

**ВПЛИВ КОРОННОГО РОЗРЯДУ НА КРАТНІСТЬ ВНУТРІШНІХ ПЕРЕНАПРУГ  
У МАГІСТРАЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ****Кузнецов В.Г.\***, член-кор. НАН України, **Тугай Ю.І.**, докт.техн.наук,**Кучанський В.В.\*\***, канд.техн.наук

Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна,

e-mail: [tugay@ied.org.ua](mailto:tugay@ied.org.ua)

*У роботі представлено результати досліджень умов розвитку внутрішніх перенапруг в аномальних режимах магістральних електричних мереж. Зокрема вирішується задача оцінки впливу на ці перенапруги коронного розряду ліній електропередачі надвисокої напруги. Шляхом імітаційного моделювання проведені дослідження зміни перенапруг у циклі спрацьовування однофазного автоматичного повторного включення лінії надвисокої напруги. Запропоновано заступні схеми резонансних контурів з урахуванням параметрів корони. Отримано аналітичні залежності довжини лінії надвисокої напруги, коли спостерігається максимум перенапруги на відключеній фазі. Визначено вплив коронування проводів на резонансні процеси в неповнофазних режимах діючих ліній надвисокої напруги. Розраховано величини резонансних перенапруг шляхом застосування експрес-методу та імітаційного моделювання, і виявлені фактори, що найбільше впливають на появу резонансних перенапруг. Виконано верифікацію результатів, отриманих на імітаційній моделі, з результатами натурних експериментів. Бібл. 11, рис. 4, табл. 1.*

**Ключові слова:** внутрішні перенапруги, коронний розряд, аномальний режим, резонансна довжина лінії, однофазне автоматичне повторне включення.

**Загальна характеристика проблеми.** Магістральні лінії електропередачі (МЕМ) напругою 330–750 кВ є основними системоутворюючими лініями в Об'єднаній енергосистемі України та забезпечують видачу електричної енергії від потужних блоків атомних електростанцій, а також необхідний обмін енергією між окремими енергосистемами. Крім того, їх розвиток та ефективна експлуатація – важлива передумова інтеграції Об'єднаної енергосистеми України в європейську енергосистему в майбутньому [3,4,8]. Саме тому, пошкодження таких ліній чи обладнання, що забезпечує їхне приєднання до енергосистеми, є серйозною системною аварією, яка може викликати розпад об'єднаної системи на окремі частини, де буде існувати дефіцит чи надлишок генеруючих потужностей, і, відповідно, спричинити відключення споживачів у дефіцитних регіонах та зупинки блоків електростанцій у надлишкових регіонах. Звісно, такий аномальний режим магістральної електричної мережі буде суттєво відрізнятися від нормального [3, 4]. Отже, попередження виходу з ладу лінії електропередачі надвисокої напруги (ЛЕП НВН) – важлива наукова проблема з точки зору надійності електропостачання і забезпечення задовільних показників якості та ефективності функціонування МЕМ.

Однією з основних причин виходу з ладу основного обладнання в магістральній електричній мережі є перенапруги, тобто підвищення величини робочої напруги вище максимально допустимого значення за технічним регламентом [1, 3, 4, 7–11]. Це пояснюється тим, що передбачено порівняно малий резерв ізоляції для складових елементів магістральних електричних мереж через високу вартість ізоляції для надвисокої напруги.

На відміну від перенапруг, що виникають при комутаціях електричних мереж, резонансні перенапруги характерні для режимів, в яких наявні значні відхилення параметрів елементів від проектних величин. У роботі як головний чинник спотворень розглянуто неповнофазний режим роботи ЛЕП НВН. При цьому режимі резонансні кола утворюються розподіленими ємностями ліній та індуктивностями шунтувальних реакторів (ШР) [3, 4]. Але до останнього часу в дослідженнях [9–11] розглядали вплив коронування проводів на процес виникнення та розвитку резонансних перенапруг наближено як ефект обмеження максимальних значень перенапруг у квазістаціонарних режимах.

На проводах ЛЕП НВН практично завжди існує коронний розряд. Коронування проводів при робочій напрузі призводить до втрат енергії та появи польових завад засобам зв'язку, а тому при експлуатації це явище має бути обмеженим [2, 5, 6]. У той самий час при перенапругах корона знижує кратність перенапруг [1], тому вона може розглядатись як позитивний фактор.

Взагалі проблема, пов'язана з урахуванням впливу корони на кратність перенапруг, ускладнюється нелінійними залежностями між параметрами режиму, зовнішніми факторами і характеристиками

---

© Кузнецов В.Г., Тугай Ю.І., Кучанський В.В., 2017

ORCID ID: [\\*http://orcid.org/0000-0002-5399-2942](http://orcid.org/0000-0002-5399-2942); [\\*\\*http://orcid.org/0000-0002-8648-7942](http://orcid.org/0000-0002-8648-7942)

розряду. Характеристики розряду визначають величини параметрів моделі корони. Ці величини змінюються в широких межах і залежать від зовнішніх факторів, зокрема, погодних умов уздовж траси лінії [2, 5, 6]. У роботі величини параметрів моделі корони розраховуються по значеннях факторів впливу, що наведені у [2], і протягом усього процесу моделювання вони вважаються незмінними.

Тому метою даної роботи є оцінка впливу коронного розряду на внутрішні перенапруги у циклі роботи однофазного автоматичного повторного включення діючих ліній електропередачі надвисокої напруги.

**Запропонований підхід до вирішення проблеми.** Для зменшення струмів підживлення вторинної дуги при ліквідації замикання на землю використовують чотирипроменеву схему підключення групи ШР із заземленням нейтральної точки через компенсаційний реактор (КР), призначений для компенсації електростатичної взаємодії фаз при аномальному режимі [1, 3, 4, 9–11]. Якщо дві робочі фази ЛЕП замінити однією еквівалентною [1], то в результаті перетворень отримаємо схему заміщення резонансного кола за наявності коронного розряду (рис. 1).

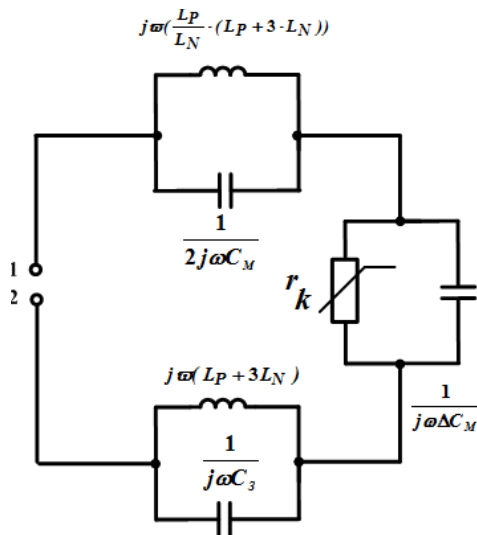


Рис. 1

На рис. 1 позначено:  $L_p$  – індуктивність шунтувального реактора,  $L_N$  – індуктивність компенсаційного реактора. Еквівалентні індуктивності ШР позначено наступним чином:  $j\omega \frac{L_p}{L_N} (L_p + 3L_N)$  – складова, яка компенсує міжфазну ємність  $C_j$ ;  $j\omega(L_p + 3L_N)$  – складова, що компенсує ємність між фазою та землею  $C_C$ . Коефіцієнт перед позначенням міжфазної ємності означає, що відключена фаза має електростатичний зв'язок із двома робочими фазами. На рис. 1 для врахування коронування проводів під'єднана вітка, що містить параметри, які відображають активний опір корони  $r_k$  та приріст ємності  $\Delta C_j$ .

Коло на рис. 1 характеризується змішаним з'єднанням елементів. Умовою виникнення резонансу є рівність нулю

уявної частини вхідного опору  $X_{\hat{A}\hat{O}}$

$$X_{\hat{A}\hat{O}} = \frac{\omega((2C_M + C_3)(L_j + L_E)lL_C\omega^2 - L_j(L_C - L_N) - L_N L_C)}{n\omega^2 l L_C L_j (2C_M + C_3) - L_j - L_C} = \frac{P(\omega)}{Q(\omega)}, \quad (1)$$

де  $l$  – довжина повітряної лінії,  $L_E$  – індуктивність повітряної лінії,  $L_N$  – індуктивність електроенергетичної системи,  $n$  – кількість груп ШР;  $L_M = \frac{L_p}{L_N} (L_p + 3L_N)$  – міжфазна індуктивність ШР та

$L_C = L_p + 3L_N$  – індуктивності між фазою та землею.

У цьому контурі можливе існування і резонансу струму, і резонансу напруги. Для того, щоб знайти резонансні частоти для контуру на рис. 1,  $X_{\hat{A}\hat{O}}$  треба розглянути у вигляді двох поліномів по ступенях  $P(\omega)$  та  $Q(\omega)$ . При неповнофазному режимі повітряної лінії (ПЛ) виникає резонанс напруг

$$P(\omega) = \omega((2C_M + C_3)(L_j + L_E)lL_C\omega^2 - L_j(L_C - L_N) - L_N L_C) \quad (2)$$

або резонанс струмів при неповнофазному режимі ПЛ

$$Q(\omega) = \omega^2 l L_C L_j (2C_M + C_3) - L_j - L_C. \quad (3)$$

Тобто корені рівняння  $P(\omega)$  мають значення частот, які відповідають резонансу напруг, а корені рівняння  $Q(\omega)$  – значення частот, при яких виникає резонанс струмів. Резонанс напруг (як небезпечне явище в електричних мережах) характеризується, перш за все, надструмами в зовнішньому колі, оскільки еквівалентний опір контуру при резонансі напруг мінімальний. У той самий час резонанс струмів характеризується більшими значеннями перенапруг у зовнішньому колі.

Після перетворення виразів з еквівалентними ємностями та індуктивностями отримаємо вираз для визначення резонансних довжин лінії надвисокої напруги

$$l_{\delta\dot{a}\zeta} = n \frac{L_j + L_\zeta}{L_\zeta L_j \omega^2 (2C_M + C_\zeta)}. \quad (4)$$

**Визначення впливу коронування проводів на резонансні процеси.** Позитивний ефект впливу корони на перенапруги [1] зумовлений тим, що на створення корони витрачається активна енергія. При цьому амплітуда перенапруги стає меншою, і резонансний процес швидше згасає. Це перший фактор, що відповідає за зниження величини напруги при неповнофазному режимі. Другий фактор – це процес проходження хвилі перенапруги уздовж дротів ЛЕП НВН, внаслідок якого запалюється імпульсна корона. Вона зумовлює збільшення еквівалентного перетину проводу і, як наслідок, зростання його ємності. І чим більшою є об'ємна характеристика коронного розряду, тим більшою мірою на величини перенапруги впливає відповідна зміна ємності. Графіки залежності параметрів елементів заступної схеми корони від напруги наведено на рис. 2.

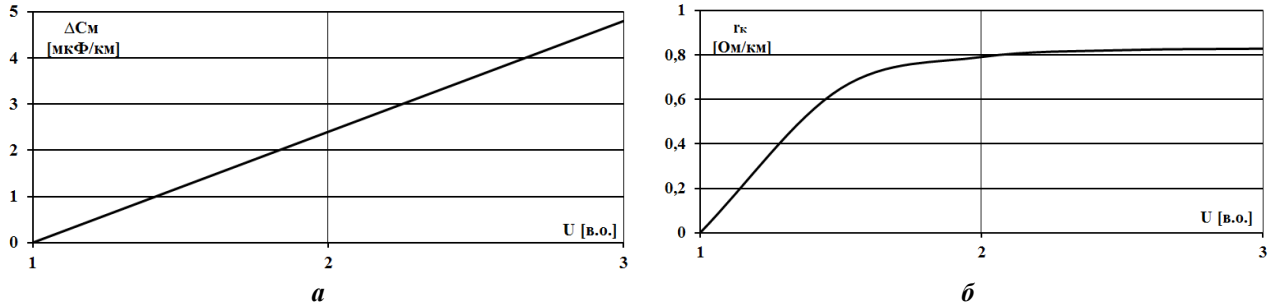


Рис. 2

Контур із нелінійним опором та лінійною ємністю (рис. 1) моделює коронний розряд. Значення параметрів моделі були знайдені у відповідності до [2, 5, 6]

$$r_k = 0.83 \left( 1 - e^{-3.05(U_M^* - 1)} \right), \text{ Ом/км}, \quad \Delta C_j = 2.4(U_M^* - 1), \text{ мкФ/км}, \quad (5, 6)$$

де  $U_M^*$  – напруга, нормована по номінальному значенню  $U_M^* = U_j / U_H$ .

Вираз для визначення резонансної довжини лінії з урахуванням коронного розряду  $l_{\text{рез}}$  можна апроксимувати поліномом, значення коефіцієнтів якого можуть змінюватися у досить широких межах

$$a_1 l_{\delta\dot{a}\zeta} + a_2 l_{\delta\dot{a}\zeta}^2 + a_3 l_{\delta\dot{a}\zeta}^3 + a_4 = 0 \quad (7)$$

Шляхом порівняльного аналізу експериментальних і теоретичних даних для ЛЕП 750 кВ були отримані такі границі зміни значень коефіцієнтів рівняння (7)

$$\begin{aligned} a_1 &= 0.197 - j94.48 \div 0.829 - j38.08; & a_2 &= -1.983 \cdot 10^8 \div -9.93 \cdot 10^9; \\ a_3 &= 1.243 \cdot 10^6 \div 5.021 \cdot 10^7; & a_4 &= 15068.232 \div 7534.116. \end{aligned}$$

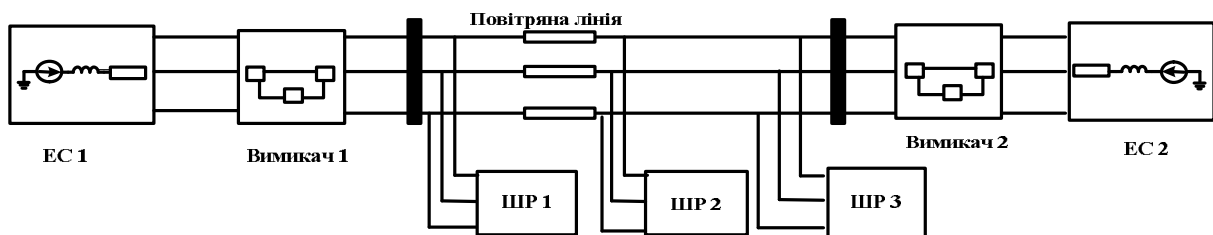


Рис. 3

У статті розглядається цикл однофазного автоматичного повторного включення лінії 750 кВ із встановленими трьома групами ШР 1, ШР 2, ШР 3. Для дослідження електромагнітних комутаційних перехідних процесів була застосована імітаційна модель (рис. 3), розроблена в середовищі MATLAB/SIMULINK. Полюси вимикачів у моделі розглядаються окремо для кожної з фаз: кожний полюс моделюється ідеальним вимикачем. Це дає можливість незалежно змінювати моменти замикання кожного з полюсів під час моделювання. Повітряна лінія моделюється дільницею з розподіленими пара-

метрами з довжиною, що відповідає довжині ЛЕП НВН. Електроенергетична система задається трифазним джерелом напруги з заданими величинами напруги та індуктивності. Для врахування ефекту коронування проводів для моделі розроблено спеціальний програмний блок імітації коронного розряду, який враховує значення напруги та конструкцію фази ЛЕП НВН. Блок підключається паралельно до чотирипроменевої моделі ШР та КР.

При дослідженні резонансних перенапруг у паузі однофазного та трифазного автоматичного повторного включення результати серій розрахунків були верифіковані з реальними осцилограмами інформаційно-діагностичного комплексу «РЕГІНА» [3–4, 7]. Порівняння результатів вказує, що різниця між результатами моделювання (рис. 4, а) та натурального експерименту (рис. 4, б) складає приблизно 5%. Також моделювання процесів зміни напруги дозволяє оцінити вплив коронного розряду на амплітуду резонансних перенапруг (рис. 5). Як видно, при моделюванні аномального режиму ЛЕП НВН без врахування корони отримуємо трикратні величини перенапруг, у той самий час врахування корони зменшує величину очікуваних перенапруг майже вдвічі.

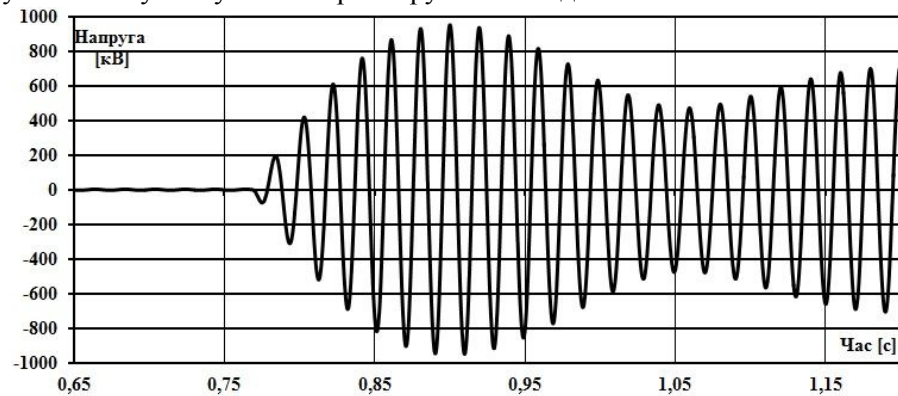


Рис. 4, а

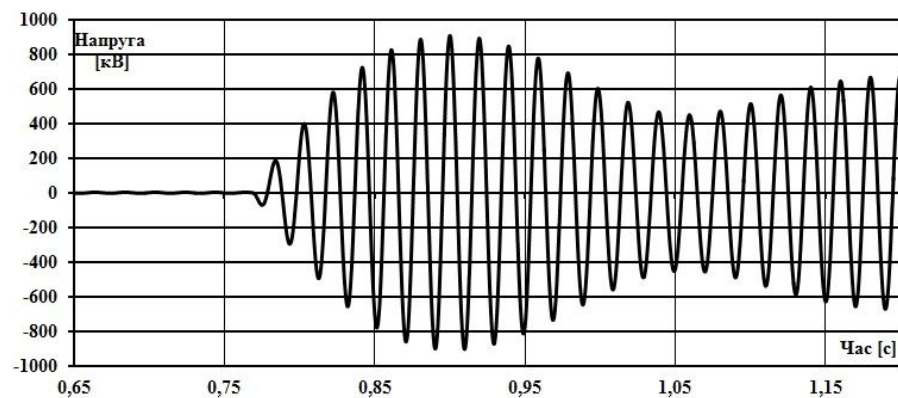


Рис. 4, б

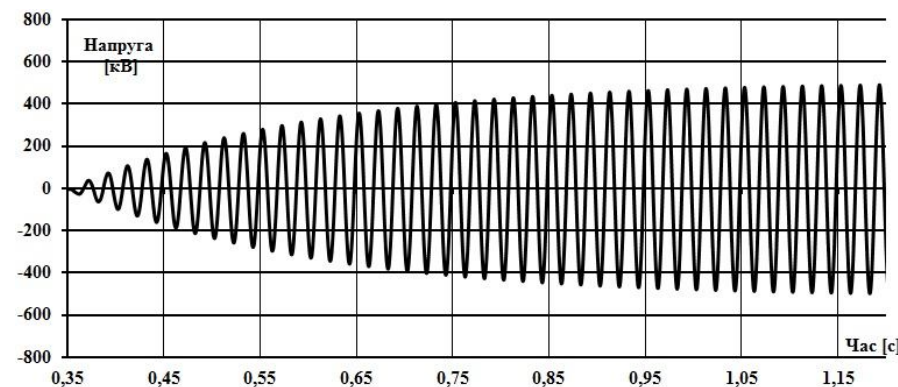


Рис. 5

Для визначення ступеня впливу коронування проводів на резонансні перенапруги були досліджені реальні лінії електропередачі надвисокої напруги з застосуванням експрес методу (4), (7) та імі-

таційної моделі (рис. 3). Результати розрахунків наведено у таблиці, де  $n$  – кількість груп ШР,  $K$  – ступінь компенсації зарядної потужності;  $U_{i\delta 1}$ ,  $U_{i\delta 2}$  – кратність перенапруг без та з врахуванням корони, відповідно;  $l$  – довжина ПЛ.

Назва лінії	$n$	$l$	$l_{\delta\phi}$	$K$	$U_{i\delta 1}$	$U_{i\delta 2}$
ХАЕС–Жешув	3	396	324	1,01	2,18	0,78
ПУАЕС–Ісакча	3	403	325	1,02	2,078	0,58
ПС Київська–РАЕС	2	353	235	0,92	1,56	0,6
Запорізька АЕС–ПС Каховська	1	190	127	0,93	1,085	0,25
ПС Західноукраїнська–ПС Альбертирша	1	136	121	1,04	0,37	0,05
Запорізька АЕС–ПС Дніпровська	1	136	119	1,02	1,61	0,65
ПС Південнодонбаська–ПС Донбаська	1	161	126	1,00	1,86	0,4
ЗАЕС–ПС Південнодонбаська	2	228	324	1,01	0,84	0,2
ПС Донбаська–ПС Запорізька	2	207	325	1,02	1,97	0,72

Як видно з таблиці, зміна параметрів елементів резонансного кола внаслідок коронного розряду не достатня, щоб повністю запобігти появі внутрішніх перенапруг, але їхня кратність суттєво зменшується.

**Висновки.** 1. Вплив коронного розряду на внутрішні перенапруги спричиняє суттєве зменшення їхньої кратності. Тому рекомендується враховувати цей вплив при проектуванні лінії електропередачі НВН, оскільки це дозволяє зменшити витрати за рахунок зниження вимог до основного та захисного обладнання.

2. Зміна параметрів ЛЕП НВН у результаті коронного розряду не запобігає появі перенапруг при однофазному повторному включенні за наявності шунтувальних реакторів. Тому повинні застосовуватися заходи для розлагодження відповідного резонансного кола, зокрема, використання компенсаційного реактора. В той самий час при виборі опору цього реактора бажано враховувати зміну розподіленої ємності лінії внаслідок коронного розряду.

3. Запропоновано методику оцінки впливу коронного розряду, яка дозволяє визначити граничні величини довжин ЛЕП НВН, небезпечних з точки зору можливого резонансу. Якщо довжина ЛЕП, що розглядається, потрапляє в небезпечний діапазон, то необхідно виконати точне моделювання процесів та в разі потреби обрати заходи по запобіганню внутрішнім перенапругам.

1. *Беляков Н.Н., Кадомская К.П., Левинштейн М.Л.* Процессы при однофазном автоматическом повторном включении линий высоких напряжений. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 256 с.

2. *Гашимов А.М., Дмитриев Е.В., Пивчик И.Р.* Численный анализ волновых процессов в электрических сетях. – Новосибирск: Наука, 2003 – 148 с.

3. *Кузнецов В.Г., Тугай Ю.И., Кучанський В.В.* Дослідження впливу транспозиції лінії електропередачі надвисокої напруги на аномальні перенапруги // Технічна електродинаміка. – 2013. – № 6. – С. 51–56.

4. *Кузнецов В.Г., Тугай Ю.И., Кучанський В.В.* Перенапруги при неповнофазному режимі // Технічна електродинаміка. – 2012. – № 2. – С. 40–41.

5. *Тамазов А.И., Коченков П.С.* Влияние числа проводов в фазе на потери электроэнергии от короны в воздушных линиях переменного тока // Электричество. – 2015. – № 4. – С. 12–19.

6. *Тамазов, А.И.* Корона на проводах воздушных линий переменного тока. – М.: Компания Спутник+, 2002. – 316 с.

7. *Kuchansky V.* Criteria of resonance overvoltages occurrence in abnormal conditions of extra high voltage transmission lines // Вісник наукових праць Вінницького національного технічного ун-ту. – 2016. – № 4 – С. 51–54.

8. *Kulyk V., Vishnevskiy S.* Combined models of electric systems normal modes with the allowance for peculiarities of long transmission lines // Вісник наукових праць Вінницького національного технічного ун-ту. – 2012. – № 1. – С. 1–7.

9. *Naumkin I., Balabin M., Lavrushenko N., Naumkin R.* Simulation of the 500 kV SF6 circuit breaker cutoff process during the unsuccessful three-phase autoreclosing / Proceedings of International Conference on power systems Transients, Kyoto, Japan, June 14-17, 2011. – Pp. 5–11.

10. *Naumkin I.* Crash when switching of gas insulated circuit breakers 500–1150 kV overhead line compensated // Электричество. – 2012. – № 10. – С. 22–32.

11. *Zevallos M.E., Tavares M.C.* Single-Phase Auto-Reclosure Studies: Influence of Transversal Parameters of a Transmission System on the Secondary Arc Current Reduction / Proceedings of International Conference on power systems Transients. – Kyoto, Japan, June 14-17, 2011. – Pp. 1–6.



**ВЛИЯНИЕ КОРОННОГО РАЗРЯДА НА КРАТНОСТЬ ВНУТРЕННИХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ  
В МАГИСТРАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ**

**В.Г. Кузнецов**, член-корр. НАН Украины, **Ю.И. Тугай**, докт.техн.наук, **В.В. Кучанский**, канд.техн.наук  
Институт электродинамики НАН Украины,  
пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина, e-mail: [tugay@ied.org.ua](mailto:tugay@ied.org.ua)

*Исследованы условия развития резонансных перенапряжений в аномальных режимах магистральных электрических сетей. Посредством имитационного моделирования проведены исследования изменения перенапряжений в цикле срабатывания однофазного автоматического повторного включения линий сверхвысокого напряжения. Предложена схема замещения резонансного контура с учетом параметров короны. Получены аналитические зависимости для длины линии сверхвысокого напряжения, при которой наблюдается максимум величины перенапряжений на отключенной фазе. Определены влияния коронирования проводов на резонансные процессы в неполнофазных режимах действующих линий сверхвысокого напряжения. Выявлены факторы, которые наиболее влияют на появление резонансных перенапряжений путем применения экспресс-метода с определением резонансных длин линии. Выполнена верификация результатов, полученных на имитационной модели, с результатами натурных экспериментов. Библ. 11, табл. 1, рис. 4.*

**Ключевые слова:** резонансные перенапряжения, коронный разряд, аномальный режим, резонансная длина линии, однофазное автоматическое повторное включения.

**INFLUENCE OF CORONA DISCHARGE ON THE INTERNAL  
OVERVOLTAGES IN HIGHWAY ELECTRICAL NETWORKS**

**Kuznetsov V.G., Tugay Y.I., Kuchansky V.V.**

**Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,  
pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine, e-mail: [tugay@ied.org.ua](mailto:tugay@ied.org.ua)**

*The conditions of development resonance overvoltages in abnormal modes of electrical networks have been studied. Investigations of changing overvoltages on cycle single phase auto reclose in extra high voltage transmission line have been implemented by simulation modeling. Equivalent scheme of resonance circuit with parameters of corona discharge have been composed. The analytical dependencies of line's length in which there have been observed maximum value overvoltages on disconnecting phase have been obtained. Influence of corona discharge on resonance overvoltages in open-phase modes real extra high voltage transmission lines have been investigated. Values of resonance overvoltages and characteristic of line have been obtained by express-method and simulation modeling. The factors which most of all influence on occurrence resonance overvoltages have been identified by using express-method with detecting resonance length of the line. Verification of results which have been obtained by imitation model with result of field experiments has been implemented. References 11, figures 4, table 1.*

**Keywords:** resonance overvoltages, corona discharge, abnormal mode, resonant length of the line, single phase auto reclose.

1. Belyakov N.N., Kadomskaya K.P. Levinshtein M.L Processes with single-phase automatic reclose of high voltage lines. – Moskva: Energoatomizdat, 1991. – 256 p. (Rus)
2. Gashimov A.M., Dmitriev E.V., Pivchik I.P. Numerical analysis of wave processes in electrical networks. – Novosibirsk: Nauka, 2003 – 148 p. (Rus)
3. Kuznetsov V., Tugay Y., Kuchansky V. Investigation of transposition EHV transmission lines on abnormal overvoltages // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2013. – No 6. – Pp. 51–56. (Ukr)
4. Kuznetsov V., Tugay Y., Kuchansky V. Overvoltages in open-phase mode // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2012. – No 2. – Pp. 40–41. (Ukr)
5. Tamazov A.I., Kochenkov P.C. Influence of conductor number in phase on power losses at corona discharge in overhead lines // Elektrichestvo. – 2015. – No 4. – Pp. 12–19. (Rus)
6. Tamazov A.I. Corona discharge in overhead lines. – Moskva: Sputnik+. – 2006. – 316 p. (Rus)
7. Kuchansky V. Criteria of resonance overvoltages occurrence in abnormal conditions of extra high voltage transmission lines // Visnyk naukovykh prats Vinnytskoho Natsionalnoho Tekhnichnoho Universytetu. – 2016. – No 4. – Pp.51–54.
8. Kulyk V., Vishnevskiy S. Combined models of electric systems normal modes with the allowance for peculiarities of long transmission lines // Visnyk naukovykh prats Vinnytskoho Natsionalnoho Tekhnichnoho Universytetu. – 2012. – No 1. – Pp. 1–7.
9. Naumkin I., Balabin M., Lavrushenko N., Naumkin R. Simulation of the 500 kV SF6 circuit breaker cutoff process during the unsuccessful three-phase autoreclosing / Proceedings of International Conference on power systems Transients, Kyoto, Japan, June 14-17, 2011. – Pp. 5–11.
10. Naumkin I. Crash when switching of gas insulated circuit breakers 500-1150 kV overhead line compensated // Elektri-chestvo. – 2012. – No 10. – Pp. 22–32. (Rus)
11. Zevallos M.E., Tavares M.C. Single-Phase Auto-Reclosure Studies: Influence of Transversal Parameters of a Transmission System on the Secondary Arc Current Reduction / Proceedings of International Conference on power systems Transients (IPST 2011). – Kyoto, Japan, 14-17 June, 2011. – Pp. 5–11.  
(URL: [http://ipstconf.org/papers/Proc\\_IPST2011/11IPST011.pdf](http://ipstconf.org/papers/Proc_IPST2011/11IPST011.pdf)).

Надійшла 19.06.2017  
Остаточний варіант 15.08.2017