

УДК 621.314

IMPROVEMENT OF HIGH-VOLTAGE GLASS INSULATORS

V. Brzhezytskyi, N. Laposha, I. Maslyuchenko, V. Khominich

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Politechnic Institute"

Key words:

*High-voltage suspension
insulator
Cement shell
Electric field intensity
Partial discharge*

Article history:

Received 15.11.2017
Received in revised form
27.11.2017
Accepted 20.12.2017

Corresponding author:

I. Maslyuchenko
E-mail:
npnuht@ukr.net

ABSTRACT

The design features of high-voltage glass disk suspension insulators are considered in the paper. The electric field of the insulator was studied using its appropriate modeling in the Comsol Multiphysics simulation software. It was found the dependence of the maximal values of voltage applied to the insulator, under which the breakdown of the inclusion (pores) in the cement shell occurs, on the diameter of the pore. An improvement of the design of the insulator is proposed, the implementation of which consists of increasing the radius of curvature of the conical part of the rod. It is shown that with a change of the radius of curvature of the conical part of the insulator core from 0.5 to 3.5 mm, the maximal electric field intensity reduces and the threshold value of the partial discharge voltage in the cement shell increases, which will decrease the level of radio interference of the insulators. The results can be used to create new designs for high-voltage disc suspension insulators with improved radio interference performance.

DOI: 10.24263/2225-2924-2017-23-6-14

УДОСКОНАЛЕННЯ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ЛІНІЙНИХ СКЛЯНИХ ІЗОЛЯТОРІВ

В.О. Бржезицький, М.Ю. Лапоша, І.М. Маслюченко, В.І. Хомініч

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

У статті розглянуто конструктивні особливості високовольтних підвісних лінійних скляних тарілчастих ізоляторів. Проведено дослідження електричного поля ізолятора за допомогою його моделювання в програмному пакеті Comsol Multiphysics. Виявлена залежність граничних значень напруг на ізоляторі, при яких відбувається пробій включення (пори) у цементно-піщаній зв'язці, від діаметра пори. Запропоновано удосконалення конструкції ізолятора, виконання якого полягає у збільшенні радіуса заокруглення конічної частини стрижня. Показано, що при зміні радіуса заокруглення конічної частини стрижня ізолятора від 0,5 до 3,5 мм відбувається зменшення максимальної напруженості електричного поля та підвищення порогового значення напруги виникнення часткових розрядів у цементно-піщаній зв'язці, що забезпечить

зниження рівня радіозавад ізоляторів. Результати можуть бути використані для створення нових конструкцій високовольтних лінійних тарілчастих ізоляторів з покращеними характеристиками по рівню радіозавад.

Ключові слова: високовольтний лінійний тарілчастий ізолятор, цементно-піщана зв'язка, напруженість електричного поля, частковий розряд.

Постановка проблеми. Безперебійна робота ліній електропередач залежить від надійності у часі лінійної ізоляції, яка у більшості випадків застосовується у вигляді гірлянди зі скляних або фарфорових ізоляторів. Основною перевагою даних ізоляторів є те, що при пошкодженні діелектрика зберігається механічна міцність їх конструкції, тому вони найбільш масово експлуатуються в повітряних мережах високої напруги. Незважаючи на те, що в останні роки відзначається широке використання полімерних ізоляторів у будівництві повітряних мереж, все ж на багатьох високовольтних лініях і підстанціях ізолюючими елементами гірлянд залишаються скляні (фарфорові) ізолятори. У зв'язку з цим конкуренція між компаніями-виготовлювачами зберігається, що змушує шукати шляхи зниження питомих витрат і підвищення технічних характеристик ізоляторів [1].

Лінійний підвісний ізолятор являє собою систему, що складається з чавунної шапки, сталевого стрижня, ізоляційної деталі та цементно-піщаної зв'язки (ЦПЗ). В процесі експлуатації ізолятор піддається одночасному впливу електричних і механічних навантажень при зміні оточуючих зовнішніх умов. Щоб ізолятор був надійним, протягом багатьох років повинні були детально опрацьовані методи конструювання, фізико-механічні та електрофізичні характеристики високовольтних ізоляторів, у тому числі за допомогою розрахунку картини дії електричного поля [2].

У високовольтних лінійних тарілчастих ізоляторах ізоляційна деталь і ЦПЗ знаходяться під основним електричним навантаженням. Фізичний стан ЦПЗ характеризується певним вмістом повітря (пористістю), що впливає на електричну провідність зв'язки, яка, у свою чергу, впливає на внутрішню електричну міцність ізолятора, роблячи зв'язку вразливою до впливу сильного електричного поля [3].

При застосуванні до ізолятора механічного навантаження, тобто розтягуючого зусилля, в його силовому вузлі відбувається розподіл механічних напружень, який залежить від конфігурації та фізико-механічних властивостей складових елементів високовольтного ізолятора [4].

У зв'язку з підвищенням вимог до допустимого рівня радіозавад ізоляторів [5] виникає необхідність подальших досліджень електричних і механічних характеристик ізоляторів, вдосконалення їх конструкцій, розвитку існуючих та розробки нових методологічних основ їх розрахунку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Протягом значного часу питання підвищення технічних характеристик високовольтних тарілчастих ізоляторів, їх надійності в процесі експлуатації приділяється значна увага.

Так, у [6] наведено результати розрахунків напруженості електричного поля в об'ємі скляного ізолятора шляхом моделювання поля за допомогою

методу кінцевих елементів, який реалізовано в пакетах Maxwell та CST EM Studio. Проведене моделювання [6] показує, що небезпечні напруженості поля виникають на поверхнях ЦПЗ як стрижня, так і шапки в місцях контакту з повітрям. Такі значення полів можуть призводити до появи поверхневих розрядів на його внутрішній і зовнішній поверхнях, що в результаті може ініціювати перекриття всього ізолятора.

Авторами експериментальних і теоретичних досліджень зразків ізоляторів типу ПС120Б, які знаходились в експлуатації на повітряних лініях [7], доведено, що при напрузі 30 кВ на їх внутрішній поверхні виникають поверхневі розряди, які можуть ініціювати перекриття всієї гірлянди ізоляторів. Результати розрахунку напруженості електричного поля в об'ємі ізолятора за [7] показали, що максимального значення напруженість поля досягає на поверхні стрижня, а також ЦПЗ, що може призводити до появи високочастотних коливань і відповідних перенапруг на ізоляції повітряних ліній.

У [8] представлено спосіб розрахунку електричного поля тривимірної моделі високовольтних ізоляторів за допомогою програмного забезпечення на основі методу кінцевих елементів. Порівняння результатів розрахунків та експериментальних даних показало, що метод моделювання [8] корисний для розрахунку електричного поля високовольтних ізоляторів при проектуванні високовольтної лінії електропередачі.

Аналіз досліджень [6—8] показав, що в цих працях не приділено достатньої уваги питанню підвищення технічних характеристик високовольтних ізоляторів, хоча базові основи таких досліджень викладені в [9; 10]. У зв'язку з цим запропоноване дослідження електричних і механічних характеристик високовольтних лінійних скляних ізоляторів є актуальним.

Метою статті є дослідження можливостей удосконалення конструкції і покращення електричних характеристик високовольтного лінійного тарілчастого ізолятора.

Викладення основних результатів дослідження. Конструкція тарілчастого ізолятора представлена на рис. 1 [11]. На головці скляної (або фарфорової) ізоляційної деталі ізолятора за допомогою ЦПЗ кріпиться шапка з високоміцного чавуну. Стрижень, який має потовщення (з одного боку — конічне, з іншого — у вигляді еліпсоїда обертання), кріпиться за допомогою ЦПЗ своєю конічною частиною у внутрішній порожнині головки ізолятора.

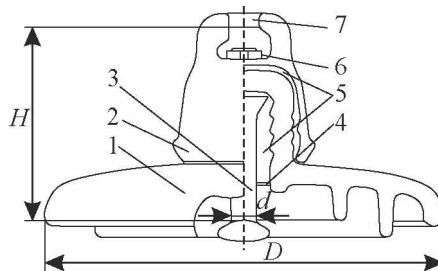


Рис. 1 Конструкція підвісного тарілчастого ізолятора:

- 1 — ізоляційна деталь ізолятора; 2 — шапка ізолятора; 3 — стрижень ізолятора;
4 — бітумна промазка; 5 — цементно-піщана зв'язка; 6 — пружинний замок; 7 — паз

Внутрішня частина головки ізолятора і частина стрижня, яка стикається зі зв'язкою, покриваються тонким, близько 0,1 мм, шаром компенсуючої бітумної промазки. Для запобігання корозії всі металеві частини оцинковуються [12].

У подальшому, як приклад, будемо розглядати скляний тарілчастий ізолятор типу ПС120Б, призначений для електричних мереж змінного струму.

Вихідні геометричні параметри ізолятора наведені в табл. 1.

Таблиця 1. Геометричні параметри ізолятора типу ПС120Б [11]

Тип ізолятора	Максимальний номінальний діаметр ізоляційної деталі D , мм	Номінальна будівельна висота H , мм	Стрижневе з'єднання діаметром d , мм [13]
ПС120Б	255	127	16

Для дослідження високовольтного ізолятора даного типу на допустимий рівень радіозавад на стандартизованій частоті 1 МГц було використано розроблену кафедру техніки і електрофізики високих напруг Київського політехнічного інституту ім. Ігоря Сікорського та метрологічно атестовану Державним підприємством «Укрметртестстандарт» установку для випробування ізоляторів на допустимий рівень радіозавад [14].

У результаті отримано графік залежності рівня радіозавад V (у децибелах) від випробувальної напруги $U_{\text{випр}}$ (діюче значення), який представлений на рис. 2.

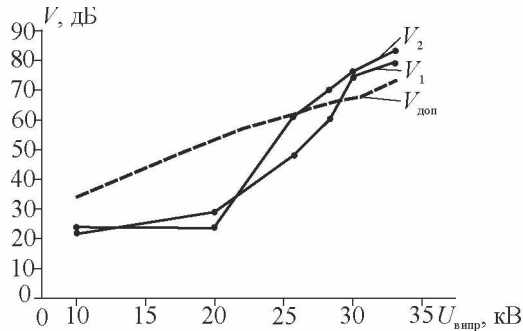


Рис. 2 Залежність рівня радіозавад від випробувальної напруги ізолятора $U_{\text{випр}}$: V_1, V_2 — рівні радіозавад двох зразків ізолятора; $V_{\text{доп}}$ — допустимий рівень радіозавад

З графіка на рис. 2 видно, що при збільшенні напруги понад $U_{\text{випр}} = 20$ кВ спостерігається різке збільшення рівня радіозавад зразка ізолятора V_2 , який перевищує допустиме значення в діапазоні $U_{\text{випр}} \geq 26,4$ кВ. При напрузі $U_{\text{випр}} \geq 28,8$ кВ відбувається перевищення допустимого значення рівня радіозавад зразка ізолятора V_1 .

Як зазначено в [15], причиною збільшення рівня радіозавад є виникнення коронного або ковзного розрядів біля стрижня та шапки ізолятора.

Однак при підключенні до стрижня ізолятора типу ПС120Б високої змінної напруги $U = 35$ кВ, проведені авторами статті спостереження за ГОСТ 1516.2 [16], показують, що біля стрижня та шапки нових виготовлених тарілчастих ізоляторів розрядів не відбувається.

За таких обставин різке збільшення рівня радіоавар може бути пояснене інтенсивним розвитком часткових розрядів (ЧР) в області ЦПЗ біля конічної частини стрижня ізолятора, які спричинені певним вмістом повітря та пористістю ЦПЗ.

У зв'язку з цим було проведено дослідження електричного поля високовольтного лінійного ізолятора (рис. 1) за допомогою його моделювання в програмному пакеті Comsol Multiphysics [17], в якому розраховувалась віссиметрична задача розподілу потенціалу методом кінцевих елементів.

При розрахунках були прийняті такі дані [18]:

- для бітумної промазки — відносна діелектрична проникність $\epsilon_r = 2.75$, електропровідність $\sigma = 3.16 \cdot 10^{-14}$ См/м;

- для цементно-піщаної зв'язки — відносна діелектрична проникність $\epsilon_r = 6$; електропровідність $\sigma = 2 \cdot 10^{-8}$ См/м;

- для скляної ізоляційної деталі — відносна діелектрична проникність $\epsilon_r = 5.87$; електропровідність $\sigma = 7.36 \cdot 10^{-15}$ См/м;

- прикладена напруга для ізолятора дорівнює амплітудному значенню і становить, відповідно, $U = 10\sqrt{2}$; $20\sqrt{2}$; $30\sqrt{2}$; $35\sqrt{2}$ кВ.

На рис. 3 представлений переріз розрахункової моделі ізолятора типу ПС120Б.

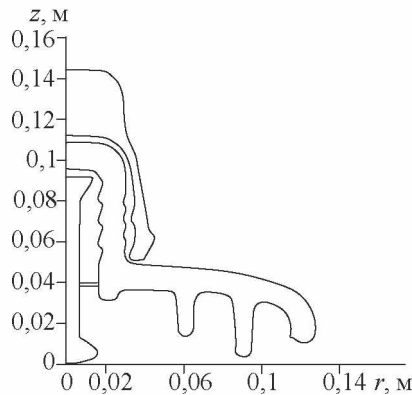


Рис. 3. Переріз розрахункової моделі ізолятора типу ПС120Б в Comsol Multiphysics

Результати розрахунку розподілу напруженості електричного поля в ізоляторі приведені на рис. 4.

З картини (рис. 4) встановлено, що найбільш напруженою в ізоляторі є область конічної частини стрижня ізолятора, де максимально проявляється дія електричного поля. Розрахункова напруженість в області заокруглення радіусом $R = 0,5$ мм конічної частини стрижня ізолятора становить $E = 42,3$ кВ/см (амплітудне значення) при напрузі на ізоляторі $U = 10\sqrt{2}$ кВ.

З метою зниження напруженості електричного поля в області ЦПЗ біля конічної частини стрижня ізолятора запропоновано удосконалення конструкції ізолятора, яке полягає у збільшенні радіуса заокруглення R конічної частини стрижня. Але при цьому необхідно забезпечити еквівалентність моделей за умовою рівності напружень стискання $\sigma_{ст}$ ЦПЗ.

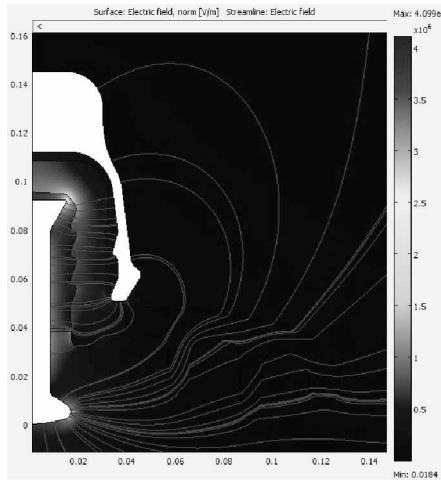


Рис. 4. Картина розподілення напруженості електричного поля в ізоляторі типу ПС120Б в Comsol Multiphysics при напрузі $U=10\sqrt{2}$ кВ

Розрахункова модель стрижня ізолятора при заокругленні його конічної частини представлена на рис. 5.

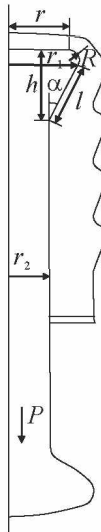


Рис. 5. Розрахункова модель ЦПЗ і стрижня ізолятора при заокругленні його конічної частини

Визначення напруження стискування $\sigma_{ст}$ ЦПЗ проведено за формулою [19]:

$$\sigma_{ст} = \frac{1,1P \sin \alpha}{S_k}, \quad (1)$$

де P — максимальне механічне нормоване навантаження, кН; S_k — площа поверхні конічної частини стрижня, m^2 та α — кут за рис. 5; 1,1 — коефіцієнт

«запасу». Площа S_k може бути знайдена за формулою (2), як для поверхні зрізаного конуса:

$$S_k = \pi(r_1 + r_2)l, \quad (2)$$

де r_1 — радіус верхньої основи зрізаного конуса, м; r_2 — радіус нижньої основи зрізаного конуса, тобто радіус циліндричної частини стрижня, м; l — твірна зрізаного конуса, м.

Виходячи з геометричної побудови (рис. 5), радіус верхньої основи зрізаного конуса й твірна зрізаного конуса можуть бути розраховані за формулами (3), (4):

$$r_1 = r + R \cos \alpha; \quad (3)$$

$$l = \sqrt{(h - R)^2 + (r - r_2)^2 - R^2}, \quad (4)$$

де R — радіус заокруглення конічної частини стрижня, м; h — висота конічної частини стрижня ізолятора, м; α — кут нахилу конічної частини стрижня ізолятора (наприклад, у градусах).

Для забезпечення рівності $\sigma_{ст}$ при різних радіусах заокруглення конічної частини стрижня R від 0,5 до 3,5 мм було проведено варіювання висоти конічної частини стрижня ізолятора h . У результаті отримано розрахункові геометричні параметри конічної частини стрижня ізолятора, які наведені в табл. 2.

Таблиця 2. Розрахункові геометричні параметри конічної частини стрижня ізолятора

№	R , м	r , м	r_1 , м	r_2 , м	h , м	α , °	l , м
1	0,0005	0,0144	0,0148	0,008	0,0125	30,0	0,0136
2	0,001	0,0135	0,0144	0,008	0,0132	28,7	0,0133
3	0,0015	0,0127	0,0139	0,008	0,0137	27,4	0,0130
4	0,002	0,0118	0,0136	0,008	0,0143	26,1	0,0127
5	0,0025	0,0109	0,0132	0,008	0,0148	24,9	0,0123
6	0,003	0,0101	0,0128	0,008	0,0152	23,6	0,0120
7	0,0035	0,0092	0,0124	0,008	0,0156	22,4	0,0116

Проведено ряд розрахунків максимального значення напруженості електричного поля в Comsol Multiphysics для конструкцій ізоляторів з розрахунковими геометричними параметрами конічної частини стрижня ізолятора згідно з табл. 2. Отримані результати наведені в табл. 3 та представлені на рис. 6, на якому зображені графіки залежності максимальної напруженості електричного поля від радіуса заокруглення стрижня ізолятора.

Таблиця 3. Результати розрахунків максимальної напруженості електричного поля при зміні радіуса заокруглення конічної частини стрижня ізолятора R та розрахунковому значенні прикладеної напруги U

№	U , кВ	E , кВ/см						
		$R = 0,5$ мм	$R = 1$ мм	$R = 1,5$ мм	$R = 2$ мм	$R = 2,5$ мм	$R = 3$ мм	$R = 3,5$ мм
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	$10\sqrt{2}$	42,3	31,7	27,4	25,2	23,5	22,3	21,4

1	2	3	4	5	6	7	8	9
2	$20\sqrt{2}$	84,6	63,4	54,9	50,5	47,1	44,7	42,9
3	$30\sqrt{2}$	126,9	95,2	82,3	75,7	70,6	67,0	64,3
4	$35\sqrt{2}$	148,1	111,03	96,3	88,2	82,3	78,1	75,0

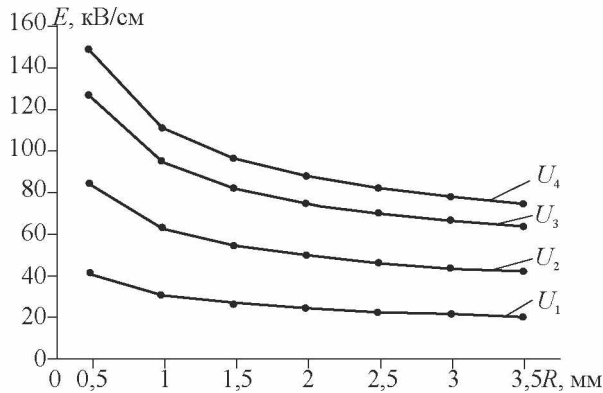


Рис. 6. Залежність максимальної напруженості електричного поля E від радіуса заокруглення конічної частини стрижня ізолятора R при різних значеннях напруги $U_1 \dots U_4$, кВ ($10\sqrt{2}$; $20\sqrt{2}$; $30\sqrt{2}$; $35\sqrt{2}$)

З графіків (рис. 6) видно, що при збільшенні радіуса заокруглення R конічної частини стрижня ізолятора від 0,5 до 3,5 мм максимальна напруженість електричного поля E в ізоляторі буде зменшуватися.

При проведенні структурних експериментальних досліджень зразків зрізів ЦПЗ високовольтних лінійних ізоляторів типу ПС120Б виявлено, що вони містять сфероподібні повітряні включення (пори) з діаметром d_v від 0,05 до 0,25 мм.

Було розглянуто механізм виникнення часткового розряду у сферичному включенні (порі), заповненому газом з діелектричною проникністю ϵ_v , яке знаходиться в товщі діелектрика з діелектричною проникністю ϵ_d [20]. Під дією зовнішнього електричного поля діелектрик поляризується і на межі пори з'являються некомпенсовані заряди, які призводять до посилення електричного поля всередині газового включення. З урахуванням цього електричне поле всередині газового включення визначається [21]:

$$E_v = \frac{3\epsilon_d}{\epsilon_v + 2\epsilon_d} E_d, \quad (5)$$

де E_d — напруженість електричного поля в ЦПЗ, що оточує газове включення; ϵ_v — діелектрична проникність газу; ϵ_d — діелектрична проникність ЦПЗ.

Таким чином, електричне поле всередині пори перевищує поле в ЦПЗ. Якщо напруженість електричного поля всередині включення досягне критичного значення, почнеться процес ударної іонізації, достатньої для пробою

включення. Критичне значення напруги, при якому виникає ЧР, визначається законом, еквівалентним закону Пашена [22; 23]:

$$U_{\text{к}} = \frac{43,6 \cdot 10^6 \cdot P}{\ln(P \cdot d_{\text{в}}) + 12,8}, \quad (6)$$

де P — тиск, атм; $d_{\text{в}}$ — діаметр сферичного включення, м.

Максимальна напруженість електричного поля в ЦПЗ $E_{\text{д}}$ була обрана згідно з рис. 6. Різниця потенціалів у газовому включенні відповідно до (5) становить:

$$U_{\text{в}} = E_{\text{в}} d_{\text{в}}, \quad (7)$$

де $E_{\text{в}}$ розраховується за (5).

Виходячи з розрахункових значень за (6) і (7), було визначено граничні значення напруги на ізоляторі $U_{\text{гр}}$, при яких виникає пробій сферичного включення (пори). Одержані розрахункові результати представлені графічно на рис. 7.

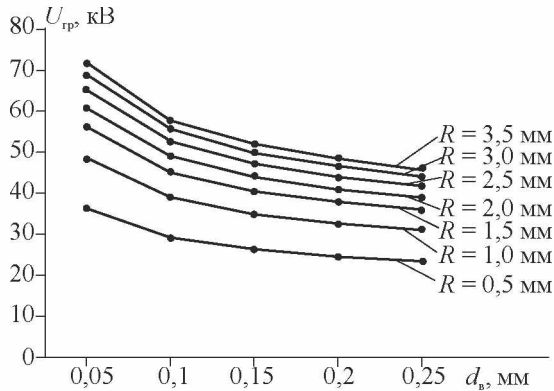


Рис. 7. Графік залежності граничних значень напруги на ізоляторі $U_{\text{гр}}$, при яких відбувається пробій включення (пори), залежно від діаметра пори $d_{\text{в}}$ для різних значень радіуса заокруглення R кінцевої частини стрижня

Як впливає з даних (рис. 7), при діаметрі включення (пори) $d_{\text{в}} = 0,25$ мм відбувається пробій при граничному значенні напруги на ізоляторі $U_{\text{гр}} = 23,4$ кВ (17,3 кВ діюче значення) для радіусі заокруглення $R = 0,5$ мм, при $U_{\text{гр}} = 31,2$ кВ (22,1 кВ діюче значення) для $R = 1$ мм, при $U_{\text{гр}} = 36$ кВ (25,5 кВ діюче значення) для $R = 1,5$ мм, при $U_{\text{гр}} = 39,1$ кВ (27,6 кВ діюче значення) для $R = 2$ мм, при $U_{\text{гр}} = 42$ кВ (29,7 кВ діюче значення) для $R = 2,5$ мм, при $U_{\text{гр}} = 44,2$ кВ (31,3 кВ діюче значення) для $R = 3$ мм, при $U_{\text{гр}} = 46,1$ кВ (32,6 кВ діюче значення) для $R = 3,5$ мм. Максимальні значення напруги на ізоляторі $U_{\text{гр}}$ при яких відбувається пробій, відповідають діаметру включення $d = 0,05$ мм і дорівнюють для $R = 0,5$ мм $U_{\text{гр}} = 36,4$ кВ (25,7 кВ діюче значення); $R = 1$ мм $U_{\text{гр}} = 48,5$ кВ (34,3 кВ діюче значення); $R = 1,5$ мм $U_{\text{гр}} = 56,1$ кВ (39,7 кВ діюче значення); $R = 2$ мм $U_{\text{гр}} = 60,9$ кВ (43,1 кВ діюче значення); $R = 2,5$ мм $U_{\text{гр}} = 65,3$ кВ (46,2 кВ діюче значення), $R = 3$ мм $U_{\text{гр}} = 68,8$ кВ (48,6 кВ діюче значення), $R = 3,5$ мм $U_{\text{гр}} = 71,8$ кВ (50,8 кВ діюче значення).

При запропонованому удосконаленні конструкції високовольтного тарілчастого ізолятора, яке полягає у збільшенні радіуса заокруглення R його конічної частини стрижня від 0,5 мм до 3,5 мм, одержуємо зниження максимальної напруженості електричного поля E в області ЦПЗ ізолятора у 1,97 раза.

Аналіз механізму виникнення часткового розряду в сферичному включенні (пори) цементно-піщаної зв'язки показав, що пробій буде відбуватися при мінімальних граничних значеннях напруги на ізоляторі $U_{гр}$ для діаметра включення (пори) $d = 0,25$ мм та при максимальних граничних значеннях напруги на ізоляторі $U_{гр}$ для діаметра включення (пори) $d = 0,05$ мм.

Запропоноване зниження напруженості електричного поля E в області цементно-піщаної зв'язки біля конічної частини стрижня ізолятора забезпечить підвищення (по нарузі) порогу виникнення часткових розрядів у високовольтних тарілчастих ізоляторах, який за вищепроведеними розрахунками для радіуса заокруглення конічної частини стрижня ізолятора $R = 3,5$ мм досягне 32,6 кВ (діюче значення) та наближається до граничного значення напруги робочого діапазону, завдяки чому можна очікувати суттєвого зниження рівня радіозавад високовольтних лінійних тарілчастих ізоляторів

Висновки

1. Запропоновано удосконалення конструкції високовольтного тарілчастого ізолятора, яке полягає у збільшенні радіуса заокруглення його конічної частини стрижня при забезпеченні рівності максимальних напружень стискання $\sigma_{ст}$ цементно-піщаної зв'язки.

2. При запропонованому удосконаленні конструкції високовольтного тарілчастого ізолятора досягається зниження максимальної напруженості електричного поля E в області цементно-піщаної зв'язки ізолятора в 1,97 раза.

3. Проаналізовано умови виникнення часткових розрядів у повітряних включеннях (порах) цементно-піщаної зв'язки та визначені граничні значення напруги на ізоляторі, при яких виникає пробій включень.

4. Одержані результати забезпечують можливість створення удосконалених конструкцій високовольтних лінійних тарілчастих ізоляторів зі зменшенням їх рівня радіозавад.

Література

1. Кім Є.Д. Методика оценок качества закалки стеклодеталей высоковольтных линейных изоляторов / Є. Д. Кім // Електрифікація транспорту. — 2014. — № 8. — С. 34—39.
2. ДСТУ 2203. Ізолятори лінійні підвісні тарілчасті. Загальні технічні умови. — Київ : Держстандарт України, 1993. — 27 с.
3. Михайлов Д.И. Изоляторы высокого напряжения: учеб. пособие / Д. И. Михайлов. — Новочеркасск : НПИ, 1977. — 85 с., ил.
4. Кім Є.Д. Методологічні основи удосконалення високовольтних лінійних ізоляторів та методів їх випробувань: дис. ... д-ра наук: 05.09.13 / Є.Д. Кім. — Харків, 2003. — 410 с.
5. IEC 60383-1. Insulators for overhead lines with a nominal voltage above 1000 V. Ceramic or glass insulator units for a. c. systems. Definitions, test methods and acceptance criteria. — The British Standards Institution, 1998. — 111 p.
6. Шевченко С.Ю. Моделирование электрического поля стеклянного изолятора в ВЛ 110 кВ / С.Ю. Шевченко, А.А. Окунь // Вестник Нац. техн. ун-та «ХПИ»: сб. науч. тр.

Темат. вып.: Энергетика: надёжность и энергоэффективность. — Харьков : НТУ «ХПИ». — 2011. — № 3. — С. 136—143.

7. *Бржезицький В.О.* Дослідження причин електричного перекидання підтримуючих ізолюючих підвісок середньої фази повітряної лінії електропередачі / В.О. Бржезицький, А.А. Щерба, О.Д. Подольцев, Є.О. Троценко, С.Ю. Шевченко, Я.О. Гаран, С. Атарод // Наукові вісті Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». — 2011. — № 6. — С. 36—41.

8. *Kontargyri V.T.* Measurement and simulation of the voltage distribution and the electric field on a glass insulator string / V.T. Kontargyri, L.N. Plati, I.F. Gonos, I.A. Stathopoulos // Measurement. — 2008. — Vol. 41, # 5. — P. 471—480.

9. *Троценко Е.А.* Моделирование электрического поля изолирующих подвесок воздушных линий электропередач 35 кВ / Е.А. Троценко, А.А. Коваль // Доповіді за матеріалами Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених, аспірантів і студентів «Сучасні проблеми електроенергетехніки та автоматики». — Київ : «Політехніка», 2014. — С. 329—330.

10. *Бржезицький В.О.* Експериментальне дослідження електричного поля повітряної лінії електропередавання змінного струму класу 330 кВ / В.О. Бржезицький, В.М. Сулейманов, Є.О. Троценко, В.І. Хомініч, А.Г. Кулакевич // Энергетика: економіка, технології, екологія. — 2016. — № 2(44). — С. 7—12.

11. ГОСТ 27661. Изоляторы линейные подвесные тарельчатые. Типы, параметры и размеры, 1988. — 11 с.

12. *Кулик Н.М.* Влияние цементных связей на прочностные характеристики и долговечность подвесных высоковольтных изоляторов: дис. ... к-та наук: 05.17.11 / Н.М. Кулик. — Москва, 1997. — 283 с.

13. ГОСТ 27396. Арматура линейная. Сферические шарнирные соединения изоляторов. Размеры, 1993. — 21 с.

14. *Бржезицький В.О.* Розробка установки для випробування високовольтних ізоляторів на допустимий рівень радіозавод / В.О. Бржезицький, Я.О. Гаран, М. Ю. Лапоша // Технологічний аудит та резерви виробництва. — Харків, 2016. — № 1/1(27). — С. 37—41.

15. Техника высоких напряжений: Учебник для вузов / И.М. Богатенков, Ю.Н. Бочаров, Н.И. Гумерова, Г.М. Иманов и др.; Под ред. Г.С. Кучинского. СПб.: Энергоатомиздат. Санкт-Петербургское отделение, 2003. — 608 с.: ил.

16. ГОСТ 1516.2 Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжение 3 кВ и выше. Общие методы испытаний электрической прочности изоляции, 1997. — 32 с.

17. Офіційний сайт COMSOL Multiphysics [Електронний ресурс]. — Режим доступу : <http://www.comsol.com/>.

18. Справочник по электротехническим материалам: в 3-х т. / Под ред. Ю.В. Корицкого и др. — 3-е изд., перераб. — Москва : Энергоатомиздат, 1987. — Т. 2. — 464 с.

19. *Костюков Н.С.* Электрические изоляторы / Н.С. Костюков, Н.В. Минаков, В.А. Князев и др. — Москва : Энергоатомиздат, 1984. — 296 с.

20. *Кучинский Г.С.* Изоляция установок высокого напряжения: учебник для вузов / Г.С. Кучинский В.Е. Кизевтер Ю.С. Пинталь; Под общ. ред. Г.С. Кучинского. — Москва : Энергоатомиздат, 1987. — 368 с.: ил.

21. *Исмагилов Ф.Р.* Математическое моделирование развития частичных разрядов в процессе старения диэлектрика / Ф.Р. Исмагилов, Д.В. Максудов // Вестник УГАТУ. — 2011. — Т. 15, № 3(43). — С. 98—100.

22. *Дмитриевский В.С.* О минимуме напряжения начала ионизации в газовом включении / В.С. Дмитриевский // Известия Томского политехнического института. — 1971. — Т. 204. — С. 9—13.