

Проаналізовано також і застосування рекурентної нейронної мережі. Під час синтезу рекурентної мережі змінювалася кількість зворотних зв'язків та часова затримка сигналу. Зміну кількості нейронів та виду їх активаційної функції не проводили. На рис. 6 зображено результати нейромережевого прогнозування за допомогою рекурентної нейронної мережі для одного з днів роботи насосної станції. Для порівняння на рис. 7 показано результати нейромережевого прогнозування навантаження насосної станції за допомогою одношарової мережі прямого поширення сигналу з такою ж кількістю нейронів у прихованому шарі. І в одному і в другому випадку активаційні функції нейронів – LogSig.

**Висновок.** Проаналізувавши отримані результати, можемо стверджувати, що для побудови нейромережевого предиктора оптимальними є одношарові рекурентна мережа або мережа прямого поширення сигналу з 21 нейроном у прихованому шарі та активаційною функцією виду LogSig.

1. Kosko B. *Neural Networks and Fuzzy Systems*. Englewood Cliffs, NJ, Prentice Hall, 1991. 2. Gil P., Henriques J., Dourado A., Duarte-Ramos H. *Constrained neural model predictive control with guaranteed free offset // Proc. of IECON 2000*. – Nagoya (Japan), 2000. – P. 1991–1996. 3. Hippert H.S., Pedreira C.E., Souza R.C. *Neural Networks for Short-Term Load Forecasting: A Review and Evaluation // IEEE Trans. on Power System*. – 2001. – Vol. 16, No. 1. – P. 44–55. 4. Терехов В.А., Ефимов Д.В., Тюкин И.Ю. *Нейросетевые системы управления*. – М.: Радиотехника, 2002. – 480 с. 5. Stanislaw Osowski. *Sieci Neuronowe w ujeciu algorytmicznym*. – WNT. – Warszawa, 1997. – Wydanie II. – 350 s. 6. Hecht-Nielsen R. *Neurocomputing*. – Addison Wesley, Amsterdam, 1991. 7. Круглов В., Борисов В. *Искусственные нейронные сети. Теория и практика*. – М.: Горячая линия – Телеком, 2002. – 384 с. 8. Arakawa M., Nakayama H., Yun Y.B., Ishikawa H. *Optimum design using Radial Basis Function networks by adaptive range genetic algorithms (Determination of radius in Radial Basis Function networks) // Proc. of IECON 2000*. – Nagoya (Japan). – P. 1219–1224.

УДК 621.314.057

М.С. Сегеда, І.В. Губіліт, О.Б. Дудурич

Національний університет "Львівська політехніка", м. Львів

## ВПЛИВ КОРОНИ НА ПЕРЕНАПРУГИ В ЛЕП 750 КВ

© Сегеда М.С., Губіліт І.В., Дудурич О.Б., 2007

**Розглянуто методику розрахунку перенапруг за допомогою методу, який заснований в основному на врахуванні активних втрат. Встановлено залежність та форму кривої залежності втрат на корону в лініях електропередачі 750 кВ та показано відносне перетворення ємнісної провідності.**

**There are present of method of calculation the Overvoltages from the method an action loss in this article. It's founded the dependence and the shape of dependenc's curve of the loss to crown in transmission lines 750 kV and relative transformation of capacity laying.**

**Постановка проблеми.** Дослідження внутрішніх перенапруг широко відбувалися на початку 50-х років в лініях електропередачі надвисокої напруги (НВН), корона розглядалася як один з основних факторів, що обмежує перенапруги цього виду. Нелінійні втрати на корону уявлялися тоді дієвим засобом демпфування перенапруг. У цей період моделі довгих ліній електропередачі, що є одним з засобів дослідження внутрішніх перенапруг, були оснащені пристроями, що імітують явище корони. Але поступово зацікавлення до цього питання почало зменшуватися: тенденція до зниження рівня ізоляції з ростом номінальної напруги, перехід від

магістральних ліній до ліній з проміжними відборами, насичення ліній пристроями компенсації приводять до обмеження перенапруг усталеного режиму до величин, за яких ефект корони не є істотним чи практично відсутній. Проте залишається ще сфера явищ, де врахування корони необхідне, до них належать деякі види перенапруг під час неповнофазних режимів, ферорезонансні перенапруги на вищих гармоніках, особливо на другій, перенапруги під час КЗ в налаштованій лінії електропересилання. Крім того, останнім часом явище корони привертає до себе увагу як фактор, що збільшує загасання перехідного процесу [4].

**Аналіз останніх досліджень.** Це питання досліджувалося до цього [2, 4], але під час дослідження не було змоги отримати результати високої точності через відсутність на той час обчислювальної техніки.

**Мета роботи.** Дослідити вплив корони на перенапруги в ЛЕП 750 кВ з врахуванням даних новітніх досліджень та використавши можливості сучасних інформаційних технологій.

**Виклад основного матеріалу.** Електромагнітні процеси в лініях електропересилання найточніше описують рівняння в часткових похідних у фазних координатах [1, 3]

$$-\partial \bar{u} / \partial x = r_0 \bar{i} + \partial \bar{\psi} / \partial \bar{i} \partial \bar{i} / \partial t = r_0 \bar{i} + L_0 \partial \bar{i} / \partial t; \quad (1)$$

$$\begin{aligned} -\partial \bar{i} / \partial x &= g_0 \bar{u} + \partial \bar{q} / \partial t = g_0 \bar{u} + \partial \bar{q} / \partial \bar{u} \partial \bar{u} / \partial t = \\ &= g_0 \bar{u} + C_0 \partial \bar{u} / \partial t, \end{aligned} \quad (2)$$

де  $\bar{u} = (u_1, u_2, \dots, u_n)_t$  –  $n$ -вимірний вектор-стовпець напруг проводів щодо землі;  $\bar{i} = (i_1, i_2, \dots, i_n)_t$  –  $n$ -вимірний вектор-стовпець струмів у проводах;  $r_0$  –  $(n \times n)$ -вимірна матриця активних опорів петель “провід-земля” на одиницю довжини;  $L_0$  –  $(n \times n)$ -вимірна матриця власних і взаємних диференційних (динамічних) індуктивностей петель “провід-земля” на одиницю довжини;  $g_0$  –  $(n \times n)$ -вимірна матриця провідностей між проводами ( $i$  та  $j$ ), проводом і землею на одиницю довжини;  $\bar{\psi} = (\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_n)_t$  –  $n$ -вимірний вектор-стовпець потокозчеплень контурів “провід-земля” на одиницю довжини;  $\bar{q} = (q_1, q_2, \dots, q_n)_t$  –  $n$ -вимірний вектор-стовпець зарядів проводів на одиницю довжини;  $C_0$  –  $(n \times n)$ -вимірна матриця власних і взаємних диференційних ємностей на одиницю довжини;  $n$  – кількість проводів лінії електропересилання.

Внутрішні перенапруги в електричних системах виникають внаслідок комутацій в нормальному режимі і аварійних режимах. Фізична природа внутрішніх перенапруг, як правило, не залежить від номінальної напруги системи. В електричних системах з різними номінальними напругами можливі одні і ті самі комутації і відповідні їм процеси, однак кількісна сторона явищ і відношення між можливими амплітудами перенапруг і рівнями ізоляції різні. Роль внутрішніх перенапруг збільшується із збільшенням номінальної напруги, і вони виступають на перший план під час розв’язання питань координації ізоляції та захисту від перенапруг.

За однакової фізичної природи внутрішні перенапруги в пристроях різної номінальної напруги і їх кількісні характеристики різні, це потребує якісного підходу до вивчення перенапруг в лініях електропересилання високої напруги та розроблення захисних засобів.

Як відомо, втрати на корону в ЛЕП складаються з втрат на іонізацію та втрат на нагрівання повітря. Втрати на іонізацію набагато менші від втрат на нагрівання повітря, то для визначення втрат потужності і енергії на корону необхідно виявити механізм руху іонів у зовнішній зоні коронного розряду. Дослідження показали, що процеси у зовнішній зоні належать до явища переносу і характеризуються інтегрально-диференційними рівняннями з частковими похідними першого порядку [4]. Особливістю розв’язання цих рівнянь є те, що граничні умови не можна визначити заздалегідь, оскільки вони формуються по мірі розвитку процесу. Запропоновано для розв’язання рівнянь (1)–(2) використати метод послідовних інтервалів. Відповідно всі

опубліковані аналітичні і числові методи розрахунку корони постійного і змінного струму належать до області загальної корони і є першими наближеннями.

Проте тепер з розвитком інформаційних технологій настала потреба провести точне дослідження втрат на корону, щоб вивчити детально кількісні характеристики впливу корони на режими роботи ЛЕП.

Коронуючий розряд на проводах високовольтних ліній електропередавання збільшує коефіцієнт зв'язку між паралельними проводами, зумовлює деформацію та гасіння імпульсних хвиль, які поширюються вздовж лінії, й обмежує величину внутрішніх перенапруг до порівняно невеликих кратностей відносно робочої напруги. Тому розрахунки перенапруг у лініях електропередавання без врахування корони здебільшого зумовлює значні похибки, істотно знижує їх практичну цінність. Сьогодні наявні методи врахування корони не дуже точні і мало розроблені для використання в задачах оцінки внутрішніх перенапруг.

Складність врахування коронного розряду в лініях електропередавання полягає в тому, що характер і кількісні характеристики фізичного процесу корони залежать від величини та форми кривої напруги на проводах ліній, у той час як поява тієї чи іншої напруги визначається змінними короною параметрами ліній. Взаємний зв'язок перенапруг і параметрів ліній, на яких вони виникають, становить великі труднощі під час розрахунку, навіть, якщо методика врахування корони можна вважати відомою. Зважаючи на те, що така методика частково розроблена тільки для врахування імпульсної корони на фронті хвилі напруги і для періодичних процесів промислової частоти, а для процесів іншого характеру повністю відсутня, то крім задачі врахування корони під час визначення перенапруг потрібно ставити й іншу задачу – визначення характеристик корони за різних форм кривих цих перенапруг.

Для розв'язання другої задачі розроблена еквівалентна схема коронуючої лінії електропередавання, яка достатньою мірою правильно відтворює її змінні параметри для можливо ширшого класу перехідних процесів.

Ми використовуємо для розрахунку перенапруг усталеного режиму метод, який заснований в основному на врахуванні активних втрат. Заступна схема лінії з короною має крім  $L$  та  $C$  додаткові нелінійні елементи – активну провідність  $g$ .

Згідно з даними [4] про втрати потужності в області загальної корони активну провідність корони  $g$ , а також приріст ємнісної провідності  $\omega_{\text{дж}} \Delta C$  можна виразити так:

$$g = b_p (1 - U_{Kp}/U) \quad (3)$$

$$\omega_{\text{дж}} \Delta C = b_p (U/U_{Kp} - 1), \quad (4)$$

де  $b_p$  – кутовий коефіцієнт редукованої характеристики втрат потужності на корону  $P_{Kop}/U = f(U - U_{Kp})$ , що є прямою лінією. За [4]

$$b_p = 0,7 \omega_{\text{дж}} C / (C_e / C - 1); \quad (5)$$

де  $U_{Kp}$  – напруга запалювання загальної корони  $(1,1 \div 1,3)U_\phi$ ;  $C_e$  – еквівалентна ємність об'ємного заряду корони, Ф/км, яка може бути обчислена за формулою

$$C_e = 2\pi\epsilon_0 / \ln(\sqrt{r_p^2 + 2,5kCU_{Kp}/(\delta\epsilon_0\omega)} / R_e), \quad (6)$$

де  $k$  – рухомість іонів, яка для розрахункових умов (хороша погода) приймається такою, що дорівнює  $2200 \text{ см}^2 / \text{кВ} \cdot \text{с}$ ;  $\delta$  – відносна густина повітря.

Для лінії 750 кВ отримуємо такі значення:

$$C_e = 2 \cdot 3,14 \cdot 8,86 \cdot 10^{-9} / \ln(\sqrt{28,284 + 2,5 \cdot 2200 \cdot 1,302 \cdot 10^{-8} \cdot 2,4 / (1 \cdot 8,86 \cdot 10^{-8} \cdot 942,478)} / 18,782) = 3,149 \cdot 10^{-8} \text{ Ф} / \text{км};$$

$$b_p = 0,7 \cdot 8,86 \cdot 10^{-9} \cdot 1,302 \cdot 10^{-8} / (4,122 \cdot 10^{-8} / 1,302 \cdot 10^{-8} - 1) = 3,965 \cdot 10^{-6} \text{ См};$$

$$g = 3,965 \cdot 10^{-6} \cdot (1 - 519,615 \cdot 2 / 750) = 7,54 \cdot 10^{-7} \text{ См};$$

На рис. 1 показана залежність та форма кривої залежності активних втрат на корону в ЛЕП 750 кВ, з графіка можна побачити, що залежність має нелінійний характер

$$\Delta C = b_p / \omega_{дж} (U/U_{кр} - 1) = 3,965 \cdot 10^{-6} / 942,478 (750 / (519,615 \cdot 2) - 1) = 10,508 \cdot 10^{-9}, \Phi / \text{км}.$$

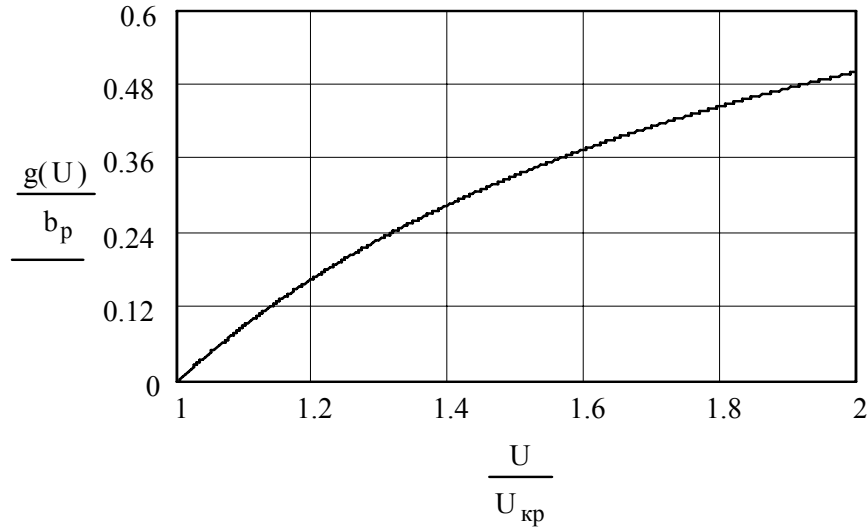


Рис. 1. Залежність  $g/b_p$  від напруги

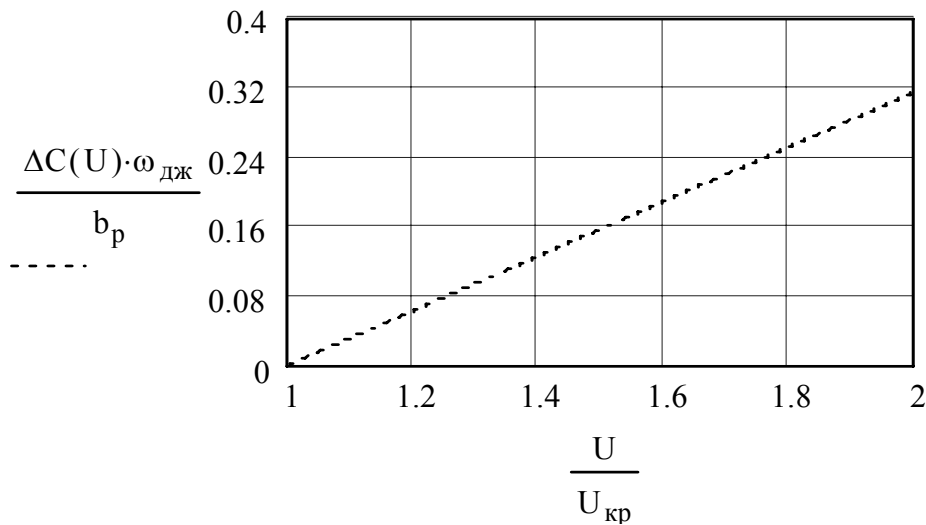


Рис. 2. Залежність  $\Delta C \omega_{дж} / b_p$  від напруги

В середньому відношення  $C_e / C$  змінюється в межах від 2 до 3, причому за даними, наведеними в [4],  $C_e / C$  має тенденцію до збільшення з глибиною розщеплення. Для лінії 750 кВ це відношення дорівнює

$$c = C_e / C_0 = 3,149 \cdot 10^{-8} / 1,166 \cdot 10^{-8} = 2,7. \quad (7)$$

Отже,

$$b_p = (0,35 \div 0,7) \omega_{дж} C. \quad (8)$$

Відношення активної провідності корони до ємнісної провідності лінії (обчисленої, враховуючи геометричну ємність)

$$g/(\omega_{дж} C) = (0,35 \div 0,7)(1 - U_{кр}/U) \quad (9)$$

На рис. 3 побудована крива  $g/b_p = f(U/U_{кр})$ , обчислена за (3), там само зображена залежність  $\omega_{дж} \Delta C / \omega_{дж} C = f(U/U_{кр})$  [4], яка практично виходить прямолінійною і характеризується кутовим коефіцієнтом 0,31. Отже, відносне перетворення ємнісної провідності дорівнює

$$\begin{aligned} \omega_{дж} \Delta C / (\omega_{дж} C) &= 0,31 \cdot 0,7 \cdot (U/U_{кр} - 1) / C_e / C - 1 = 0,22 \cdot (U/U_{кр} - 1) / C_e / C - 1 = \\ &= 0,22 \cdot (750/2 \cdot 519,615 - 1) / 3,166 - 1 = 0,028. \end{aligned} \quad (10)$$

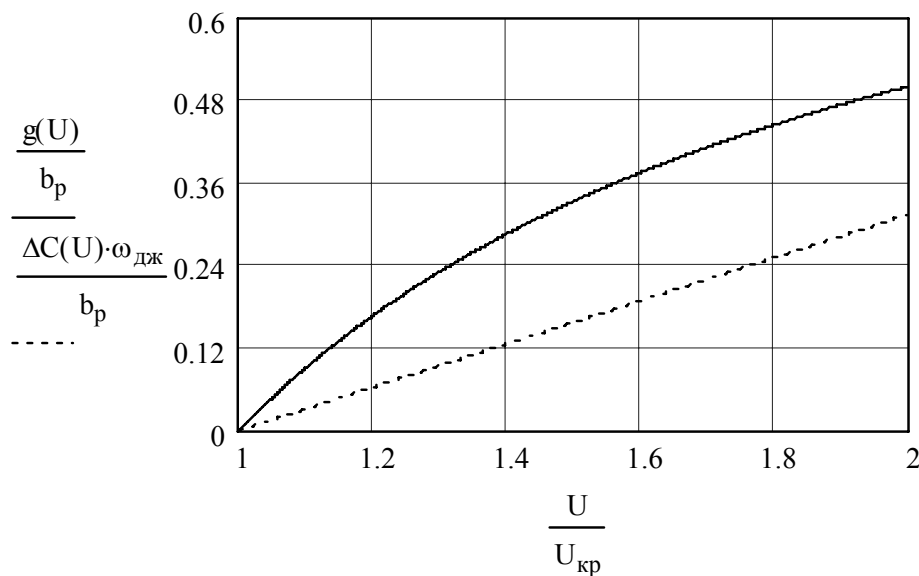


Рис. 3. Залежність провідності корони (суцільна лінія) і приріст ємності корони (пунктир) від напруги

**Висновки.** 1. Обчислено залежність кривої активних втрат на корону в ЛЕП 750 кВ (рис. 1) і доведено, що вона має нелінійний характер.

2. Знайдено співвідношення приросту ємнісної провідності від кутового коефіцієнта редукованої характеристики втрат потужності на корону ЛЕП 750 кВ (рис. 2) і доведено, що воно має лінійний характер і характеризується кутовим коефіцієнтом 0,31.

3. Відносне перетворення ємнісної провідності дорівнює 0,028.

1. Sehedá M.S., Hubilit I.V. *Mathematical modeling of wave processes in transmission lines.* – *Elektroenergetyczne sieci rozdzielcze – SIECI 2004, V Konferencja Naukowo-Techniczna.* 2. Дмоховская Л.Ф. *Инженерные расчеты внутренних перенапряжений в электропередачах.* – М.: Энергия, 1972. – 282 с. 3. Сегеда М.С. *Математичне моделювання хвильових та електромагнетних процесів в електроенергетичних системах: Монографія.* – Львів: Вид-во Нац. ун-ту “Львівська політехніка”, 2002. – 152 с. 4. Левитов В. И. *Корона переменного тока.* – М.: Энергия, 1969.