати на корону необхідно визначити більш достовірні значення ємностей та використати їх при розрахунках втрат на корону. Ємність фази визначається геометричними розмірами розщепленої фази. Отримані залежності впливу ємності розщепленої фази на втрати на корону дозволяють на етапі проектування більш точно визначити конструктивні параметри фази ПЛ за рахунок зміни її геометричних параметрів.

Методи дослідження. Конструкція розщепленої фази (діаметр і переріз проводів, кількість проводів у фазі та відстань між проводами фази) визначає такі характеристики передачі як пропускна здатність, втрати на нагрівання проводів і корону, рівні радіоперешкод від лінії, габарити лінії електропередачі та ступінь її впливу на навколишнє середовище [9]. При цьому зміна того чи іншого параметра конструкції фази може по-різному позначатися на параметрах електропередачі в цілому і її техніко-економічних показників зокрема.

До технічних критеріїв, що визначають конструкцію фази, належать:

- напруженість електричного поля на дротах;
- рівень радіоперешкод, створюваних лінією;
- екологічний та естетичний вплив лінії [10].

Для всіх варіантів конструкції фази необхідно визначити напруженість електричного поля на дротах. Відстані між фазами вибираються з урахуванням допустимої відносної напруженості. Відносна напруженість визначається за середньоексплуатаційних умов як відношення максимальної напруженості E_m на дротах до напруженості початку загальної корони E_0 для одиночного дроту. Допустима величина E_m/E_0 повинна бути досить високою, щоб не збільшувати надмірні габарити опори, і в той же час не допускати тривалої роботи дротів в умовах загальної корони.

Допустима відносна напруженість приймається $E_m/E_0 = 0,9$. Напруженість поля E_0 (кВ/см) на поверхні одиночного дроту, при якій з'являється загальна корона, відповідно до [4] визначається за формулою:

$$E_0 = 24,5m\delta \left[1 + \frac{0,613}{(\delta r_0)^{0,4}} \right], \quad (1)$$

де m – коефіцієнт негладкості проводу, що приймається для кручених проводів рівним 0,82;

δ – розрахункова відносна щільність повітря, яка визначається на підставі обробки метеорологічних даних по району проходження траси ПЛ;

r_0 – радіус проводу, см.

Слід зазначити, що саме поняття загальної корони лише умовно можна застосувати до фази, розщепленої на декілька складових. При підвищенні напруженості до величини E_0 корона з'являється лише на зовнішніх ділянках проводу, але в ділянках, звернених всередину пучка фази, корона відсутня. Однак при збільшенні напруженості до значення E_0 і більше на розщепленій фазі відбувається різке збільшення втрат на корону. Для врахування цього явища використовують критерій «початку загальної корони».

Напруженість електричного поля на поверхні проводу залежить від середньої висоти підвіски проводу на лінії, взаємного розташування проводів і грозозахисних тросів, які в свою чергу, обумовлені конструкцією опор, що приймається в проєкті, і їх висотою [11].

Для прийнятих висоти та взаємного розташування фазних проводів та грозозахисних тросів розраховуються напруженості поля на поверхні проводів залежно від відстані між фазами для різних поєднань кількості проводів у фазі, діаметра одиночного проводу та кроку розщеплення [12].

Середня напруженість електричного поля на поверхні дротів може бути визначена за такою формулою:

$$E_{\text{середня}} = 0,0147 \frac{C_{\phi} U}{nr_0}. \quad (2)$$

де $E_{\text{середня}}$ – середня напруженість на поверхні проводів будь-якої фази лінії, кВ/см;

C_{ϕ} – робоча ємність цієї фази, пФ/м;

U – середня експлуатаційна напруга за рік вздовж ПЛІ (діюче значення), кВ;

n – число проводів у фазі [4].

Робоча ємність розщепленої фази розраховувалась з урахуванням розташування проводів у просторі на основі розробленої на кафедрі «Передача електричної енергії» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» програми. Текст цієї програми наведено на рис. 1.

Розрахунок втрат потужності на корону на одиночних провадах провадиться за формулою:

$$\Delta P_k = E_M r_0^2 f \left(\frac{E_M}{E_0} \right). \quad (3)$$

Втрати потужності на корону на розщеплених «п» провадах у фазі матимуть вигляд:

$$\Delta P_k = E_M r_0^2 n f \left(\frac{E_M}{E_0} \right). \quad (4)$$

Для конкретної марки дроту залежність (3) спрощується:

$$\Delta P_k = E_M f(E_M) \quad (5)$$

або

$$\Delta P_k = U f(U). \quad (6)$$

Таку заміну напруженості на напругу можна проводити в тому випадку, якщо параметри (міжфазна відстань, радіус і число розщеплення) не змінюються.

Узагальнення великої кількості експериментальних даних дозволило побудувати узагальнені характеристики втрат потужності на корону з урахуванням запровадження низки коефіцієнтів, які враховують вплив погодних умов, і навіть параметри конструкції розщепленої фази (кількість проводів, крок розщеплення) [8].

Відомо, що напруженість поля навколо дроту по периметру розподіляється нерівномірно. У зв'язку з цим у розрахунках втрат потужності на корону застосовують еквівалентне значення напруженості поля, що визначається за формулою:

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

де $E_{\text{ср}}$ – середня напруженість на дроті;

α – коефіцієнт, що враховує погодні умови та визначається від виду погоди: хороша погода – $\alpha = 11,6$; сухий сніг – $\alpha = 8,7$; дощ – $\alpha = 8,2$; паморозь – $\alpha = 3,8$;

β – коефіцієнт, що враховує нерівномірність розподілу напруженості навколо дроту в залежності від кількості проводів у фазі.

З урахуванням перерахованих вище поправочних коефіцієнтів вираз визначення втрат потужності на корону буде таким:

$$\Delta P_k = n r_0^2 E_{\text{екв}} f \left(\frac{E_{\text{екв}} K_a K_n}{E_0} \right), \quad (8)$$

де K_a і K_n – коефіцієнти, що характеризують крок розщеплення та кількість проводів у фазі відповідно.

Середньорічні втрати потужності на корону визначаються за такою формулою:

$$\begin{aligned} \Delta P_k = \frac{n r_0^2}{8760} \left\{ \left[\sum_{i=1,2,3} F_{\text{хп}} \left(\frac{E_{\text{ісек}} \cdot K_a \cdot K_n}{E_{0\text{хп}}} \right) E_{\text{ісек}} \right] \delta^2 Q_{\text{хп}} + \right. \\ \left. + \left[\sum_{i=1,2,3} F_{\text{сніг}} \left(\frac{E_{\text{ісек}} K_a}{E_0} \right) E_{\text{ісек}} \right] Q_{\text{сніг}} + \right. \\ \left. + \left[\sum_{i=1,2,3} F_{\text{дощ}} \left(\frac{E_{\text{ісек}} K_a}{E_0} \right) E_{\text{ісек}} \right] \eta Q_{\text{дощ}} + \right. \\ \left. + \left[\sum_{i=1,2,3} F_{\text{паморозь}} \left(\frac{E_{\text{ісек}} K_a}{E_0} \right) E_{\text{ісек}} \right] Q_{\text{паморозь}} \right\} \quad (9) \end{aligned}$$

Функції $F_{\text{хп}}$, $F_{\text{сніг}}$, $F_{\text{дощ}}$, $F_{\text{паморозь}}$, індекси яких відповідають різним видам погоди (хороша погода, сухий сніг, дощ, паморозь), знаходять по табл. 1 узагальнених характеристик втрат потужності при короні; $Q_{\text{хп}}$, $Q_{\text{сніг}}$, $Q_{\text{дощ}}$, $Q_{\text{паморозь}}$ позначають розрахункову тривалість різних видів погоди протягом року.

Результати чисельного моделювання. Для проведення дослідження впливу ємності розщепленої фази на втрати на корону нами була обрана повітряна лінія електропередавання номінальною напругою 330 кВ. Розщеплена фаза ПЛІ складалася з двох проводів АС 330/46 та кроком розщеплення 45 см. Довжина прольоту складала 400 м та стріла провису 12 м. Результати розрахунків наведені на рис. 2.

Отримані результати свідчать про дуже сильну залежність втрат на корону від ємності розщепленої фази. На рисунку добре видно, що при збільшенні ємності розщепленої фази на 2 % втрати на корону зростають більш ніж на 11 %, а у випадку зростання ємності на 10 % відповідно – більш ніж на 60 %. Ємність розщепленої фази визначається її геометричними параметрами. В першу чергу на ємність впливає наближеність проводу фази до заземлених об'єктів. При наближенні до заземленого об'єкту ємність фази може суттєво збільшуватися. Яскравим прикладом такого збільшення є наближення проводів розщеплених фаз до елементів опор повітряних ліній. Відстані до землі в цьому випадку будуть меншими за еквівалентну висоту підвісу яка використана при розрахунках питомих втрат на корону для визначення ємності фаз ПЛІ Така залежність свідчить про необхідність виявлення місць підвищення ємності фази ПЛІ по трасі її проходження. Такими місцями можуть бути переходи через шляхопроводи, райони проходження ПЛІ по лісовим

масивам тощо. Отримані результати свідчать про те, що необхідно враховувати можливі зміни ємності розщепленої фази на етапі проектування ПЛ. Якщо на цьому етапі визначено, що проводи ПЛ по трасі проходження мають наближення до заземлених об'єктів необхідно корегувати питому величину втрат на корону у бік збільшення.

Ще одним досить цікавим результатом розрахунків виявився набагато більший вплив ємності середньої фази на величину втрат на корону. Цей факт дає можливість на етапі проектування зменшити втрати на корону за рахунок відповідної конструкції середньої фази ПЛ, наприклад змінивши її радіус розщеплення.

Висновки. Результати чисельного моделювання виявили залежність втрат на корону від ємності розщепленої фази. При збільшенні ємності розщепленої фази на 2 % втрати на корону зростають більш ніж на 11 %, а у випадку зростання ємності на 10 % відповідно – більш ніж на 60 %. При наближенні до заземленого об'єкту ємність фази може суттєво збільшуватися. Прикладом такого збільшення є наближення проводів розщеплених фаз до елементів опор повітряних ліній. Результати розрахунків виявили необхідність враховувати можливі зміни ємності розщепленої фази на етапі проектування ПЛ.

ORIGIN := 1

$$LF(1, f, d) := \begin{cases} \text{if } \leftarrow (d-1) \cdot (3-d) \cdot 1 + f \cdot \left[(d-2) \cdot \frac{d-1}{2} \right] \\ \text{if} \end{cases}$$

```

CE(a, He, do, n, ro, U, Emx, qmx) :=
  nf1 ← n
  nf2 ← n
  nf3 ← n
  n2f ← nf1 + nf2
  np ← nf1 + nf2 + nf3
  α ←  $\frac{2 \cdot \pi}{n}$ 
  π ←  $\frac{a}{200}$  if a ≠ 0
  π ← 0 otherwise
  HET ←  $\frac{n}{2}$ 
  Man ← HET - floor(HET)
  if Man ≤ 0
    for i ∈ 1..np
      hi ← π · cos[π - α · (i - 1) +  $\frac{\alpha}{2}$ ]
      Di ← π · sin[π - α · (i - 1) +  $\frac{\alpha}{2}$ ]
      hi ← He - hi
      if i > n
        Di ← do + Di if i ≤ 2·n
        Di ← 2·do + Di if i > 2·n
      D
  if Man > 0
    for i ∈ 1..np
      hi ← π · cos[π - α · (i - 1)]
      Di ← π · sin[π - α · (i - 1)]
      hi ← He - hi
      if i > n
        Di ← do + Di if i ≤ 2·n
        Di ← 2·do + Di if i > 2·n
      D
  for i ∈ 1..np
    for j ∈ 1..np
      if i ≠ j
        dri,j ←  $\sqrt{(D_i - D_j)^2 + (h_i - h_j)^2}$ 
        hri,j ←  $\sqrt{(D_i - D_j)^2 + (h_i + h_j)^2}$ 

```

початок

```

otherwise
  dri,j ←  $\frac{ro}{100}$ 
  hri,j ← 2·hi
for d ∈ 1..3
  nf ← 1 + LF(nf1, nf1 + nf2, d)
  kf ← nf1 + LF(nf2, nf2 + nf3, d)
  u1d ← 1 - LF(1, 1, d) · 1.5
  u2d ← -0.5 + LF(1, 0, d) · 1.5
  u3d ← -0.5 + LF(0, 1, d) · 1.5
  for m ∈ 1..np
    for k ∈ 1..np + 1
      if k ≠ np + 1
        kom,k ← ln( $\frac{hr_{m,k}}{dr_{m,k}}$ )
        Vm,k ← kom,k
      otherwise
        if m ≤ nf1
          C1 ← m
          kom,k ← u1d
          Zm ← u1d
        if (m > nf1) · (m ≤ n2f)
          kom,k ← u2d
          Zm ← u2d
        if (m > n2f) · (m ≤ np)
          kom,k ← u3d
          Zm ← u3d
        ko
  K ← solve(V, Z)
  qs ← 0
  for i ∈ nf..kf
    fn ← nf
    fk ← kf
    qs ← qs +  $\frac{K_i}{fk - fn + 1}$ 
  for j ∈ nf..kf
    if |Kj| > qmx
      qmx ← Kj
      iq ← j
  qs ← 55.56 · qs
  qm ← qmx · 55.56 · U · 0.81649 · 10-9
  fk ← kf
  Cfd ← qs · (fk - fn + 1)

```

продовження

```

for j ∈ nf..kf
  Ex ← 0
  Eh ← 0
  for i ∈ 1..n
    for k ∈ 1..2
      k1 ← -1 if k < 2
      k1 ← 1 otherwise
      if (i ≠ j) · (k1 ≠ -1)
        t ←  $(D_i - D_j)^2 + (h_i + k1 \cdot h_j)^2$ 
        Ex ← Ex -  $\frac{k1 \cdot K_i \cdot (D_i - D_j)}{t}$ 
        Eh ← Eh -  $\frac{k1 \cdot K_i \cdot (h_j + k1 \cdot h_i)}{t}$ 
      break otherwise
  Emj ←  $2 \cdot \sqrt{Ex^2 + Eh^2} + \frac{K_j}{100}$ 
  if Emx < Emj
    Emx ← Emj
    iE ← j
  Emj ← Emj · U · 0.81649 · 10-2
  Kj ←  $\left( K_j \cdot \frac{U}{1.2247 \cdot 10^{-3}} \right) \cdot 0.5556 \cdot 10^{-10}$ 
  z ← 1
  Emx ← Emx · U · 0.81649 · 10-2
  Co ←  $\frac{\sum_{i=1}^d Cf_i}{3}$ 
  zv ←  $\frac{3436.4}{Co}$ 
  Pn ←  $\frac{U^2}{zv \cdot 10^{-3}}$ 
  rez ←  $\begin{pmatrix} iq \\ qm \\ iE \\ Emx \\ Cf_1 \\ Cf_2 \\ Cf_3 \\ Co \\ zv \\ Pn \end{pmatrix}$ 

```

кінець

Рисунок 1 – Текст програми для розрахунку ємності

Таблиця 1 – Узагальнені характеристики втрат потужності при короні для різних видів погоди

$\frac{E_{\text{скв}} K_a K_n}{E_0}$	$F_{\text{хп}}$	$F_{\text{сніг}}$	$F_{\text{дощ}}$	$F_{\text{паморозь}}$
0,6	1	6,7	23,4	80
0,61	1,05	7,25	26,2	85
0,62	1,11	7,94	29,4	90
0,63	1,175	8,7	33	97,5
0,64	1,23	9,5	37,1	106
0,65	1,29	10,35	41,2	115
0,66	1,41	11,3	45,8	123
0,67	1,55	12,3	50	131
0,68	1,7	13,5	55	138
0,69	1,86	14,8	60	146
0,7	2	16,2	65,5	153
0,71	2,14	17,8	71	162
0,72	2,34	19,5	76,5	170
0,73	2,52	21,4	82	180
0,74	2,82	23,4	87,5	188
0,75	3,09	25,5	93	195
0,76	3,38	27,6	98,5	204
0,77	3,8	30	104	214
0,78	4,25	32,3	107	224
0,79	4,68	34,6	112	234
0,8	5,13	37,1	116	244
0,81	5,62	40	121,5	254
0,82	6,17	43,3	127	265
0,83	6,75	46,6	133	275
0,84	7,4	50	138	285
0,85	8,13	54,3	143	295
0,86	8,9	59	149	305
0,87	10	63,7	155	315
0,88	11,2	68,5	162	325
0,89	12,6	74	168	336
0,9	14,1	80	175	347
0,91	15,8	86	182	359
0,92	17,8	93	190	368
0,93	20,4	100	198	377
0,94	24	108	206	386
0,95	28,2	117	214	394

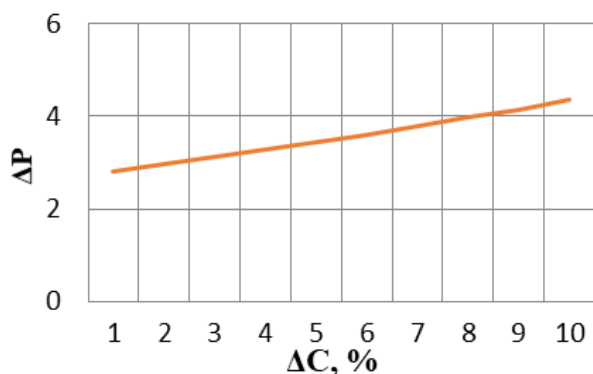


Рисунок 2 – Залежність втрат на корону від ємності розщепленої фази

Список літератури

1. Townsend J. S. Electricity in gases. Oxford : Clarendon Press, 1915. 493 p.
2. Holm R. Die Theorie der Wechselstromkorona an Hochspannungsleitungen. *Archiv für Elektrotechnik*. 1927. Vol. 18, no. 6. P. 567–582. DOI: <https://doi.org/10.1007/bf01656202>.

3. Mayr O. Beitrag zur Theorie der Wechelspannungs Korona. 9th ed. Jahrbuch der AEG Forschung, 1942.
4. Deutsch W. Über die Dichteverteilung unipolarer Ionenströme. *Annalen der Physik*. 1933. Vol. 408, no. 5. P. 588–612. DOI: <https://doi.org/10.1002/andp.19334080508>.
5. Попков В. И. Коронный разряд и линии сверхвысокого напряжения. Москва : Наука, 1990. 253 с.
6. Peek F. W. Dielectric phenomena in high voltage engineering. New York : McGraw-Hill Book Company Inc., 1915.
7. Тамазов А. И. Корона на проводах воздушных линий переменного тока. Москва : Спутник, 2002. 318 с.
8. Тамазов А. И. Обобщённые характеристики токов короны воздушных линий электропередачи постоянного тока. *ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность*. 2003. № 1. С. 11–17.
9. Тамазов А. И. Распределение обобщённых токов и расчёт среднегодовых потерь мощности на корону биполярных воздушных линий электропередачи. *ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность*. 2003. № 2. С. 39–42.
10. Шевченко С. Ю., Олубакінде Е. Вплив втрат на корону на енергоефективність повітряних ліній електропередавання. *V Міжнародна науково-технічна конференція «Енергоефективність та енергетична безпека електроенергетичних систем (EEES- 2021)»*: зб. наук. пр., м. Харків, 9–12 листоп. 2021 р. Харків, 2021. С. 100–101.
11. Шевченко С. Ю., Олубакінде Е. Втрати на корону повітряних ліній електропередавання. *V Міжнародна науково-технічна конференція «Енергоефективність та енергетична безпека електроенергетичних систем (EEES- 2021)»*: зб. наук. пр., м. Харків, 9–12 листоп. 2021 р. Харків, 2021. С. 102–103.
12. Shevchenko S., Olubakinde E., Danylchenko D., Nazarenko I., Savchenko N., Shylkova L. Devising a method for reducing active power corona losses based on changing the structural parameters of a power transmission line. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. Vol. 1, no. 8(115). P. 18–25. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.253384>.

References

1. J. S. Townsend, *Electricity in Gases*. Oxford: Clarendon Press, 1915.
2. R. Holm, “Die Theorie der Wechselstromkorona an Hochspannungsleitungen,” *Archiv für Elektrotechnik*, vol. 18, no. 6, pp. 567–582, Nov. 1927, doi: <https://doi.org/10.1007/bf01656202>. (in German)
3. O. Mayr, *Beitrag zur Theorie der Wechelspannungs Korona*, 9th ed. Jahrbuch der AEG Forschung, 1942. (in German)
4. W. Deutsch, “Über die Dichteverteilung unipolarer Ionenströme,” *Annalen der Physik*, vol. 408, no. 5, pp. 588–612, 1933, doi: <https://doi.org/10.1002/andp.19334080508>. (in German)
5. V. I. Popkov, *Koronnyj Razrjad I Linii Sverhvyssokogo Naprjazhenija [Corona Discharge and Extra-High Voltage Lines]*. Moscow: Nauka, 1990. (in Russian)
6. F. W. Peek, *Dielectric Phenomena in High Voltage Engineering*. New York: McGraw-Hill Book Company Inc., 1915.
7. A. I. Tamazov, *Korona Na Provodah Воздушных Linij Peremennogo Toka [Corona on Overhead Power Line Wires]*. Moscow: Sputnik, 2002. (in Russian)
8. A. I. Tamazov, “Obobshhjonnye harakteristiki tokov korony vozdushnyh linij jelektroperedachi postojannogo toka [Generalised corona characteristics of overhead DC transmission lines],” *ELECTRO. Electrical Engineering, Electrical Power, Electrical Industry*, no. 1, pp. 11–17, 2003. (in Russian)
9. A. I. Tamazov, “Распределение обобshhjonnyh tokov i raschjot srednegodovyh poter' moshhnosti na koronu bipolarnyh vozdushnyh linij jelektroperedachi [Distribution of generalised currents and calculation of average annual corona power losses of bipolar overhead lines],” *ELECTRO. Electrical Engineering, Electrical Power, Electrical Industry*, no. 2, pp. 39–42, 2003. (in Russian)
10. S. Yu. Shevchenko and E. Olubakinde, “Vplyv vtrat na koronu na enerhoefektyvnist povitrianykh linij elektroperedavannia [Impact of corona losses on the energy efficiency of overhead power lines],” in *V International Scientific and Technical Conference “Energy Efficiency and Energy Security of Electric Power Systems (EEES-*

-
- 2021)”, Kharkiv, Ukraine, Nov. 9–12, 2021. Kharkiv: Typography Madrid, 2021, pp. 100–101.
11. S. Y. Shevchenko and E. Olubakinde, “Vtraty na koronu povitrianykh liniy elektroperedavannia [Losses on the corona of overhead power lines],” in *V International Scientific and Technical Conference “Energy Efficiency and Energy Security of Electric Power Systems (EEES-2021)”*, Kharkiv, Ukraine, Nov. 9–12, 2021. Kharkiv: Typography Madrid, 2021, pp. 102–103.
12. S. Shevchenko, E. Olubakinde, D. Danylchenko, I. Nazarenko, N. Savchenko, and L. Shylkova, “Devising a method for reducing active power corona losses based on changing the structural parameters of a power transmission line,” *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 1, no. 8(115), pp. 18–25, Feb. 2022, doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.253384>.

Надійшла (received) 16.06.2022

Відомості про авторів / About the Authors

Олубакінде Еніола (Eniola Olubakinde) – аспірант кафедри передачі електричної енергії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5412-1850>; e-mail: eniolubakinde@fedpolel.edu.ng.