

УДК 621.314

В.О. Бржезицький, А.А. Щерба, О.Д. Подольцев, Є.О. Троценко, С.Ю. Шевченко,
Я.О. Гаран, С. Атарод

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИЧИН ЕЛЕКТРИЧНОГО ПЕРЕКРИТТЯ ПІДТРИМУЮЧИХ ІЗОЛЮЮЧИХ ПІДВІСОК СЕРЕДНЬОЇ ФАЗИ ПОВІТРЯНОЇ ЛІНІЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ

Two possible causes of electric overlapping of the middle phase insulator string are taken into consideration: the design defect of cap-and-pin insulator and the tangent tower impact on electric field intensity near insulator string. Experimental and theoretical researches of an electric field of cap-and-pin insulator strings of 330 kV overhead power line were carried out. The insulator string's three-dimensional electric field was calculated using finite element method. By results, for the first time it was shown that frequent overlapping of middle phase insulator string is caused by increase of voltage drop on middle phase last insulator, in comparison with that one of the other phases. Ways of decreasing of non-uniformity of an insulator strings intensity distribution of the middle phase are offered.

Вступ

Останнім часом при діагностиці стану високовольної ізоляції значна увага приділяється появі високочастотних електричних коливань [1], які, з одного боку, свідчать про погіршення її стану, а з іншого – призводять до прискореного руйнування діелектричних конструкцій. Подібна ситуація може бути характерною і для виникнення перекриття ізолюючих підвісок середньої фази повітряних ліній електропередач (ЛЕП) з підвісними тарілчастими скляними ізоляторами. Конструктивні особливості скляних ізоляторів досить докладно розглядаються дослідниками (див., наприклад, [2, 3]).

Однією з можливих причин виникнення перекриття ізолюючої підвіски саме середньої фази може бути недосконалість конструкції тарілчастого ізолятора. Джерелом високочастотних коливань може бути ізоляційна конструкція між стрижнем і шапкою тарілчастого ізолятора, яка складається з послідовного електричного з'єднання елементів: цементне закладення стрижня–тіло діелектрика (скла)–цементне закладення шапки. Останню виключимо з розгляду, оскільки напруженість електричного поля в ній практично на порядок менша порівняно з цементним закладенням стрижня. Але цементне закладення стрижня перебуває в електричному полі, напруженість якого в 3-4 рази перевищує напруженість поля в склі [3]. При цьому властивості цементу як високовольного діелектрика є набагато гіршими порівняно зі склом. Такі "пари" діелектриків у техніці високих напруг характеризуються швидким (електричним) руйнуванням гіршого діелектрика при перенесенні основного електричного навантаження (в цьому випадку на скло). Гірший діелектрик у

цій парі слугує постачальником додаткових електричних коливань, що поступово руйнують основний елемент пари.

Другою з можливих причин може бути вплив натяжних металевих канатів опор ЛЕП із залізобетонними стояками на напруженість поля в гірлянді ізоляторів середньої фази.

Постановка задачі

Мета статті – проаналізувати дві можливі причини виникнення перекриття ізолюючої підвіски середньої фази на прикладі повітряної лінії 330 кВ за допомогою як експериментальних, так і числових методів, а також розглянути можливість застосування V-подібної підвіски для підвищення надійності роботи гірлянд ізоляторів повітряної лінії 330 кВ.

Експериментальні дослідження тарілчастих ізоляторів

Для проведення експериментальних досліджень були відібрані нові ізолятори типу ПС 120Б та 2 ізолятори цього ж типу з ділянки ПЛ-330, на якій спостерігаються перекриття (з них ізолятор з умовним номером 1 є першим у гірлянді від траверси, а з номером 2 – наступним). Для 1-го ізолятора характерною є наявність стійкого поверхневого забруднення іржею, яке пояснюється стиканням іржі з поверхонь траверси. Поверхня 2-го ізолятора є порівняно чистою. Видимий край цементного закладення стрижня має великі пори, і в нього відсутнє захисне покриття. Для нових ізоляторів структура цементного закладення є щільною без будь-яких пор.

У лабораторії кафедри техніки і електрофізики високих напруг НТУУ “КПІ” було проведено осцилографування струму, що протікає через ізолятор при подачі до стрижня високої змінної напруги. В коло заземлюючого провідника, підключеного до шапки, вмикався резистор опором 110 Ом, з виходу якого напруга надходила на вхід осцилографа. Було проведено кілька серій осцилографування, при цьому запис результатів виконувався на цифрову відеокамеру, що дало змогу вибрати характерні осцилограми режимів. Усього було отримано більше 1000 кадрів осцилограм, найбільш характерні з яких розглянемо далі.

На рис. 1, *а* показано осцилограму електричного струму 2-го ізолятора при напрузі 28 кВ (тут і далі використовуються середньоквадратичні значення напруги). Масштаб по вертикальній осі 0,1 В на 1 ділення, по горизонтальній осі – 5 мс на 1 ділення. Осцилограма демонструє близьку до синусоїдальної форму ємнісного струму, що протікає через ізолятор.

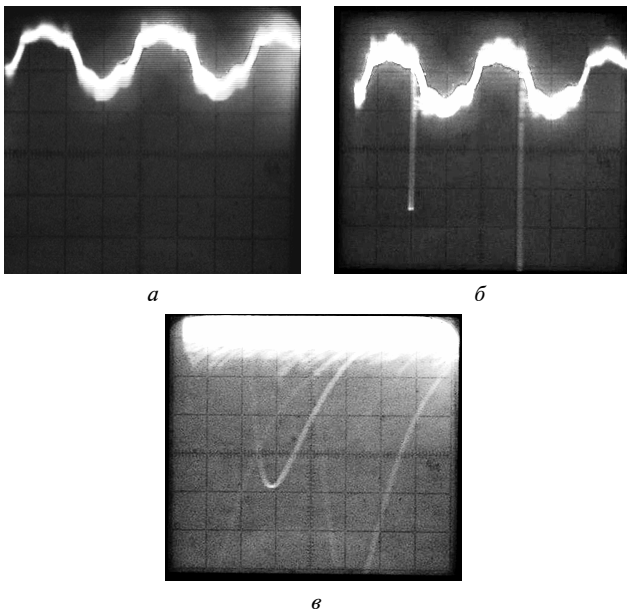


Рис. 1. Осцилограми електричного струму при напрузі на ізоляторі: *а* – 28 кВ; *б* – 30 кВ; *в* – 30 кВ (у збільшеному масштабі)

На рис. 1, *б* показано осцилограму того ж струму при напрузі 30 кВ (масштаби по осях є такими ж). Характерним для цієї осцилограми є поява періодичних (з частотою 50 Гц) великомасштабних сплесків і високочастотних коливань струму, амплітуда яких в 5 і більше разів перевищує амплітуду сигналу частотою 50 Гц. Такі коливання пояснюються поверхневим перекриттям цементного закладення стрижня.

Осцилограма на рис. 1, *в* дає можливість більш точно визначити амплітуду великомасштабного сплеску струму (пік у нижній частині осцилограми), яка більш ніж в 10 раз перевищує амплітуду струму частотою 50 Гц (сигнал такої частоти перебуває в розмитих границях у верхній частині осцилограми). Масштаб по вертикальній осі такий же, як і на рис. 1, *а*, *б*, а по горизонтальній осі становить 10 мкс на 1 ділення. Тривалість півперіоду великомасштабного сплеску становить по осцилограмі близько 40 мкс. Осцилограма також показує наявність дрібномасштабної структури – високочастотних коливань з амплітудою, що у кілька разів перевищує сигнал частотою 50 Гц, і частотою близько 250 кГц.

Результати осцилографування струму 1 й 2-го ізоляторів практично збігаються. Осцилографування струму для нового ізолятора при напрузі 30 кВ показує відсутність великомасштабних сплесків. Дрібномасштабна структура коливань має амплітуду практично рівну амплітуді сигналу частотою 50 Гц.

Числове моделювання електричного поля в тарілчастому ізоляторі

Для кількісного аналізу рівня електричного поля в об'ємі ізолятора було виконано числове моделювання поля методом скінченних елементів. На рис. 2 показано розрахункову об-

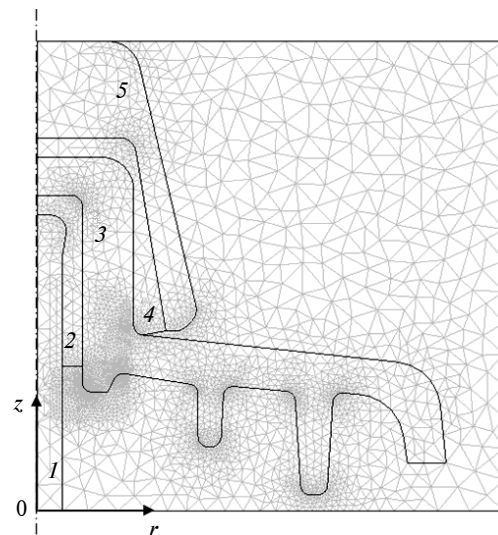


Рис. 2. Розрахункова область, що містить тарілчастий скляний ізолятор ПС-120Б із нанесеною скінченноелементною ґраткою: 1 – стрижень; 2 – цементне закладення стрижня (відносна діелектрична проникність $\epsilon = 6$); 3 – скляний діелектрик ($\epsilon = 10$); 4 – цементне закладення шапки ($\epsilon = 6$); 5 – шапка ізолятора

ласть з ізолятором – через існуючу осьову симетрію розрахунки виконувалися в циліндричній системі координат на площині. Значення діелектричних проникностей вибиралися згідно з [4].

Результати розрахунків напруженості електричного поля в об'ємі ізолятора при прикладеній напрузі 30 кВ за допомогою пакета COMSOL Multiphysics [5] наведені на рис. 3. Максимального значення поле досягає на поверхні стрижня. Найнебезпечніші значення поля існують на поверхні цементного закладення стрижня (3,0 кВ/мм). За таких значень поля може відбуватися поверхневий розряд, що й спостерігалось в проведеному експерименті.

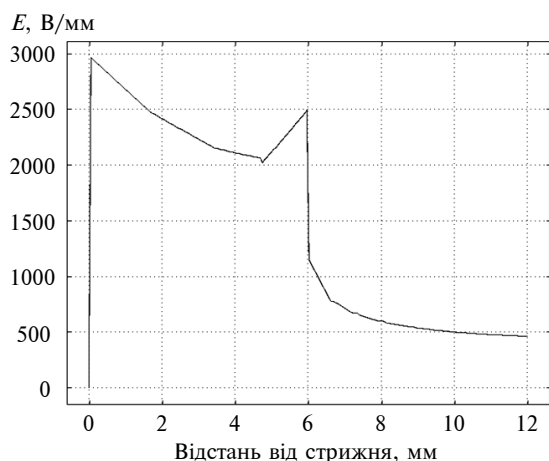


Рис. 3. Розподіл напруженості електричного поля на поверхні цементного закладення стрижня тарілкового ізолятора ПС 120Б при прикладеній напрузі 30 кВ

Для зниження величини напруженості поля на цій поверхні необхідно підвищити електропровідність матеріалу цементного закладення стрижня або в повному об'ємі цього закладення, або ж тільки в приповерхневому шарі. В останньому випадку досить просочити цей шар композиційною рідиною, що містить електропровідну компоненту у вигляді колоїдних частинок, наприклад, графіту. Проведені розрахунки показали, що для електропровідності цементного закладення $2 \cdot 10^{-8}$ См/м напруженість поля зменшується на поверхні стрижня з 3 до 2,4 кВ/мм.

В цьому разі також відбувається невелике збільшення поля на поверхні ізолятора, пов'язане з наявністю гострого краю в цементному закладенні. Для зниження величини поля може виконуватися профілювання цементного закладення, що може бути предметом самостійних досліджень. Однак і середнє, і максимальне

значення поля при підвищенні електропровідності цементу зменшуються.

Таким чином, зниження напруженості електричного поля на поверхні ізолятора (в області цементного закладення) приведе до його більш усталеної роботи. Для цього необхідно в існуючих ізоляторах, принаймні в тих ізоляторах, які розміщені на краю гірлянди, забезпечити за допомогою просочення композиційним компаундом підвищення електропровідності до $2 \cdot 10^{-8}$ См/м.

Результати проведених експериментальних і розрахункових досліджень свідчать про те, що зі спадом напруги на ізоляторі на рівні 30 кВ у ньому виникають поверхневі розряди, які можуть ініціювати перекриття гірлянди в цілому. Виникає питання, чи можлива поява напруги 30 кВ на одному з ізоляторів гірлянди ВЛ-330 при середньому значенні напруги на ізоляторі $U = \frac{1,05 \cdot 330}{\sqrt{3} \cdot 20} \approx 10$ кВ, де 1,05 – коефіцієнт пе-

ревищення напруги на лінії і 20 – кількість ізоляторів у гірлянді? Можлива при вкрай нерівномірному розподілі напруги по гірлянді, в першу чергу – для середньої фази у зв'язку з тим, що ємності ізоляторів гірлянди на опорі будуть максимальними саме для середньої фази. Величину даної ємності можуть збільшувати натяжні металеві канати, які застосовуються для підвищення вітростійкості опор. Для кількісного аналізу цього явища в роботі виконувалося числове моделювання електричного поля в системі опора–ізолююча підвіска–натяжні канати.

Розрахунки тривимірного електричного поля в ізолюючій підвісці

Було виконано розрахунки електричного поля для гірлянди ізоляторів крайньої і середньої фаз. Розрахункові області для цих двох випадків з нанесеною скінченноелементною ґраткою показано на рис. 4. Розв'язок поставленого завдання виконувався за допомогою пакета COMSOL Multiphysics. Розподіл потенціалу уздовж гірлянди ізоляторів середньої і крайньої фаз показаний на рис. 5, а і б відповідно. Видно, що в гірлянді середньої фази спад напруги на крайньому ізоляторі (розміщеному біля провідника) становить 26,8 кВ (рис. 5, а), у той час як для крайньої фази – 24,45 кВ (рис. 5, б). Тобто напруга на ізоляторі середньої фази через наявність опор із двох сторін, а також на-

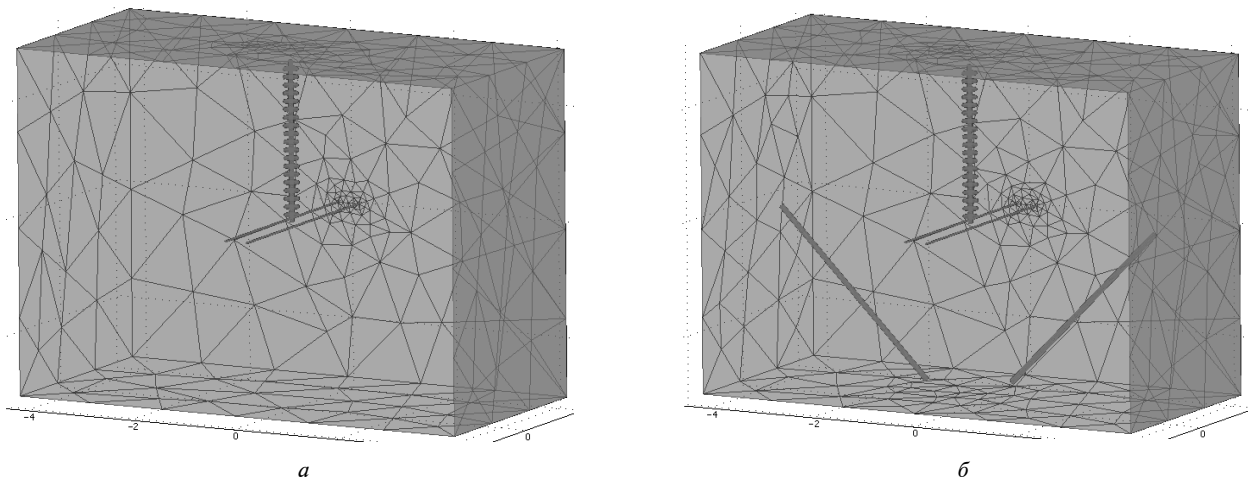


Рис. 4. Розрахункові області для аналізу тривимірного розподілу електричного поля: *a* – у крайньому ізоляторі; *б* – у середньому ізоляторі з урахуванням впливу натяжних канатів

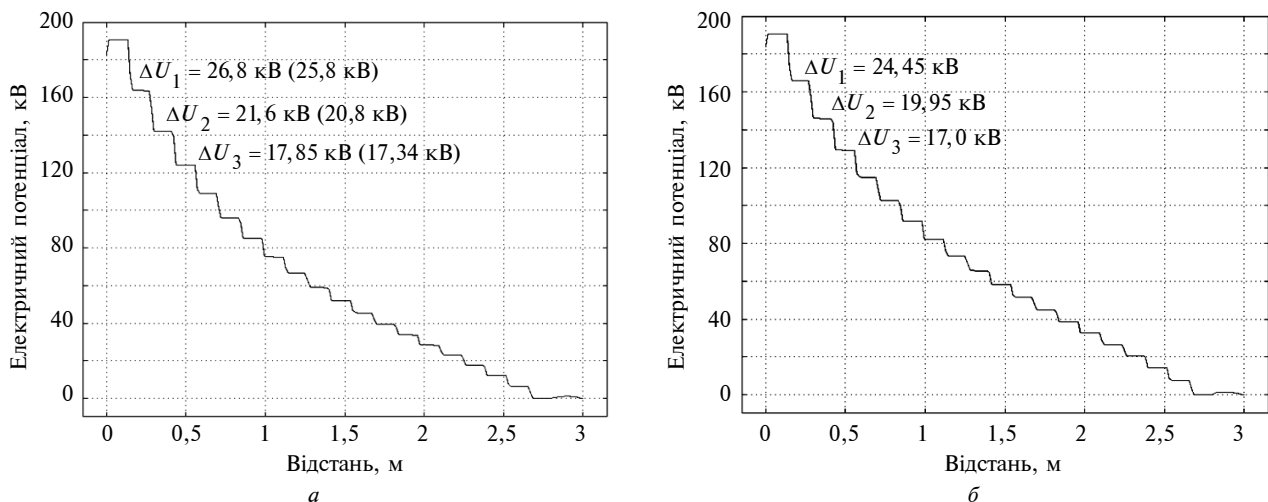


Рис. 5. Розподіл електричного потенціалу уздовж гірлянди: *a* – середньої фази за відсутності підвіски з розщепленням у фазі (у дужках вказано значення спаду напруг на ізоляторах без врахування натяжних металевих канатів); *б* – крайньої фази за відсутності підвіски з розщепленням у фазі

тяжних канатів вища на 9,6 % напруги ізоляторів крайньої фази. Ця обставина може бути причиною перекриття саме ізоляторів середньої фази, яке відбудеться при перевищенні напруги на лінії в $30/26,8 = 1,12$ рази (раніше було показано, що при напрузі 30 кВ на ізоляторі виникають часткові розряди). На рис. 5, *a* наведено також розрахункові значення спаду напруг на ізоляторах гірлянди середньої фази в припущенні, що натяжні канати відсутні (значення напруги подано в дужках). Видно, що при цьому величини напруг трохи зменшуються – приблизно на 5 %.

Для вивчення можливості застосування ізолюючої підтримуючої підвіски з ізольованим розщепленням у фазі (як методом зниження напруги на ізоляторах) виконувалися розрахун-

ки при кількості ізоляторів у цій підвісці 1, 2, 3 і 4 (в одному колі). При цьому загальна довжина гірлянди, або повне число ізоляторів, вбудованих у ряд, покладалася незмінною. Результати розрахунків розподілу потенціалів уздовж гірлянди середньої фази для зазначених чотирьох випадків показані на рис. 6. З рис. 6, *a* випливає, що застосування підвіски з одним ізолятором “зміщує” величину підвищеної напруги на другий ізолятор – вона досягає значення 28,6 кВ, тобто перевищує значення в останньому ізоляторі у випадку без підвіски (див. рис. 5, *a*). Для випадку двох ізоляторів (рис. 6, *б*) максимум напруги переміщується на третій ізолятор і становить 25,4 кВ, що є величиною, близькою до первісного спаду напруги 26,8 кВ. У випадку застосування трьох

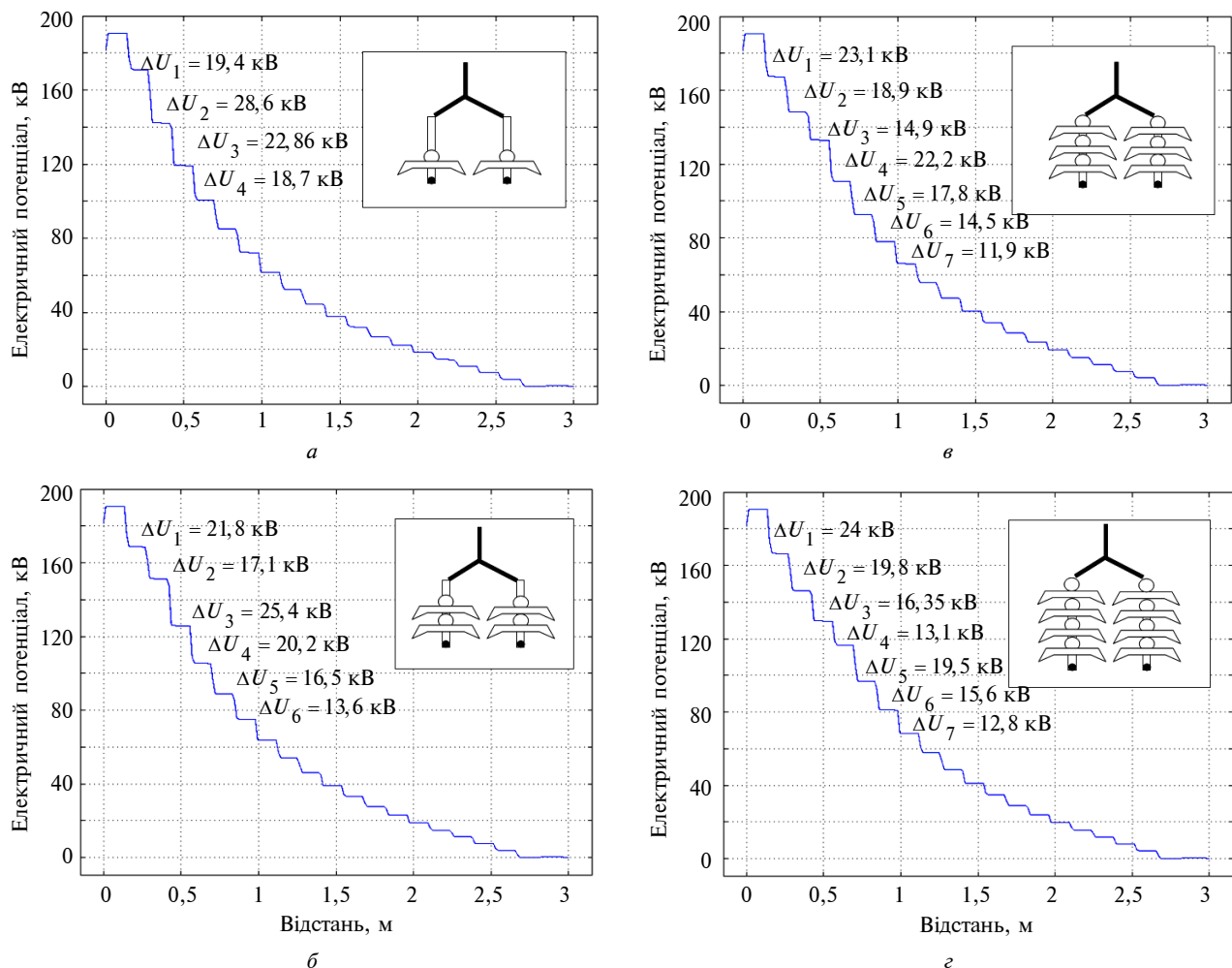


Рис. 6. Розподіл електричного потенціалу уздовж гірлянди середньої фази за наявності підвіски з розщепленням у фазі: а – з одним ізолятором; б – із двома ізоляторами; в – із трьома ізоляторами; г – із чотирма ізоляторами

ізоляторів (рис. б, в) максимум досягається в крайньому ізоляторі і становить 23,1 кВ. При збільшенні числа ізоляторів до чотирьох (рис. б, г) напруга на крайньому ізоляторі починає зростати. Таким чином, було визначено, що оптимальна кількість ізоляторів у підвісці з розщепленням у фазі – три ізолятори.

Висновки

Результати проведених експериментальних і теоретичних досліджень електричного поля одного ізолятора показали, що при спаді напруги на ізоляторі 30 кВ виникають часткові розряди на його поверхні, які можуть ініціювати перекриття всієї гірлянди ізоляторів. Розглянуто питання підвищення електропровідності матеріалу цементного закладення його просоченням слабопровідним компаундом для зни-

ження середнього рівня поля на поверхні цементного закладення стрижня.

Показано, що величина електропровідності цементного закладення в приповерхневому шарі має досягати значення $2 \cdot 10^{-8}$ См/м.

Результати проведених розрахунків тривимірного електричного поля гірлянди ізоляторів середньої і крайньої фази показують, що спад напруги на останньому ізоляторі середньої фази через наявність натяжних канатів і опор із двох сторін більший відповідного спаду напруги крайньої фази на 9,6%. Цією обставиною можна пояснити більш часте перекриття гірлянди ізоляторів саме середньої фази.

За результатами розрахунків електричного поля в гірлянді ізоляторів ПЛ-330 при використанні підвіски з розщепленням у фазі показано, що застосування підвіски дає можливість знизити величину спаду напруги на ізоляторах.

Так, у випадку підвіски із трьох ізоляторів значення напруги знижується з 26,8 кВ до 23,1 кВ. Також показано, що оптимальна кількість ізоляторів у V-подібній підвісці, при якій максимальний в гірлянді спад напруги на ізоляторі досягає мінімуму, становить три ізолятори.

Вперше показано роль високочастотних явищ в електромагнітних процесах високовольтних повітряних ліній електропередач, що відкриває перспективи математичного моделювання їх характеристик надійності та прогнозування.

1. *Вдовико В.П.* Частичные разряды в диагностировании высоковольтного оборудования. – Новосибирск: Наука, 2007. – 156 с.
2. *Кім Єн Дар.* Методологічні основи удосконалення високовольтних лінійних ізоляторів та методів їх випробувань: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.09.13. – НТУ “ХПІ”. – Х., 2003. – 32 с.
3. *Шевченко С.Ю., Окунь А.А.* Моделирование электрического поля стеклянного изолятора ВЛ 110 кВ // Вісник НТУ “ХПІ”. Тем. вип. “Енергетика: надійність та енергоефективність”. – 2011. – № 3 – С. 136–143.
4. *Справочник по электротехническим материалам: В 3-х т. /* Под ред. Ю.В. Корицкого и др. – 3-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – Т. 2. – 464 с.
5. www.comsol.com

Рекомендована Радою факультету
електроенергетехніки та автоматики
НТУУ “КПІ”

Надійшла до редакції
12 жовтня 2011 року