

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ЛЕП НВН НА АНОРМАЛЬНІ ПЕРЕНАПРУГИ**Ю.І. Тугай**, канд. техн. наук, **В.В. Кучанський**, асп., **Р.В. Пляшко**, магістрІнститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна
E-mail: tugai@ied.org.ua

Метою виконаних досліджень було виявлення факторів, які спричиняють появу в лініях електропередачі надвисокої напруги аномальних режимів, що супроводжуються перенапругами на парних гармонічних складових. Показано, що аномальні перенапруги є наслідком комплексної дії несиметрії та несинусоїдності на параметри режиму. Розроблено математичні моделі для оцінки можливої кратності перенапруг. За допомогою цифрового моделювання визначено фактори, які найбільше за все впливають на виникнення аномальних перенапруг. Отримано залежності аномальних перенапруг від довжини та конструкції лінії, кута вмикання вимикача. Визначено критичні значення параметрів лінії, при яких характеристики перенапруг сягають максимальних значень. Зроблено висновок про необхідність у таких випадках використання спеціальних заходів, оскільки обмеження кратності перенапруги коронним розрядом у цих випадках виявляється недостатнім. Наведено рекомендації щодо впровадження заходів попередження та обмеження аномальних перенапруг. Бібл. 6, рис. 4.

Ключові слова: аномальні перенапруги, неповнофазний режим роботи, резонанс, лінії надвисокої напруги.

На відміну від перенапруг, які виникають у режимах з нормальними значеннями параметрів (наприклад, при виконанні комутацій), аномальні перенапруги характерні для режимів з факторами спотворень параметрів [1, 2]. Під такими факторами спотворень розглянемо одночасний вплив несиметрії та несинусоїдності, спричинені неповнофазним включенням ненавантаженого автотрансформатора (АТ). Як показує досвід експлуатації, такий режим створює умови для появи в лініях електропередачі (ЛЕП) надвисокої напруги (НВН) перенапруг на частотах парних гармонічних складових. Слід зазначити, що можливість виникнення перенапруг на другій гармонічній складовій у електричних мережах взагалі відома досить давно, але визначення характеристик перенапруг залишається актуальною задачею, оскільки залежить від багатьох факторів та чинників аномального режиму. Тому перш за все необхідно виявити саме ключові чинники, перевірка яких під час проектування та експлуатації ЛЕП НВН дасть змогу виявляти наявність необхідних і достатніх умов появи аномальних перенапруг, а також вживати заходи щодо їх запобігання.

Однією з характерних обставин появи перенапруг на парних гармонічних складових є вмикання лінії не на три фази групи однофазних АТ, а на дві з них. Такий режим у мережі НВН взагалі є допустимим з точки зору несиметрії, оскільки значення струму по зворотній та нульовій послідовностях не перевищують граничні допустимі значення. Це обумовлено паралельним режимом роботи двох або навіть трьох груп однофазних АТ на підстанції: відключення фази тільки в одній групі може не суттєво вплинути на симетрію режиму. Але причиною виникнення аномальних перенапруг є не тільки несиметрія, а й несинусоїдність, тобто комплексна дія цих факторів спотворень. Несинусоїдність виникає при включенні ненавантаженого АТ внаслідок зміщення робочої точки на нелінійну частину його характеристики намагнічування.

Останнім часом для дослідження виникнення та розвитку перенапруг на парних гармонічних складових запропоновано використання штучних нейронних мереж та вейвлет перетворення. Це дає змогу виявлення впливу параметрів обладнання та режиму на характеристики перенапруг як в комплексі, так і окремо [5, 6]. Такий підхід виокремив декілька найголовніших чинників, що призводять до перенапруг на другій гармонічній складовій: довжину лінії; кут вмикання вимикача; параметри схеми заміщення лінії. Але залишилось відкритим питання ранжування факторів за ступенем впливу. У статті розглядаються окремі фактори та їх вплив на кратність аномальних перенапруг.

Одним з найголовніших факторів, що визначає виникнення аномальних перенапруг, є довжина лінії l [3]. Розглянемо залежність зміни напруги від довжини лінії (рис. 1). З графіка видно, що при певних довжинах ЛЕП обмеження перенапруг тільки за рахунок коронного розряду буде недостатнім. Звичайно, аномальні перенапруги в конкретному випадку залежать від параметрів лінії, як це буде показано далі, але в цілому залежність не буде істотно відрізнятися від наведеної на рис. 2. Таким чином, при двох групах шунтувальних реакторів діапазон нерезонансних довжин для другої гармонічної буде коливатись у межах 350...370 км. Зрозуміло, що такий діапазон є малим, для того щоб можна було передбачити використання його при проектуванні ЛЕП як запобіжний захід.

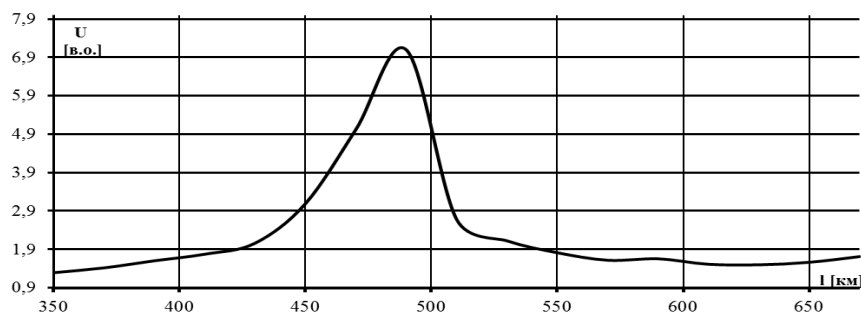


Рис. 1

слід відзначити, що зміна параметрів лінії в широких межах мало впливає на діапазон таких кутів.

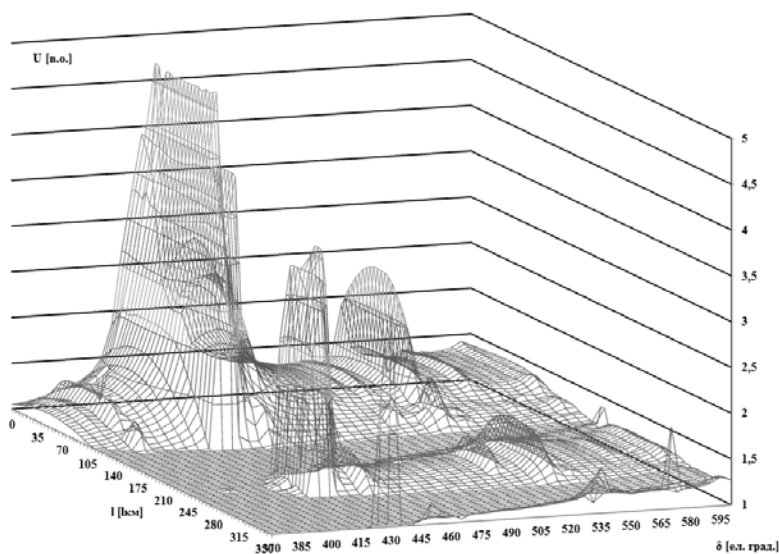


Рис. 2

Кут вмикавання вимикача δ визначає початкові умови перехідного процесу. Розглянемо як він впливає на вибір нерезонансної довжини ЛЕП НВН. З рис. 3 видно, що існують діапазони кутів вмикавання, при яких напруга для цієї довжини ЛЕП не перевищить допустимих значень. Також

Аномальні перенапруги виникають внаслідок коливних процесів у електричній мережі. Коли говорять про аномальне підвищення напруги при наявності резонансних умов, то мають на увазі перш за все відповідні значення параметрів індуктивних та ємнісних елементів. Відомо, що вони визначаються конструкцією ЛЕП НВН, а саме розташуванням у просторі як проводів у окремій розщепленій фазі, так і фаз у цілому. Відповідні геометричні характеристики лінії: радіус провідника r ; середньгеометричні величини відстаней між проводами в фазі a та фаз лінії між

собою D . Оскільки розглядаються аномальні режими, то інтерес представляють значення величин не тільки по прямій, але й нульовій послідовностях.

Вираз для дослідження залежності індуктивності прямої послідовності від геометричних особливостей конструкції ЛЕП НВН можна отримати шляхом перетворень відомих емпіричних формул для визначення погонних параметрів схеми заміщення ЛЕП НВН [6]:

$$L_1 = 0,459 \lg(Da^{-4} r^{-5}) \text{ (мГн/км)}.$$

Струми нульової послідовності, які з'являються в аномальному режимі ЛЕП, протікають нейтральними АТ і замикаються через землю. Індуктивність нульової послідовності істотно відрізняється від індуктивності прямої послідовності за рахунок іншого прояву взаємодукції. Для прямої послідовності власна та взаємні індуктивності мають різні знаки, оскільки фазні струми зсунуті за часом. Струм нульової послідовності має той самий напрям, а

значить, власна та взаємна індуктивності у цьому випадку додаються. Основні труднощі обчислення пов'язані з розподілим характером протікання струму в землі. Зазвичай найближчий до поверхні шар має меншу провідність, ніж більш глибокий насичений водою шар. У цих умовах більша частина струму нульової послідовності протікає по глибинних шарах. Для аналізу процесу дійсну картину розподілу струму в землі заміняють її моделлю, в якій весь струм повертається по одній провідній трубці, розташованій від поверхні землі на глибині 935 м. У моделі трифазна лінія представлена трьома двопровідними лініями (фаза – земля). Використання цієї моделі дає вираз для дослідження залежності індуктивності нульової послідовності від геометричних особливостей конструкції ЛЕП НВН: $L_0 = 1,385 \lg(935D^{\frac{2}{3}} a^{\frac{4}{15}} r^{\frac{1}{15}})$ (мГн/км).

Дослідження залежності ємності прямої послідовності від геометричних особливостей конструкції ЛЕП НВН було виконано за виразом, який отримано з емпіричних формул для визначення погонних параметрів схеми заміщення ЛЕП НВН:

$$C_1 = \frac{0,02411}{\lg(Da^{\frac{4}{5}} r^{-5})} \text{ (мкФ/км)}.$$

Погонна ємність нульової послідовності залежить також і від висоти підвісу фаз ЛЕП НВН з урахуванням провисання: h_A, h_B, h_C – відповідно для фаз **A**, **B** і **C**. Тоді шукана залежність може бути визначена з моделі протікання струму в аномальному режимі:

$$C_0 = \frac{0,00803}{\lg\left(\frac{2}{3}(h_A + h_B + h_C) D^{\frac{2}{3}} a^{\frac{4}{15}} r^{\frac{1}{15}}\right)} \text{ (мкФ/км)}.$$

З досліджуваних виразів можна зробити попередній висновок, що головним фактором є відстань між фазами, менше значення має відстань між проводами у фазі і практично не впливає радіус окремого проводу. Останній фактор не будемо розглядати ще й тому, що звичайно для ЛЕП НВН при проектуванні обирають проводи максимального перетину, тобто вони однакові для всіх ліній.

На рис. 3 представлено результати комп'ютерного моделювання залежностей перенапруг від середньгеометричної відстані між фазами. З рис. 3 *а* можна зробити висновок, що в усьому діапазоні міжфазних відстаней, які використовуються для ЛЕП НВН, режим напруг можна нормалізувати відповідним підбором кута вмикання вимикача. У той же час режим буде аномальним для ліній реальної довжини при будь-якій з використовуваних міжфазних віддалей, якщо кут вмикання обрано невдало (рис. 3 *б*).

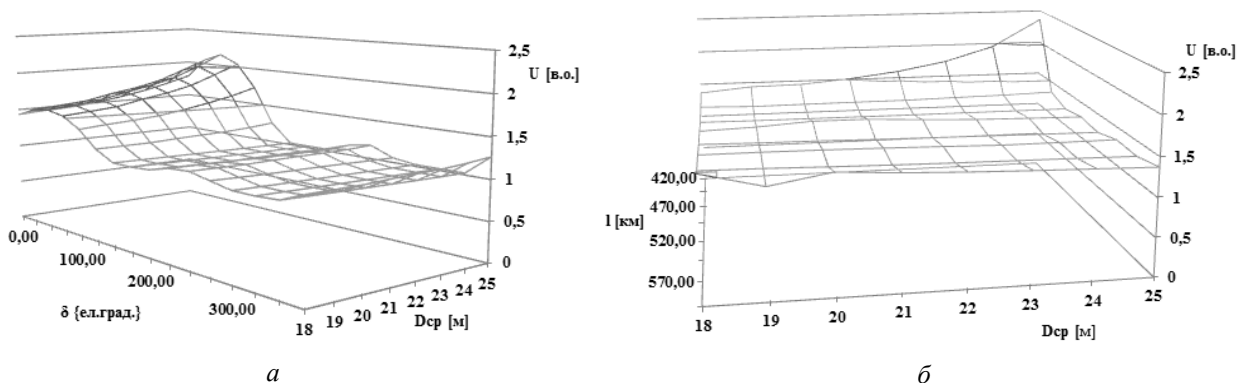


Рис. 3

На рис. 4 представлено результати комп'ютерного моделювання залежностей перенапруг для відстані між проводами в окремій фазі. При варіюванні l та a (рис. 4 *а*) можна зробити висновок, що при будь-якому значенні a можливе виконання резонансних умов на другій гармонічній частоті, але не при кожній довжині: аномального підвищення напруги вда-

ється уникнути на визначених досить вузьких довжинах. Підбором значень D_{cp} та a (рис. 4 б) не вдається нормалізувати режим у діапазоні реальних значень. У цьому випадку, враховуючи невизначеність інформації, взагалі важко передбачити, які значення напруги будуть при конкретних значеннях параметрів.

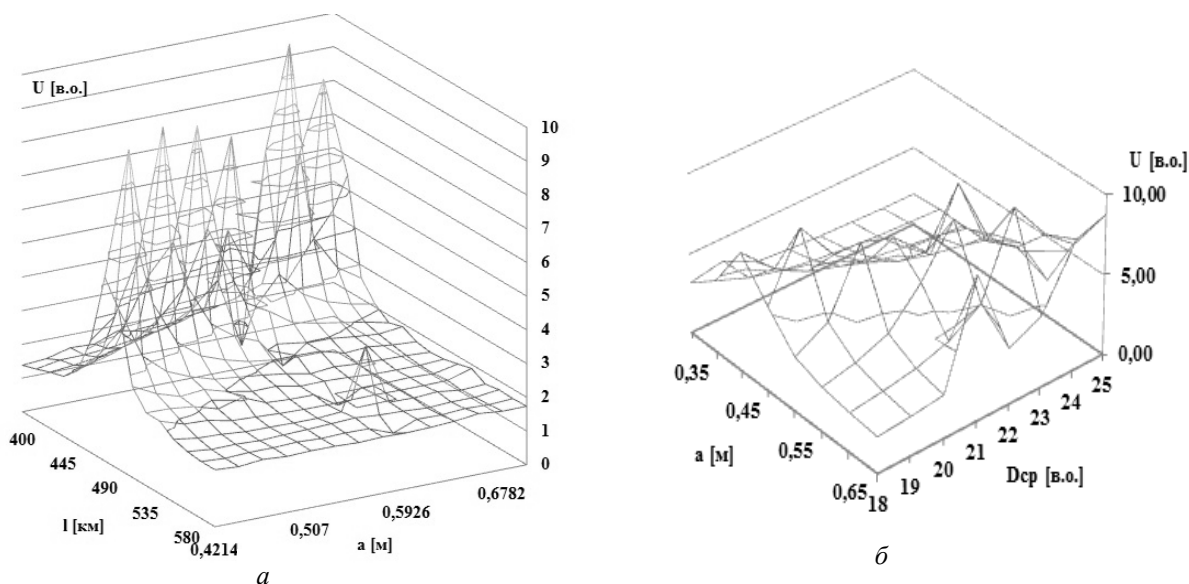


Рис. 4

Таким чином, з рис. 4 можна зробити висновок про доцільність зменшення відстані між проводами у фазі з точки зору кратності перенапруг на парних гармонічних складових. Але це призводить до зростання втрат на коронний розряд. У подальшому доцільно розглянути вибір оптимального значення розщеплення фази за цими двома суперечливими критеріями.

Висновки. Визначено вплив різних факторів на перенапруги в ЛЕП НВН на парних гармонічних складових і показано важливість врахування сукупності їх впливу. Найбільш ефективним засобом запобігання розглянутим аномальним режимам є вибір діапазону кутів вмикання ненавантаженого АТ. Можна зробити висновок, що чим далі кут вмикання від значення переходу через нуль, тим менші кратності такого типу перенапруг. На цей фактор необхідно звертати увагу за наявності небезпеки перевищення напруги в аномальному режимі, оскільки зазвичай керовані вимикачі налаштовують якраз на момент переходу графіка напруги через нуль.

1. Кузнецов В.Г., Тугай Ю.І., Кучанський В.В. Дослідження впливу транспозиції лінії електропередачі надвисокої напруги на аномальні перенапруги // Техн. електродинаміка. – 2013. – № 6. – С. 51–56.
2. Кадомская К.П., Лавров Ю.А., Рейхердт А.А. Перенапряжения в электрических сетях различного назначения и защита от них. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – 368 с.
3. Беляков Н.Н., Кадомская К.П., Левинштейн М.Л. и др. Процессы при однофазном автоматическом повторном включении линий высоких напряжений. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 256 с.
4. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. – М.: Энергия, 1970. – 520 с.
5. Liu Wei; Ning Wen-hui; Huang Dong-shan Analysis and modification of a 500 kV transmission line overvoltage problem Electricity Distribution (CICED), 2010 China International Conference on Date: 13-16 Sept. 2010.
6. Ramold M., Idarraga G., Jager J. Transient shunt reactor dimensioning for bulk power transmission systems during normal and faulty network conditions // 2006 International Conference on Power System Technology.

УДК 621.315.1

Ю.І. Тугай, канд. техн. наук, **В.В. Кучанський**, асп., **Р.В. Пляшко**, магистр

Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

Исследование влияния параметров ЛЭП СВН на аномальные перенапряжения

Целью выполненных исследований был анализ факторов, которые приводят к появлению в линиях электропередачи сверхвысокого напряжения аномальных режимов, сопровождающихся перенапряжениями на четных

гармонических составляющих. Показано, что аномальные перенапряжения данного типа являются следствием комплексного действия несимметрии и несинусоидальности на параметры режима и могут продолжаться сравнительно длительное время. Этим они отличаются от перенапряжений, которые возникают в результате коммутаций при нормальной схеме электрической сети без источников искажений. Источником четных гармонических составляющих является ненагруженный автотрансформатор, рабочая точка которого смещается на нелинейную часть характеристики намагничивания. Разработаны математические модели для оценки возможной кратности перенапряжений в этом случае. С помощью цифрового моделирования определены факторы, которые в наибольшей степени влияют на возникновение аномальных перенапряжений. Получены зависимости аномальных перенапряжений от длины и конструкции линии, угла включения выключателя. Показано, что одним изменением длины линии, даже при наличии такой возможности при проектировании, гарантировать отсутствие вероятности появления аномальных перенапряжений нельзя. Определены критические значения параметров линии, при которых характеристики перенапряжений достигают максимальных значений. Сделан вывод о необходимости в таких случаях использования специальных мер, поскольку ограничение кратности перенапряжения коронным разрядом оказывается недостаточным. Изменением угла включения выключателя во многих случаях удается нормализовать режим, однако это требует разработки специальных программ управляемой коммутации. Во время проектирования линии электропередачи сверхвысокого напряжения необходим учет возможности аномальных перенапряжений при выборе конструкции как самой линии, так и геометрии расщепленной фазы. Библ. 6, рис. 4.

Ключевые слова: аномальные перенапряжения, неполнофазный режим работы, резонанс, линия сверхвысокого напряжения.

Yu.I. Tugai, V.V. Kuchanskyi, R.V. Plyashko

Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,
Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

The study of effects parameters of EHV transmission line on abnormal overvoltage

The main goal of the research was to analyze the factors that lead to the appearance some disturbance in power lines of the ultra-high voltage, which was accompanied by overvoltage on the even harmonic components. It is shown that the abnormal overvoltage of this type appears as a consequence of complex action of the asymmetry parameters and non-sinusoidal state and can exist a relatively long time. That is different from overvoltage that occurs as a result of switching in the scheme with normal parameters and sources without distortions. An unloaded autotransformer is a source of the even harmonic components, because the operating point is shifted to the non-linear part of the magnetization characteristic. The mathematical models to check the possible multiplicity overvoltage in this case were developed. The numerical simulation have been used for factors detect of that have the greatest impact on the occurrence of abnormal overvoltage. The models with the line length, line design and the angle of the circuit breaker for study to effect on abnormal overvoltage were developed. It was shown that a change of the line length, if there is such a possibility under the design; don't ensure the absence of the probability of occurrence of abnormal overvoltage. The critical values of the line parameters where overvoltage rises to the maximum value were found. The conclusion of necessity in such cases to use special measures because limiting effect of corona is insufficient. It is possible to normalize the state by changing the angle of the circuit breaker. It is useful in many cases, but it requires the development of special programs controlled switching. It is necessary to take into account the possibility of abnormal overvoltage when choosing the design of both the line and the split phase in the EHV power line. References 6, figures 4.

Key words: abnormal overvoltage, open-phase mode, resonance, EHV transmission line.

Надійшла 12.02.2014

Received 12.02.2014