

**КУЗНЕЦОВ ВОЛОДИМИР ГРИГОРОВИЧ** – доктор технічних наук, професор, член-кореспондент Національної академії наук України, головний науковий співробітник відділу оптимізації систем електропостачання, Інститут електродинаміки НАН України; м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5399-2942>; e-mail: [iednasu@ied.org.ua](mailto:iednasu@ied.org.ua).

**ТУГАЙ ЮРІЙ ІВАНОВИЧ** – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник відділу оптимізації систем електропостачання, Інститут електродинаміки НАН України; м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0704-1863>; e-mail: [tugai@gmail.com](mailto:tugai@gmail.com).

**КУЧАНСЬКИЙ ВЛАДИСЛАВ ВОЛОДИМИРОВИЧ** ✉ – кандидат технічних наук, старший дослідник, завідувач відділу оптимізації систем електропостачання, Інститут електродинаміки НАН України; м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0002-8648-7942>; e-mail: [kuchanskiyvladislav@gmail.com](mailto:kuchanskiyvladislav@gmail.com).

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ КОРОННОГО РОЗРЯДУ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ ВПЛИВУ НА РЕЗОНАНСНІ ПЕРЕНАПРУГИ

У статті представлено математичну модель коронного розряду, спрямовану на кількісну оцінку його впливу на резонансні перенапруги в повітряних лініях електропередавання надвисокої напруги під час паузи однофазного автоматичного повторного вмикання. Запропоновано математичну модель, в якій корона описується через нелінійну ємність  $C_{cor}(V)$  та нелінійну провідність  $G_{cor}(V)$ , що враховують амплітудно-частотні властивості коронних процесів, а також вплив атмосферних умов (щільність повітря, вологість, дощ, туман) та стан поверхні проводу. На основі моделі визначено зміну хвильових параметрів лінії — еквівалентної ємності, шунтувальної провідності, власної частоти та добротності в умовах коронування. Показано, що коронний розряд відіграє роль нелінійного демпфуючого елемента, знижуючи значення резонансних перенапруг з 1,6–1,8 до 1,3–1,4  $U_n$ , але не усуває самих умов виникнення резонансу. Встановлено фізичні причини зсуву власної частоти коливального контуру «лінія – автотрансформатор – шунтувальний реактор» та визначено діапазони напруг та погодних умов, за яких корона суттєво змінює динаміку перехідних процесів. Результати моделювання демонструють необхідність обов'язкового врахування корони при аналізі електромагнітних перехідних процесів в паузі однофазного автоматичного повторного вмикання 330–750 кВ. Встановлено, що корона утворює додатковий дисипативний канал розсіювання енергії, який знижує добротність резонансного контуру та суттєво впливає на протікання перехідних процесів. Корона виконує подвійну роль: гасіння коливання та зниження рівня перенапруг, але водночас спричиняє небажані втрати активної потужності. Запропонована модель може бути інтегрована в середовище MATLAB/Simscap для детального аналізу процесів під час паузи однофазного автоматичного повторного вмикання.

**Ключові слова:** математична модель коронного розряду; резонансні перенапруги; приріст ємності; резонансний контур; резонансна частота.

**Вступ.** Магістральні повітряні лінії (ПЛ) електропередавання 330–750 кВ є ключовими елементами об'єднаної енергосистеми України, особливо в умовах її інтеграції до ENTSO-E та зростання частки перетоку на великі відстані. Поряд із задачами забезпечення статичної та динамічної стійкості все більшої актуальності набувають питання надійності ізоляції, обмеження перенапруг і мінімізації втрат електричної енергії. Одним із суттєвих факторів, що одночасно впливають як на енергоефективність, так і на режими роботи магістральних ПЛ, є коронний розряд на проводах. Традиційно корону розглядають переважно як джерело додаткових активних втрат потужності та радіоперешкод, тоді як її вплив на перехідні процеси та резонансні перенапруги часто спрощується або зовсім ігнорується [1–7].

У реальних умовах експлуатації ПЛ корона має виражений нелінійний характер і суттєво змінює хвильові параметри лінії: еквівалентну ємність, шунт-провідність, добротність коливального контуру. Це особливо критично в режимах комутаційних дій, зокрема під час однофазного автоматичного повторного вмикання (ОАПВ), коли відключена фаза утворює разом з автотрансформаторами, шунтувальними реакторами та міжфазними ємностями резонансний контур. За відсутності адекватного урахування корони можуть виникати резонансні

перенапруги, здатні досягати 1,6–2,0 $U$  і більше, що підвищує ймовірність пошкодження ізоляції, помилкових спрацьовувань релейного захисту і автоматики та прискореного старіння обладнання.

Сучасні підходи до розрахунку втрат на коронування та оцінювання їх впливу на режими роботи ПЛ здебільшого базуються на спрощених емпіричних залежностях, у яких корона представлена у вигляді додаткової сталої провідності або усередненої поправки до поперечних параметрів лінії. Такі моделі є прийнятними для довгострокових енергетичних балансів, однак виявляються недостатніми для аналізу швидкоплинних електромагнітних перехідних процесів, де важливими є врахування нелінійності провідностей коронного розряду, амплітудно-частотної залежності і миттєвий характер розвитку коронного розряду. У результаті при моделюванні резонансних перенапруг у паузі ОАПВ або під час керованої комутації автотрансформаторів вплив корони часто знижується або враховується некоректно [5–15].

**Постановка проблеми.** У реальних умовах корона змінює хвильові параметри ПЛ — еквівалентну ємність, добротність та коефіцієнт демпфування — і, відповідно, параметри резонансного контуру в паузі ОАПВ. Наявні моделі не враховують стохастичну природу корони, залежність її параметрів від напруги,

© В. Г. Кузнецов, Ю. І. Тугай, В. В. Кучанський, 2025



Ця робота ліцензується відповідно до *Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)*  
**Конфлікт інтересів:** Автори заявили про відсутність конфлікту

погоди та стану провідника, а також не відтворюють динамічний вплив на коливальні процеси. Це призводить до систематичного недооцінювання рівнів можливих перенапруг, що створює ризики для ізоляції, роботи нелінійних обмежувачів перенапруг та правильності розрахунків моментів керованої комутації й тривалості паузи ОАПВ.

Тому актуальним є створення математичної моделі коронного розряду, придатної для аналізу електромагнітних перехідних процесів, яка б описувала його нелінійні та стохастичні властивості та дозволяла оцінювати вплив корони на резонансні перенапруги в магістральних мережах надвисокої напруги.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У сучасних дослідженнях коронного розряду основна увага приділяється його впливу на втрати активної потужності, електромагнітні завади та електричну міцність елементів повітряних ліній надвисокої напруги. У роботах [1–4, 8, 9, 16] досліджено умови початку корони, вплив геометрії розщеплених проводів, висоти прокладених ділянок траси ПЛ над рівнем моря, пилу, дощу та туману на втрати активної потужності на коронування для ліній 330–750 кВ. Показано, що погодні та атмосферні фактори істотно змінюють напруженість електричного поля та поріг коронування, що необхідно враховувати під час проектування та експлуатації ЛЕП.

Значний розвиток отримали методи діагностики та вимірювання корони. У працях [2, 7, 11, 14, 17] запропоновано застосування ультрафіолетової візуалізації, цифрової обробки зображень, антенного способу вимірювання і методів глибокого навчання штучних нейронних мереж для класифікації та кількісної оцінки коронних розрядів на ізоляторах і відкритих струмопровідних частинах. Роботи [9, 10] присвячені чисельному визначенню напруги початку корони для різних електродних конфігурацій, що створює основу для інженерних методик оцінювання коронних режимів.

Інтеграція коронних втрат у розрахунки режимів електроенергетичних систем розглядається в роботах [5, 12, 18]. Показано, що корона впливає не лише на енергетичні втрати, а й на теплові режими ліній та умови електромагнітної стійкості обладнання. У класичних джерелах [13, 15, 19] узагальнено теорію коронного розряду, методи розрахунку втрат та нормативні підходи до урахування корони в технічних стандартах, однак корона зазвичай вводиться у вигляді усередненої шунт-провідності без урахування її динамічної нелінійності. Публікації [6, 15, 16] відображають еволюцію підходів до вибору перерізу й конфігурації проводів ультрависокої та надвисокої напруги з урахуванням корони, електричної міцності, втрат та екологічних обмежень.

У вітчизняних дослідженнях [20–25] істотну увагу приділено перенапругам, несиметричним режимам та резонансним явищам у магістральних мережах 330–750 кВ. Показано, що коронний розряд може знижувати кратність внутрішніх перенапруг за рахунок демпфувального ефекту, проте не усуває фізичних

умов резонансу [20–22]. Разом із тим питання динамічного урахування корони в імітаційних моделях для аналізу режимів ОАПВ залишаються недостатньо опрацьованими, що обґрунтовує актуальність представленого в роботі підходу.

**Метою статті** є розроблення математичної моделі коронного розряду, придатної для використання в розрахунках електромагнітних перехідних процесів у повітряних лініях 330–750 кВ, та оцінювання його впливу на формування, амплітуду й демпфування резонансних перенапруг у режимах однофазного автоматичного повторного вмикання. Запропонована модель має забезпечити відтворення нелінійної, напругозалежної та метеочутливої поведінки корони через зміну еквівалентної ємності та шунт-провідності лінії, що дозволяє підвищити точність аналізу комутаційних перенапруг і розробити критерії їх допустимості з урахуванням реальних умов експлуатації.

**Методика оцінювання впливу коронного розряду.** Для досягнення поставленої мети передбачено визначити фізичні закономірності утворення коронної оболонки навколо провідників і встановити її еквівалентне електричне представлення у вигляді нелінійної ємності або шунт-провідності, величина яких залежить від миттєвого значення напруги та умов навколишнього середовища. Розроблено модель динамічної зміни ємності  $C_{cor}(V)$ , що враховує напругу, густину повітря, вологість і стан поверхні провідників, а також дозволяє відтворити часову еволюцію процесів іонізації та рекомбінації в коронному шарі. На основі цієї моделі виконано оцінювання впливу коронування на перехідні процеси та резонансні явища в магістральних лініях електропередавання під час комутаційних режимів, зокрема в паузі ОАПВ. Встановлено, що корона відіграє роль демпфувального чинника, який знижує добротність коливального контуру системи «лінія – автотрансформатор – реактор» і сприяє зменшенню амплітуди резонансних перенапруг, не порушуючи умов резонансу [20–24].

Коронування зумовлює нелінійні активні втрати та провідність до землі, які:

- зменшують добротність контуру «індуктивність обмоток/реакторів – ємність лінії»;
- демпфують коливання під час паузи ОАПВ, але не усувають сам факт резонансу (лінія залишається в резонансі).

Тому у часовій області корона моделюється як напруго-залежна шунтувальна провідність  $G_{cor}(V)$  (або еквівалентний активний опір) з порогом вмикання, розподілена вздовж ПЛ.

Використати перевірені інженерні формули (типу Піка/Петерсона–Паркера) [1–5] для критичного градієнта на поверхні провідника з поправками:

- $\delta_{air}$  – густина повітря (висота/температура/тиск);
- $k_w$  – погодний фактор (сухо/дош/туман), коефіцієнт погодних умов (1 – сухо, 2...5 – дош/туман);

- $m_{sm}$  – стан поверхні (шорсткість, забруднення);
- $f$  – частота мережі;
- вплив пучка: еквівалентний радіус  $r_{eq}$  та крок розщеплення.

На прольотах з меншим провисом, у дощ/туман та для грубішої поверхні розщепленого проводу корона починається коли напруга досягає нижчих значення. Після визначення порогу, втрати на корону моделювались, як функцію напруги:

$$P_{cor}(V) = \begin{cases} 0, & |V| \leq V_{cor,th} \\ f(|V|, f_{sys}, r_{eq}, \delta_{air}, k_w, m_s), & |V| > V_{cor,th} \end{cases}; \quad (1)$$

де  $f(|V|)$  – обрана наближена формула для питомих втрат (Вт/км на фазу) з урахуванням частоти мережі та геометрії розщепленої фази.

Для застосування в імітаційній моделі вводимо еквівалентну провідність корони:

$$G_{cor}(V) \approx \frac{P_{cor}(V)}{|V|^2}; \quad (2)$$

яка може бути задана кусково-лінійною залежністю у гілці секції ПЛ. За потреби у функцію може бути додана інерційність ввімкнення корони, як просто першопорядкову ланку.

$$\tau_{цик} \dot{G}_{cor} + G_{cor} = G_{cor}(V); \quad (3)$$

Після появи корони частина енергії поля розсіюється у вигляді активних втрат. Згідно з експериментально-емпіричними залежностями, питома потужність втрат на корону (Вт/км·фаза) може бути описана рівнянням:

$$P_{cor} = Kf(V_{\phi} - V_{кр})^2; \quad (4)$$

де  $K$  – експериментальний коефіцієнт, який враховує стан атмосфери, кількість розщеплених проводів у пучку, висоту підвісу;

$V_{\phi}$  – фазна напруга;

$V_{кр}$  – критична напруга початку корони.

Для врахування погодних умов та стану поверхні провідника формула набуває вигляду [1, 5, 7]:

$$P_{cor} = 241 \times 10^{-5} (f + 25) \delta^2 r^{0.5} (V_{\phi} - V_{кр})^2 \times 10^{-5} k_w; \quad (5)$$

Для відтворення втрат активної потужності на корону в лінії ПЛ розбивається на  $N$  секцій (10–20 на 100 км). У кожній секції формується гілка

$$Y_{eq} = j\omega C + G_0 + G_{cor}(V); \quad (6)$$

де  $G_0$  – активна провідність без корони.

За таких умов  $G_{cor}(V)$  реалізована у вигляді кусково-лінійної залежності в середовищі Matlab/Smulink. У дійсних умовах коронування має

інерційний характер – напруга включення та виключення процесу різняться. Це враховується введенням гістерезису у функцію  $G_{cor}(V)$

$$G_{cor}(V, t) = f(V, \dot{V}, t; \tau_{on}, \tau_{off}); \quad (7)$$

де  $\tau_{on}, \tau_{off}$  – часові сталі наростання та спаду коронного струму (1–10 мс).

Запропонована аналітична модель нелінійної ємності  $C_{cor}(V)$  та провідності  $G_{cor}(V)$  дозволяє відтворювати вплив коронного розряду на хвильові параметри ПЛ у часовій області. Врахування цих залежностей підвищує точність моделювання перенапруг і струмів у комутаційних режимах, особливо під час ОАПВ, а також забезпечує можливість оцінки енерговитрат на корону в режимі реального часу.

У процесі коронування навколо провідника формується плазмова оболонка, яка змінює розподіл електричного поля та фактично збільшує ефективний радіус провідника. Це призводить до приросту еквівалентної ємності повітряної лінії, величина якого визначається як геометричними параметрами (зміна потенціальної конфігурації поля), так і диференційною реакцією плазми на миттєве значення напруги. На рис. 1 представлено порівняння двох підходів до опису приросту ємності: геометричного приросту (внаслідок розширення радіуса активного електричного поля) та

диференційного приросту  $\Delta C_{cor}(V) = \frac{dQ}{dV}$ , який відтворює миттєвий нелінійний характер корони. Видно, що за сухої погоди приріст ємності є незначним і плавним, тоді як у дощових умовах виникають різкі зміни  $C_{cor}(V)$ , що свідчить про сильну нелінійну залежність та інтенсивніший вплив корони на хвильові параметри лінії.

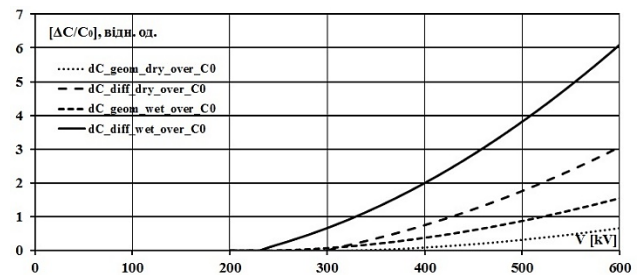


Рисунок 1 – Приріст ємності при коронуванні: геометричний та диференційний (суха погода/дощ)

У паузі ОАПВ відключена фаза повітряної лінії утворює разом з індуктивністю обмоток автотрансформатора та реакторів коливальний контур, у якому можуть розвиватися резонансні або резонансні перенапруги. У класичній моделі без урахування коронного розряду еквівалентні параметри лінії описуються постійними величинами, що призводить до високої добротності контуру  $Q$  та слабого демпфування коливань. За таких умов навіть відносно невеликий початковий збурювальний імпульс (наприклад, залишковий заряд на ємності відключеної

фази) може викликати наростання перенапруг до рівнів  $U_{max}/U_n = 1.6 \div 2.0$ .

**Амплітудно-частотні характеристики резонансного контуру з урахуванням коронування.** Розглянуто еквівалентний резонансний контур, який формується в паузі ОАПВ між відключеною фазою повітряної лінії, індуктивністю обмоток автотрансформатора та, за наявності, шунтувальними реакторами [20]. Передатна функція за напругою, наприклад від збурювального джерела до напруги на відключеній фазі, має класичний вигляд коливальної ланки другого порядку:

$$H_0(j\omega) = \frac{U(j\omega)}{U_{ex}(j\omega)} = \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 + j2\zeta \frac{\omega}{\omega_0}}; \quad (8)$$

де  $\omega_0 = 1/\sqrt{L_{eq}C_0}$  — власна кутова частота,

$\zeta$  — коефіцієнт демпфування, пов'язаний з добротністю  $Q_0 \approx \frac{1}{2\zeta}$ .

Амплітудно-частотна характеристика (АЧХ)  $H_0(j\omega)$  за умов малого демпфування має виражений гострий максимум у околі  $\omega_0$ , що зумовлює можливість виникнення резонансних перенапруг при наявності гармонічного або імпульсного збурення.

АЧХ резонансного контуру для трьох режимів коронування подано на рис. 2. Для випадку без корони кривій відповідає висока добротність контуру: спостерігається різко виражений резонансний пік у ділянці нормованої частоти  $f/f_0 \approx 1$ , а модуль передатної функції  $|H(j\omega)|$  досягає максимальних значень. Це вказує на здатність коливального контуру до значного підсилення резонансних перенапруг за мінімального демпфування.

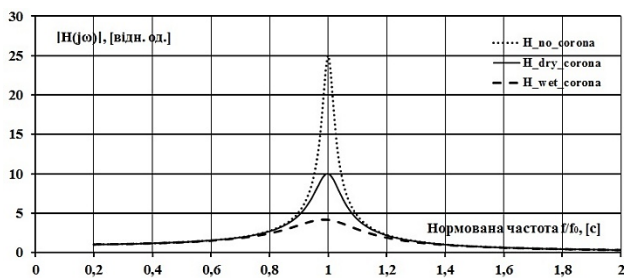


Рисунок 2 – АЧХ резонансного контуру для випадків без корони, з урахуванням сухої корони та корони під час дощу/туману (нормована частота  $f/f_0$ , модуль передатної функції  $|H(j\omega)|$ )

У режимі сухої корони резонансний пік істотно зменшується, ширина смуги збільшується, що свідчить про зростання загальних втрат і зменшення добротності. Крива стає «плоскішою», а максимум  $|H(j\omega)|$  знижується — відповідно, рівень можливих перенапруг у перехідних режимах зменшується.

Найбільше згладжування резонансної характеристики відбувається за умов дощу або туману: нелінійна диференційна провідність коронного шару

значно зростає, унаслідок чого контур демонструє різке зменшення пика резонансу та широкую, маловиражену частотну характеристику. Це свідчить про сильний демпфувальний вплив корони, що пригнічує коливальні процеси та обмежує пікові перенапруги.

Таким чином, графіки, які наведено на рис. 2 підтверджує, що корона суттєво модифікує частотні властивості системи: за рахунок збільшення нелінійних шунт-провідностей і ємності зменшується добротність  $Q'$ , згладжується резонансний максимум та значно знижується потенційний рівень резонансних перенапруг. Це є критичним під час аналізу режимів ОАПВ та оптимізації моменту керованої комутації.

У разі врахування коронування провідників еквівалентна схема лінії в паузі ОАПВ доповнюється нелінійною ємністю  $C_{cor}(V)$  та нелінійною шунт-провідністю  $G_{cor}(V)$ , які активуються при досягненні напруженості електричного поля на поверхні проводу вище критичної  $E_{кр}$ , або напруги фази вище порогової  $V_{кр}$ . У цьому режимі корона призводить до збільшення еквівалентної ємності фази

$$C_{eq} = C_0 + C_{cor}(V); \quad (9)$$

Тоді власна частота контуру зі збуренням:

$$\omega_0' = 1/\sqrt{L_{eq}C_{eq}}; \quad (10)$$

Добротність:

$$Q' = \frac{1}{R_{eq,eff}} \sqrt{\frac{L_{eq}}{C_{eq}}}; \quad (11)$$

Коефіцієнт демпфування:

$$\zeta' = \frac{1}{2Q'}; \quad (12)$$

У випадку коронування проводів:

- $C_{eq}$  зростає (за рахунок  $C_{cor}(V)$ ), що призводить до зменшення власної частоти  $f_0' = \frac{\omega_0'}{2\pi}$  —

резонансний пік АЧХ зміщується в бік нижчих частот;

- $G_{eq}$  суттєво зростає, особливо у вологу погоду (дощ, туман), що приводить до збільшення демпфування ( $\zeta' > \zeta_0$ ) та зменшення добротності  $Q'$ .

Амплітудно-частотна характеристика резонансного контуру з урахуванням корони набуває вигляду:

$$H_0(j\omega) = \frac{U(j\omega)}{U_{ex}(j\omega)} = \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0'}\right)^2 + j2\zeta' \frac{\omega}{\omega_0'}}; \quad (13)$$

Графічно це означає, що:

- максимум  $|H_0(j\omega)|$  зміщується від  $\omega_0$  до  $\omega_0' < \omega_0$ ;

- пікова амплітуда резонансної кривої зменшується (порівняно з варіантом без корони);

- «гострота» резонансного піка згладжується, АЧХ стає більш «приплюснутою».

З точки зору резонансних перенапруг у паузі ОАПВ, це проявляється так:

**1. Без врахування корони.** При збудженні контуру імпульсним або квазіперіодичним збуренням (залишковий заряд, комутаційні імпульси) і при збігу частоти збудження з власною частотою  $\omega_0$  амплітуда напруги на відключеній фазі може зростати до

$$\frac{U_{\max}}{U_n} \approx 1.6 - 2.0 \quad (14)$$

**2. З урахуванням корони (суха погода).** Коли напруга в контурі перевищує  $V_{кр}$ , вмикається коронна ємність і провідність. Внаслідок збільшення  $C_{eq}$  і  $G_{eq}$  резонансний пік знижується, і для тих самих початкових умов тобто корона виконує функцію нелінійного обмежувача амплітуди.

$$\frac{U_{\max}}{U_n} \approx 1.3 - 1.5 \quad (15)$$

**3. З урахуванням корони (дощ, туман).** За підвищеної вологості збільшуються еквівалентні  $C_{cor}(V)$ ,  $G_{cor}(V)$ . В такому випадку це ще більше знижує  $f_0$  та  $Q$ , і резонансні перенапруги можуть бути обмежені до

$$\frac{U_{\max}}{U_n} \approx 1.2 - 1.3 \quad (16)$$

Слід зауважити при цьому суттєво зростають активні втрати та погіршується енергоефективність. Важливо підкреслити, що корона не усуває самі умови резонансу: положення частотного піка змінюється, його висота падає, але при певній комбінації параметрів ( $C_{eq}$ , режим напруги, пауза ОАПВ, залишковий заряд) система все одно може працювати в резонансних умовах. У цьому разі корона лише обмежує максимальну амплітуду коливань, але не призводить до повного виключення небезпечних перенапруг.

Таким чином, амплітудно-частотний аналіз резонансного контуру з урахуванням коронування провідів показує, що:

- корона змінює власну частоту й добротність коливального контуру;
- знижує амплітуди резонансних перенапруг, але не ліквідує резонансну природу процесу;
- її вплив є суттєвим і має бути обов'язково врахований при розрахунках резонансних перенапруг, оптимізації параметрів ОАПВ та налаштуванні пристроїв керованої комутації автотрансформаторів у мережах 330–750 кВ.

Осцилограми миттєвої напруги  $u(t)$  для трьох режимів демпфування резонансного контуру наведено на рис. 3. У разі відсутності корони (висока добротність

контуру, мале затухання) спостерігаються виражені резонансні коливання з повільним зменшенням амплітуди, що призводить до значних перших максимумів напруги. Додавання сухої корони підвищує шунт-провідність і нелінійний приріст ємності, завдяки чому контур отримує додаткове демпфування, а коливання затухають істотно швидше. Найбільш інтенсивний демпфувальний ефект спостерігається за умов дощу або туману: зростання диференційної провідності корони зумовлює значне зниження добротності, тому амплітуда перших піків різко зменшується, а коливання згасають упродовж перших циклів.

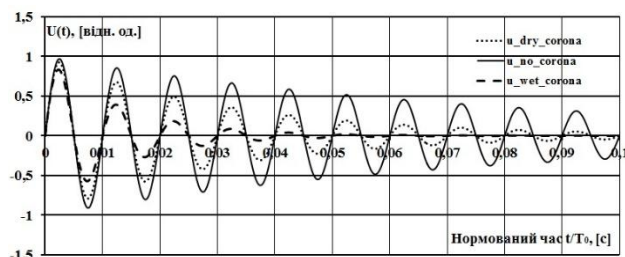


Рисунок 3 – Осцилограми миттєвої напруги  $u(t)$  для трьох режимів демпфування резонансного контуру: без корони (висока добротність, мале затухання), з урахуванням сухої корони (помірне демпфування) та корони під час дощу/туману (сильне демпфування)

Таким чином, на рис. 3 наведено, що збільшення нелінійної провідності й ефективної ємності корони прямо впливає на динаміку перехідного процесу: чим інтенсивніше коронування, тим швидше відбувається затухання та тим меншою стає амплітуда резонансних перенапруг. Це підтверджує важливість урахування корони в моделях перехідних процесів, особливо при аналізі режимів ОАПВ та оцінюванні резонансних перенапруг.

**Висновок.** Таким чином, проведений аналіз показує, що коронний розряд у паузі ОАПВ слід розглядати не лише як джерело активних втрат, а й як нелінійний елемент демпфування, який змінює еквівалентну ємність та провідність лінії, знижує добротність резонансного контуру та обмежує амплітуди перенапруг, але при цьому не усуває самі умови резонансу. Це вимагає врахування корони при розрахунках перенапруг та при налаштуванні ОАПВ і пристроїв керованої комутації, особливо в мережах надвисокої напруги.

Запропонований підхід до представлення коронного розряду у вигляді нелінійної ємності  $C_{cor}(V)$  дозволяє не лише кількісно оцінювати втрати активної потужності, але й адекватно відтворювати динамічний вплив корони на електричне поле та перехідні процеси у повітряних лініях. Удосконалена модель забезпечує підвищену достовірність розрахунків резонансних перенапруг і дає змогу враховувати демпфувальний ефект корони під час комутаційних режимів, зокрема у паузі ОАПВ. Отримані результати створюють основу для подальшого розвитку методів оптимізації режимів магістральних мереж з урахуванням нелінійних параметрів повітряного середовища.

## Список літератури

- Corona discharge characteristics and size optimization of large fittings for ultra-high voltage transmission lines up to 4800 m / C. Peng et al. *IEEE Open Journal of Industry Applications*. 2025. Vol. 6. P. 799–808. DOI: <https://doi.org/10.1109/ojia.2025.3627507>.
- Borgheti M., Ghassemi M. Separation and classification of corona discharges under low pressures based on deep learning method. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2022. Vol. 29, no. 1. P. 319–326. DOI: <https://doi.org/10.1109/tdei.2022.3146608>.
- Corona onset characteristics of the 750-kV bundle conductor in sand and dust weather in high-altitude area / Y.-P. Liu et al. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2014. Vol. 29, no. 2. P. 615–623. DOI: <https://doi.org/10.1109/tpwr.2013.2271281>.
- UHV AC corona loss measurement and analysis under rain / Y. Liu et al. *2009 IEEE 9th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM)*, Harbin, China, 19–23 July 2009. P. 130–133. DOI: <https://doi.org/10.1109/icpadm.2009.5252490>.
- Calculation of electro-thermal coupling power flow considering corona loss of overhead line / H. Qu et al. *2023 9th International Conference on Electrical Engineering, Control and Robotics (EECR)*, Wuhan, China, 24–26 February 2023. P. 104–109. DOI: <https://doi.org/10.1109/eeecr56827.2023.10150113>.
- Zhou Z., Wang W. Exploration of ultra-high-voltage alternating current power transmission technology standardization for global energy interconnection. *2021 6th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE)*, Chongqing, China, 8–11 April 2021. P. 1087–1091. DOI: <https://doi.org/10.1109/acpee51499.2021.9437070>.
- Wang S., Lv F., Liu Y. Estimation of discharge magnitude of composite insulator surface corona discharge based on ultraviolet imaging method. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2014. Vol. 21, no. 4. P. 1697–1704. DOI: <https://doi.org/10.1109/tdei.2014.004358>.
- Research on corona characteristics and type selection of fittings in extra high voltage alternating current substation / Z. Feng et al. *Energy Reports*. 2022. Vol. 8. P. 176–186. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.10.290>.
- Comparison of corona effect prediction criteria on sphere-plane configuration / M. De La Hoz et al. *High Voltage*. 2024. Vol. 9, no. 4. P. 957–969. DOI: <https://doi.org/10.1049/hve2.12476>.
- Numerical calculation of the negative onset corona voltage of high-voltage direct current bare overhead transmission conductors / Z.-X. Li et al. *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2010. Vol. 4, no. 9. P. 1009–1015. DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2009.0730>.
- Effects of different factors on electrical equipment UV corona discharge detection / Z. Li et al. *Energies*. 2016. Vol. 9, no. 5. 369. DOI: <https://doi.org/10.3390/en9050369>.
- Assessment of the effect of corona discharge on synchronous generator self-excitation / H. A. Al Issa et al. *Energies*. 2022. Vol. 15, no. 6. 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15062024>.
- Maruvada P. S. Corona Performance of High Voltage Transmission Lines (Electronic & Electrical Engineering Research Studies. High-Voltage Power Transmission Series, 3.). Taylor & Francis Group, 2000. 310 p.
- Short-term transmission system losses forecast based on supervised machine learning / I. Sudic et al. *2020 International Conference on Smart Systems and Technologies (SST)*, Osijek, Croatia, 14–16 October 2020. P. 199–204. DOI: <https://doi.org/10.1109/sst49455.2020.9264037>.
- Research on section and split way of conductors for UHVAC transmission project / Q.-F. Wan et al. *Gaodianya Jishu/High Voltage Engineering*. 2008. Vol. 34, no. 3. P. 432–437.
- Corona onset characteristics of bundle conductors in UHV AC power lines at 2200 m altitude / S. Huang et al. *Energies*. 2018. Vol. 11, no. 5. 1047. DOI: <https://doi.org/10.3390/en11051047>.
- Кучанський В. В., Зайцев Є. О., Коваленко О. М. Аналіз експериментальних оцінок втрат потужності на коронування повітряних міжсистемних ліній електропередавання. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2024. Т. 175, № 4. С. 22–29. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2024-175-4-22-29>.
- Sulakov S. I. The cross-border trade impact on the transmission losses. *2017 15th International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA)*, Sofia, Bulgaria, 1–3 June 2017. P. 115–118. DOI: <https://doi.org/10.1109/elma.2017.7955413>.
- Quantifying and mitigating electrical and environmental impacts of corona discharge / A. M. Zoba et al. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. 41165. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-26521-z>.
- Кузнецов В. Г., Тугай Ю. І., Кучанський В. В. Вплив коронного розряду на кратність внутрішніх перенапруг у магістральних електричних мережах. *Технічна електродинаміка*. 2017. № 6. С. 55–60. DOI: <https://doi.org/10.15407/teched.2017.06.055>.
- Тугай Ю. І., Лиховид Ю. Г., Кучанський В. В. Перенапруги в несиметричних режимах магістральних електричних мереж: монографія. Одеса: Видавничий дім «Гельветика», 2025. 132 с.
- Кузнецов В. Г., Тугай Ю. І., Кучанський В. В. Аномальні перенапруги в магістральних електричних мережах з джерелами спотворень: монографія. Одеса: Видавничий дім «Гельветика», 2025. 170 с.
- Modes of electrical systems and grids with renewable energy sources / V. Kuchanskyi et al. LAMBERT Academic Publishing, 2019. 184 p.
- Кучанський В. В. Критерій виникнення резонансних перенапруг в аномальних режимах ліній електропередач надвисокої напруги. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2016. № 4. С. 51–54.
- Кузнецов В. Г., Тугай Ю. І., Кучанський В. В. Використання штучної нейронної мережі для визначення характеристик аномальних перенапруг. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*. 2012. № 31. С. 5–11.

## References

- C. Peng, L. Xie, X. Pei, X. Dong, and P. Xie, “Corona discharge characteristics and size optimization of large fittings for ultra-high voltage transmission lines up to 4800 m,” *IEEE Open Journal of Industry Applications*, vol. 6, pp. 799–808, 2025, doi: <https://doi.org/10.1109/ojia.2025.3627507>
- M. Borgheti and M. Ghassemi, “Separation and classification of corona discharges under low pressures based on deep learning method,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, no. 1, pp. 319–326, Feb. 2022, doi: <https://doi.org/10.1109/tdei.2022.3146608>
- Y.-P. Liu, L. Zhu, F.-c. Lu, and Z.-j. Huang, “Corona onset characteristics of the 750-kV bundle conductor in sand and dust weather in high-altitude area,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 29, no. 2, pp. 615–623, Apr. 2014, doi: <https://doi.org/10.1109/tpwr.2013.2271281>
- Y. Liu, S. You, Q. Wan, F. Lu, W. Chen, and Y. Chen, “UHV AC corona loss measurement and analysis under rain,” in *2009 IEEE 9th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM)*, Harbin, China, Jul. 19–23, 2009. IEEE, 2009, pp. 130–133, doi: <https://doi.org/10.1109/icpadm.2009.5252490>
- H. Qu, M. Shao, H. Liu, X. Xu, and X. Wu, “Calculation of electro-thermal coupling power flow considering corona loss of overhead line,” in *2023 9th International Conference on Electrical Engineering, Control and Robotics (EECR)*, Wuhan, China, Feb. 24–26, 2023. IEEE, 2023, pp. 104–109, doi: <https://doi.org/10.1109/eeecr56827.2023.10150113>
- Z. Zhou and W. Wang, “Exploration of ultra-high-voltage alternating current power transmission technology standardization for global energy interconnection,” in *2021 6th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE)*, Chongqing, China, Apr. 8–11, 2021. IEEE, 2021, pp. 1087–1091, doi: <https://doi.org/10.1109/acpee51499.2021.9437070>
- S. Wang, F. Lv, and Y. Liu, “Estimation of discharge magnitude of composite insulator surface corona discharge based on ultraviolet imaging method,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 21, no. 4, pp. 1697–1704, Aug. 2014, doi: <https://doi.org/10.1109/tdei.2014.004358>
- Z. Feng et al., “Research on corona characteristics and type selection of fittings in extra high voltage alternating current substation,” *Energy Reports*, vol. 8, pp. 176–186, Nov. 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.10.290>
- M. De La Hoz, P. J. Pieterse, A. Etxegarai, D. Gonzalez, Á. J. Mazon, and D. Uhrlandt, “Comparison of corona effect prediction criteria on sphere-plane configuration,” *High Voltage*,

- vol. 9, no. 4, pp. 957–969, Jul. 2024, doi: <https://doi.org/10.1049/hve2.12476>
10. Z.-X. Li, J.-B. Fan, Y. Yin, and G. Chen, “Numerical calculation of the negative onset corona voltage of high-voltage direct current bare overhead transmission conductors,” *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 4, no. 9, pp. 1009–1015, 2010, doi: <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2009.0730>
  11. Z. Li, L. Li, X. Jiang, J. Hu, Z. Zhang, and W. Zhang, “Effects of different factors on electrical equipment UV corona discharge detection,” *Energies*, vol. 9, no. 5, May 2016, Art. no. 369, doi: <https://doi.org/10.3390/en9050369>
  12. H. A. Al Issa *et al.*, “Assessment of the effect of corona discharge on synchronous generator self-excitation,” *Energies*, vol. 15, no. 6, Mar. 2022, Art. no. 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/en15062024>
  13. P. S. Maruvada, *Corona Performance of High Voltage Transmission Lines (Electronic & Electrical Engineering Research Studies. High-Voltage Power Transmission Series, 3.)*. Taylor Francis Group, 2000.
  14. I. Sudic *et al.*, “Short-term transmission system losses forecast based on supervised machine learning,” in *2020 International Conference on Smart Systems and Technologies (SST)*, Osijek, Croatia, Oct. 14–16, 2020. IEEE, 2020, pp. 199–204, doi: <https://doi.org/10.1109/sst49455.2020.9264037>
  15. Q.-F. Wan, Y. Chen, L.-L. Gu, B.-Q. Wan, and F. Huo, “Research on section and split way of conductors for UHVAC transmission project,” *Gaodiyuan Jishu/High Voltage Engineering*, vol. 34, no. 3, pp. 432–437, 2008.
  16. S. Huang, Y. Liu, S. Chen, G. Zhou, and W. Zhuang, “Corona onset characteristics of bundle conductors in UHV AC power lines at 2200 m altitude,” *Energies*, vol. 11, no. 5, Apr. 2018, Art. no. 1047, doi: <https://doi.org/10.3390/en11051047>
  17. V. V. Kuchanskyy, I. O. Zaitsev, and O. M. Kovalenko, “Analysis of experimental estimates power corona losses on overhead intersystem power transmission lines,” *Visnyk of Vinnytsia Politechnical Institute*, vol. 175, no. 4, pp. 22–29, 2024, doi: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2024-175-4-22-29> (in Ukrainian)
  18. S. I. Sulakov, “The cross-border trade impact on the transmission losses,” in *2017 15th International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA)*, Sofia, Bulgaria, Jun. 1–3, 2017. IEEE, 2017, pp. 115–118, doi: <https://doi.org/10.1109/elma.2017.7955413>
  19. A. M. Zobaa, H. H. Abdelnabi, R. M. Reda, and A. G. Mahmoud, “Quantifying and mitigating electrical and environmental impacts of corona discharge,” *Scientific Reports*, vol. 15, Nov. 2025, Art. no. 41165, doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-26521-z>
  20. V. G. Kuznetsov, Y. I. Tugay, and V. V. Kuchanskyy, “Influence of corona discharge on the internal overvoltages in highway electrical networks,” *Tekhnichna Elektrodynamika*, vol. 2017, no. 6, pp. 55–60, Oct. 2017, doi: <https://doi.org/10.15407/techned2017.06.055> (in Ukrainian)
  21. Yu. I. Tugay, Yu. G. Lykhovyd, and V. V. Kuchanskyy, *Perenaprui v nesymetrychnykh rezhymakh mahistralnykh elektrychnykh merezh [Overvoltages in asymmetric modes of main electric networks]*. Odesa: Publ. House “Helvetica”, 2025. (in Ukrainian)
  22. V. G. Kuznetsov, Yu. I. Tugay, and V. V. Kuchanskyy, *Anormalni spotvoren [Abnormal overvoltages in main electric networks with sources of distortion]*. Odesa: Publ. House “Helvetica”, 2025. (in Ukrainian)
  23. V. Kuchanskyy, A. Nesterko, O. Rubanenko, and I. Hunko, *Modes of Electrical Systems and Grids With Renewable Energy Sources*. LAMBERT Acad. Publ., 2019.
  24. V. V. Kuchanskyy, “Criteria of resonance overvoltages occurrence in abnormal conditions of extra high voltage transmission lines,” *Visnyk of Vinnytsia Polytechnical Institute*, no. 4, pp. 51–54, 2016. (in Ukrainian)
  25. V. G. Kuznetsov, Yu. I. Tugay, and V. V. Kuchanskyy, “Application of artificial neuron network for determination of abnormal overvoltages characteristics on the second order,” *The Proceedings of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine*, no. 31, pp. 5–11, 2012.

Haidiunna (received) 9.12.2025

UDC 621.311.1.001.57

**KUZNETSOV VOLODYMYR** – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine, Chief Researcher of the Department of Optimization of Power Supply Systems of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine; Kyiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5399-2942>; e-mail: [iednasu@ied.org.ua](mailto:iednasu@ied.org.ua).

**TUGAI YURII** – Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Leading Researcher of the Department of Optimization of Power Supply Systems of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine; Kyiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0704-1863>; e-mail: [tugai@gmail.com](mailto:tugai@gmail.com).

**KUCHANSKYI VLADYSLAV** ✉ – Candidate of Technical Sciences (PhD), Senior Researcher, Head of the Department of Power Supply Systems Optimization, Institute of Electrodynamics, National Academy of Sciences of Ukraine; Kyiv, Ukraine; <https://orcid.org/0000-0002-8648-7942>; e-mail: [kuchanskiyvladislav@gmail.com](mailto:kuchanskiyvladislav@gmail.com).

## MATHEMATICAL MODEL OF CORONA DISCHARGE FOR ASSESSING IMPACT ON RESONANT OVERVOLTAGES

This paper presents a mathematical model of corona discharge aimed at quantitatively assessing its influence on resonance overvoltages in extra-high-voltage overhead transmission lines during the dead time of single-phase auto-reclosing. A generalized physico-mathematical representation of the corona phenomenon is proposed, where the discharge is modelled by a nonlinear shunt capacitance  $C_{cor}(V)$  and nonlinear conductance  $G_{cor}(V)$ . The model explicitly accounts for amplitude–frequency dependence, atmospheric conditions (air density, humidity, rain, fog), surface state of conductors, and stochastic properties of corona activity. Based on the developed model, variations of the line’s wave parameters – equivalent capacitance, shunt conductance, natural frequency, and quality factor – are analyzed. It is shown that corona acts as a nonlinear dissipative element that reduces resonance overvoltages from 1.6–1.8 to approximately 1.3–1.4  $U_n$ , while not eliminating the physical conditions for resonance excitation. The study reveals the mechanisms of natural frequency shifts in the “line–autotransformer–shunt reactor” resonant circuit and identifies voltage and weather ranges in which corona significantly modifies the transient behavior. Simulation results demonstrate that corona must be explicitly considered in electromagnetic transient analyses, in the optimization of successive projective approximation routine algorithms, and in the tuning of controlled switching devices in 330–750 kV transmission networks. From an energy viewpoint, corona introduces an additional dissipation channel that lowers the quality factor of resonance circuits and strongly affects transient response, simultaneously providing additional damping and causing undesirable active power losses. The proposed model is suitable for integration into MATLAB/Simscape and electromagnetic transient simulation tools for detailed analysis of transient processes during single-phase auto-reclosing dead time.

**Keywords:** mathematical model of corona discharge; resonant overvoltages; capacitance gain; resonant circuit; resonant frequency.