

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПРОЦЕСІВ ПІД ЧАС ВИНИКНЕННЯ ЧАСТКОВИХ РОЗРЯДІВ У СУЧАСНІЙ ПОЛІМЕРНІЙ ІЗОЛЯЦІЇ СИЛОВИХ КАБЕЛІВ

А.А. Щерба^{*}, академік НАН України, О.Д. Подольцев^{**}, докт. техн. наук,

М.С. Гуторова^{***}, канд. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна.

E-mail: anat.shcherba@gmail.com; podoltsev.alexander@gmail.com; ma_gu@ukr.net.

Розроблено Simulink-модель сучасної полімерної ізоляції силових кабелів з газовим мікровключенням сферичної форми, в якому виникають високочастотні часткові розряди (ЧР). У процесі чисельних розрахунків та дослідженні таких порогових електрофізичних процесів, як ЧР у твердій полімерній ізоляції, враховувалися величина напруги на початку появи ЧР і за його загасання, залежність падіння напруги на мікровключенні від його розмірів та тривалість часу між розрядами, необхідна для формування у цьому газовому мікровключенні вільних електронів як необхідної умови для появи наступного ЧР. За результатами проведених розрахунків досліджено такі електрофізичні залежності, що виникають під час протікання ЧР, як вплив розмірів включення, амплітуди та частоти прикладеної синусоїдної напруги на вказані характеристики. Виявлено, що у разі збільшення діаметра d газового мікровключення зростають такі число розрядів за період і величина заряду одного ЧР, причому ця величина зростає пропорційно степеневій функції $d^{1.5+2}$. Під час підвищення напруги на ізоляції кабелю зростає число ЧР за період, що викликає зростання інших характеристик, а у разі збільшення частоти прикладеної напруги практично пропорційно зростає середнє значення струму ЧР. Отримуючи результати розрахунку рівня ЧР, що виникають у разі прикладання високочастотної напруги, можна отримувати результати для основних характеристик ЧР, що виникають на інших частотах, зокрема на промисловій частоті 50 Гц, прогнозуючи технічний стан ізоляції щодо залишкової тривалості її безаварійної експлуатації. Бібл. 18, рис. 6, табл. 1.

Ключові слова: силовий кабель, тверда електроізоляція, газове мікровключення, часткові розряди, електрофізичні характеристики часткових розрядів, Simulink-модель.

Необхідність підвищення безпеки і надійності високовольтної (ВВ) ізоляції кабельних ліній електропередачі (ЛЕП), турбо- і гідрогенераторів, потужних електромашин та іншого електрообладнання енергооб'єктів України у даний воєнний період загострює актуальність розробки нових підходів до мобільного моніторингу технічного стану такої ізоляції задля визначення доцільності та умов подальшого використання зазначених енергооб'єктів. Прийняття рішення про необхідність додаткового технічного обслуговування, ремонту та заміни ВВ обладнання задля запобігання його аварійного виходу із експлуатації в першу чергу базується на отриманні об'єктивної оцінки технічного стану його ізоляції на основі виявлення та ідентифікації наявних в ній мікродефектів і прогнозування її залишкового ресурсу (терміну безпечної експлуатації) [1].

Зазвичай у промислово розвинених країнах Європи, Америки та Азії дослідження технічного стану ізоляції ВВ кабелів та іншого енергетичного обладнання проводять планово в стаціонарних лабораторіях. Вчені Інституту електродинаміки НАН України (м. Київ), ПАТ "Завод Південкабель" (м. Харків), НТУ України "Київський політехнічний інститут ім. І.Сікорського" та НТУ "Харківський політехнічний інститут" розробили електротехнологічний комплекс серійного виробництва і сертифікації вітчизняних кабельних систем світового рівня з твердою структурно зміцненою так званою "зшитою" поліетиленовою (ЗПЕ) ізоляцією на напругу до 400 кВ [2]. Зараз ПАТ "Завод Південкабель", на території якого створено цей комплекс, є єдиним в Україні виробником новітньої вітчизняної кабельно-провідникової продукції (КПП) на всі класи напруги до 400 кВ для потужних енергооб'єктів критичної інфраструктури України та об'єктів спеціального призначення. Вказану КПП ви-

користують також задля відновлення роботи промислових і комунальних енергетичних об'єктів нашої Батьківщини, зруйнованих російським агресором.

Для випробування такої КПП синусоїдною напругою до 500 кВ згідно стандарту СОУ-Н МЕВ 40.1-37471933-49:2011 [3] з визначенням електричних характеристик її ЗПЕ ізоляції для міжнародної сертифікації на ПАТ "Завод Південкабель" створено електротехнічну систему (ЕТС) з послідовним резонансним індуктивно-ємнісним контуром (ІСК) добротністю від 20 до 40 за протікання синусоїдного струму частотою 50 Гц. Для створення такого резонансного ІСК використовується ємність ВВ кабелю довжиною 0,1–1 км і регульована індуктивність двох індукторів фірми Hipotronics (США) масою по 18 т кожний [2]. Така ЕТС підключається до напруги 380 В трифазної електромережі частотою 50 Гц, а для додаткового підвищення в ній напруги використовується автотрансформатор Пашена і узгоджувальний однофазний трансформатор.

Аналогічну структуру мають ЕТС таких відомих виробників високовольтної КПП, як АВВ (Німеччина), Nexans (Франція), Bruggkabel (Бельгія), Sumitomo Electric (Японія) та Okonite (США) [2]. Такі ЕТС забезпечують досить точне (з похибкою, меншою 2 пКл) вимірювання рівня часткових розрядів (ЧР) у ВВ ізоляції сучасної КПП. Їхньою найбільш важливою властивістю є реалізація параметричної стабілізації струму в електричних колах навантаження навіть за швидкого змінення його електричного опору. Так навіть у разі виникнення електропробою ВВ ізоляції під час її випробування підвищеною напругою в ЕТС із резонансним ІСК добротністю $Q = 40$ напруга на ній швидко зменшується теж в 40 разів, відповідно зменшуючи струм в ізоляції, що запобігає виникненню аварійних режимів [2].

Відомо, що поява ЧР у сучасній ВВ ізоляції є однією з перевірених ознак наявності в ній мікродефектів (в першу чергу газових мікровключень в мікротріщинах і післятріїнгових порожнинах), які зменшують її надійність і залишковий безпечний ресурс, а для спрощення теоретичних і практичних досліджень щодо оцінки такого ресурсу розроблено багато математичних моделей [4–8]. Найбільш відомою і поширеною є математична модель з трьома ємностями, запропонована Уайтхедом у 1951 році [9], яка в даний час успішно використовується задля дослідження перехідних електричних процесів у ВВ ізоляції у разі появи в ній ЧР та задля оцінки її залишкового безпечного ресурсу [10, 11].

Проте на даний час ЕТС всіх світових виробників використовують резонансні ІСК на частоті 50 Гц, на якій ємнісний електричний опір сучасної ЗПЕ ізоляції ВВ КПП є досить великим, що вимагає створення реактору з таким же великим індуктивним опором на цій же частоті. Так сучасний кабель довжиною 500 м зі ЗПЕ ізоляцією на напругу до 330 В на частоті 50 Гц буде мати ємнісний електричний опір близько 13 кОм. Для реалізації послідовного резонансного ІСК треба створити реактор з таким же індуктивним опором 13 кОм, здатним пропускати струм до 40 А. При цьому кабель і реактор повинні пропускати потужність до 20 МВА, що є досить складною технічною проблемою [2].

ЕТС трансформаторного типу практично неможливо використати для створення як мобільних, так і стаціонарних установок для діагностики ЧР у ВВ ізоляції енергооб'єктів, оскільки виникнення електропробою в ізоляції не зменшує прикладену до неї напругу в таких ЕТС і викликає недопустимо великий (по суті аварійний) струм короткого замикання.

В той же час було виявлено, що зі зростанням частоти f прикладеної напруги така важлива характеристика як середнє значення струму ЧР зростає приблизно пропорційно цій частоті [12]. Тому отримані результати щодо впливу частоти струму на характеристики ЧР дають змогу за результатами вимірювання рівня ЧР на високій частоті перераховувати ці характеристики на частоту 50 Гц та прогнозувати таким чином технічний стан і залишковий безпечний ресурс ізоляції силових кабелів та інших енергооб'єктів за напругах і струмах промислової частоти 50 Гц.

Задля аналізу протікання імпульсних високочастотних електромагнітних процесів у ВВ ізоляції у разі появи ЧР використовувався чисельний розрахунок електричного поля на основі методу скінченних елементів, як у роботі [12]. Перевагою такого підходу є можливість отримувати розподіл електричного поля у включенні та з'ясувати його стан перед електричним пробоем. У такий моделі пробій газового включення в діелектрику моделюється шляхом значного збільшення електропровідності газу. Недоліком такого аналізу є складність розрахунку та великі часові й комп'ютерні затрати.

Задля удосконалення ємнісної моделі ЧР доцільно враховувати одночасний вплив декількох важливих факторів, які визначають такі електричні процеси в ізоляції, як залежність напруги появи ЧР і напруги його загасання від розміру газового включення в ізоляції та наявності необхідного проміжку часу для виникнення вільних електронів у включенні, як необхідної умови для появи наступного розряду, що особливо важливо під час дослідження ЧР на високій частоті прикладеної напруги. Проте в опублікованих джерелах дослідження з одночасним врахуванням вищезазначених факторів не проводилися.

Тому **мета даної роботи** полягала в: 1) розробці уточненої математичної моделі електричних процесів у разі виникнення ЧР у газовому мікровключенні полімерної ізоляції силових кабелів, що одночасно враховує декілька факторів; 2) реалізації цієї моделі в пакеті програм Matlab/Simulink та 3) визначення за допомогою комп'ютерного моделювання основних характеристик таких ЧР і впливу на них розміру включення, амплітуди та частоти прикладеної напруги.

1. Simulink-модель електричних процесів під час виникнення ЧР в об'ємі полімерної ізоляції силового кабелю за наявності газового дефекту.

У роботі як модельний зразок розглядався фрагмент силового кабелю із полімерною ізоляцією на напругу 20 кВ, схематично показаний на рис. 1, а. Припускалося, що ізоляція мала дефект у вигляді газового мікровключення сферичної форми із діаметром d , в якому у разі підключення до джерела синусоїдної напруги виникали ЧР. На рисунку наведено також ємнісне еквівалентне коло такого фрагменту. В цьому колі C_{Void} – ємність включення, C_1 – ємність ізоляції між включенням і електродами, C_i – ємність робочої ізоляції фрагменту кабелю (див. рис. 1, а).

У роботі використовувалися наступні вирази для розрахунку значень цих величин [15]:

$$C_{Void} = \varepsilon_0 d, \quad C_1 = C_{Void} k / (1 - k), \quad \text{де } k = 1,23d / \Delta, \quad C_i = \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_r l}{\ln(R/r)}. \quad (1)$$

Значення ємності C_1 вибиралося за умови, що напруга на включенні за різних значеннях його діаметру d буде дорівнювати падінню напруги на сферичному повітряному включенні, яке розташовано у нескінченному об'ємі полімерної ізоляції із відносним значенням $\varepsilon_r = 2,3$ в однорідному електричному полі.

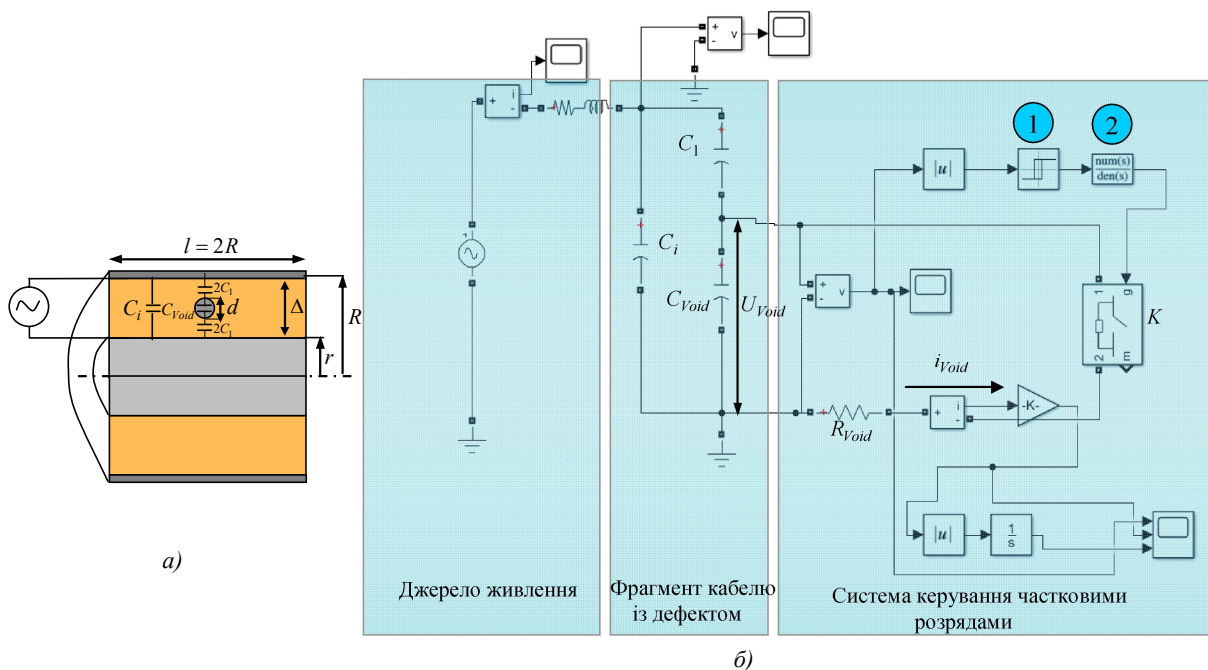


Рис. 1

Simulink-модель вибраного фрагменту кабелю із дефектом наведено на рис. 1, б, на якому показано модель високовольтного джерела живлення гармонічної напруги, модель фрагменту кабелю із дефектом у вигляді сферичного включення та систему керування процесом виникнення та загасання ЧР у цьому включенні. Це здійснюється за допомогою комутатора K , у разі включенні якого ємність C_{Void} , що відповідає включенню, розряджається на еквівалентний опір R_{Void} . У разі виключення K ємність C_{Void} заряджається від джерела живлення.

Для керування роботою цього комутатора необхідно враховувати наступне. Відомо, що існують дві умови, необхідні для виникнення ЧР у газовому включенні в діелектрику [14].

Перша умова полягає в тому, що напруженість електричного поля у включенні E_{void} має перевищувати певне початкове значення напруженості пробую газозового середовища E_{inc} . Це значення розраховується за допомогою емпіричного виразу [12, 13]

$$E_{inc} = 24,2 p(1 + 8,6/\sqrt{pd}), \quad (2)$$

де напруженість E_{inc} вимірюється в [В/м]; p – тиск газу у включенні [Па]; d – діаметр включення [м].

Другою умовою виникнення ЧР є наявність достатньої кількості електронів, необхідних для початку іонізації газу у включенні. Вони виникають завдяки процесам фотоіонізації в газі, фотоіонізації в матеріалі ізоляції та завдяки їхньої емісії з поверхні ізоляції у включення. Для виникнення цих електронів необхідний певний час, який може дорівнювати $\tau_e = 0,1 \div 3$ мс [12, 14].

Вказані умови повинні враховуватися у комп'ютерній моделі ЧР.

Задля оцінки значення напруги U_{Void} , що прикладена до газового включення в ізоляції кабелю, що знаходиться під напругою U_0 , у роботі використовується відомий вираз для поля у включенні сферичної форми, розташованому в діелектрику із однорідним полем E_0 [15]

$$E_{Void} = \frac{3\varepsilon_2}{\varepsilon_1 + 2\varepsilon_2} E_0, \quad (3)$$

де $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – відносні значення діелектричної проникності відповідно включення і діелектрику. Приймаючи $\varepsilon_1 = 1$, $\varepsilon_2 = 2,3$ (поліетилен), а також, що $U_{Void} = E_{Void}d$, $U_0 = E_0\Delta$, із (3) отримаємо

$$U_{Void} = 1,23 \frac{d}{\Delta} U_0. \quad (4)$$

Виходячи з виразу (4), значення C_1 в (1) розраховується за умови, щоб за різних значеннях діаметра включення напруга на ньому відносилася до напруги U_0 так, як у виразі (4).

Це є першим уточненням вдосконаленої моделі ЧР, яке дає можливість дослідити вплив розміру включення на основні характеристики ЧР.

Друге уточнення пов'язане із урахуванням значень напруги початку та загасання ЧР. Напруга початку ЧР U_{inc} , враховуючи вираз (2), дорівнює

$$U_{inc} = E_{inc}d = 24,2 pd(1 + 8,6/\sqrt{pd}). \quad (5)$$

На рис. 2 наведено залежності напруг за виразами (4) та (5) від діаметру включення за різних значень прикладеної до кабелю напруги U_0 . З цього рисунку видно, що існує критичне значення розміру включення – приблизно 0,2 мм для кабелю, що розглядається, коли за номінальної напруги 20 кВ ЧР у включеннях меншого розміру не виникають, оскільки напруга на цьому включенні згідно виразу (4) не буде перевищувати напругу початку ЧР, представлену у виразі (5). У включеннях більшого розміру умова виникнення ЧР, коли $U_{Void} \geq U_{inc}$, завжди буде виконуватися і будуть виникати розряди. Значення напруги загасання ЧР задавалося співвідношенням $U_{ext} = (0,3 \div 0,9) U_{inc}$ [16].

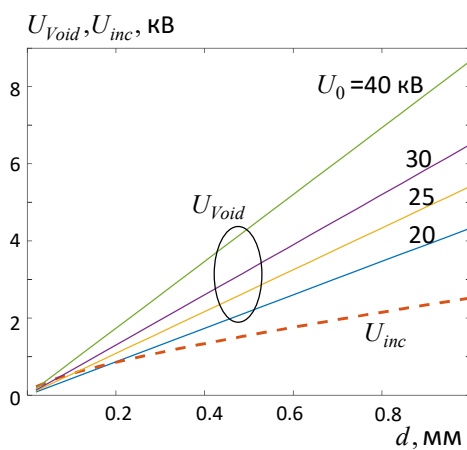


Рис. 2

Третє уточнення пов'язане із врахуванням проміжку часу τ_e , необхідного для виникнення початкових електронів, що є особливо важливим під час розрахунку ЧР, що виникають за дії високочастотної напруги.

Основні характеристики ЧР. Як основні характеристики ЧР, що розраховуються за допомогою розробленої моделі, в роботі розглядаються наступні:

- 1) n_T – число ЧР за час, що дорівнює періоду $T = 1/f$ змінення прикладеної синусоїдної напруги;
- 2) q_T – сумарний заряд, що виділяється у включенні внаслідок ЧР за період T ;
- 3) $q_{PD} = q_T / n_T$ – заряд ЧР, що відповідає одному частковому розряду у включенні;

4) $I_{PD} = f q_T = f n_T q_{PD}$ – середнє значення електричного струму, що протікає у включенні внаслідок виникнення ЧР. Саме від величини такого струму буде залежати характер руйнування діелектрика внаслідок ЧР.

2. Параметричний аналіз електричних процесів у разі виникнення часткових розрядів.

Розрахунки за різних значень параметрів еквівалентного електричного кола проводилися за допомогою побудованої Simulink-моделі, показаної на рис.1, б. Ураховувалося, що величини ємностей C_{Void} та C_1 залежать від діаметру включення d (згідно (1)), а ЧР виникає, коли напруга на включенні перевищує $U_{Void} \geq U_{inc}$, де U_{inc} розраховувалося за виразом (5), і загасає, коли напруга на включенні $U_{Void} \leq U_{ext}$, де $U_{ext} = (0,3 \div 0,9) U_{inc}$. Значення цих двох напруг задавалися в блоці 1 на рис. 1, б. Також задавалося значення мінімально-допустимого часу τ_e у блоці затримки 2 на рис. 1, б.

Під час розрахунку задавалися наступні значення основних параметрів в моделі: для кабелю – $r = 6,5$ мм, $R = 14,5$ мм, $\Delta = 8$ мм. Значення ємностей розраховувалися за виразами (1). Значення R_{Void} задавалося за умови, що $\tau_{PD} = C_{Void} R_{Void} = 1$ мкс. Тиск у включенні визначався згідно виразу (5) і було отримано $p = 0,43 \cdot 10^5$ Па. Прикладена напруга $U_0 = 25$ кВ (діюче значення), а частота $f = 50$ Гц.

Вплив напруги загасання на характеристики ЧР.

На рис. 3 наведено результати розрахунку ЧР для двох значень напруги загасання $U_{ext} = 0,3U_{inc}$ та $U_{ext} = 0,6U_{inc}$ за $d = 0,3$ мм, $U_0 = 25$ кВ.

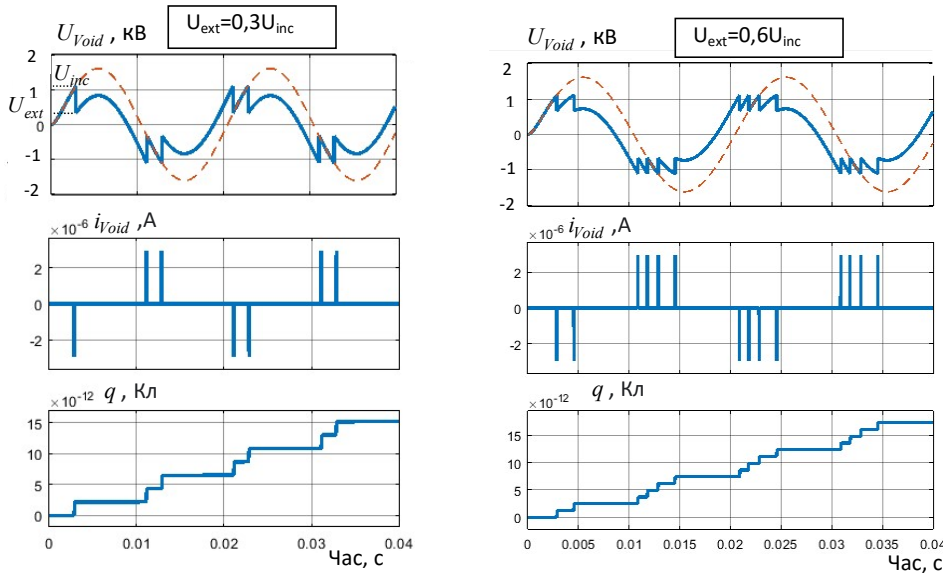


Рис. 3

На цих рисунках синьою лінією показано зміння у часі напруги на включенні U_{Void} , а червоною лінією для порівняння додатково показано таку напругу за умови, що ЧР не буде виникати у включенні. Також на цьому рисунку показано зміння у часі електричного струму у включенні $i_{Void}(t)$ та електричного заряду

$$q = \int_0^t |i_{Void}| dt.$$

З цього рисунку видно, що за $U_{ext} = 0,3U_{inc}$ характеристики ЧР будуть наступні: $n_T = 4$, $q_T = 8,5$ пКл, $q_{PD} = 2,1$ пКл, а за $U_{ext} = 0,6U_{inc}$ – $n_T = 8$, $q_T = 10,5$ пКл, $q_{PD} = 1,3$ пКл. Отже у разі збільшення U_{ext} число ЧР за період n_T зростає, що призводить до зменшення заряду одного ЧР q_{PD} . Сумарний заряд q_T , що характеризує руйнування діелектрику, при цьому зростає.

Вплив діаметру включення на характеристики ЧР.

Аналізуючи вплив діаметру включення d зазначимо, що із ростом d збільшується як напруга на включенні, так і напруга виникнення ЧР (див. рис. 2). При цьому напруга на включенні збільшується швидше, що призводить до росту заряду ЧР – величина q_{PD} . Для оцінки характеру залежності $q_{PD}(d)$ запишемо, враховуючи (1) та (5), наступний вираз:

$$q_{PD} = C_{Void} U_{inc} = 24,2 \varepsilon_0 p d^2 (1 + 8,6 / \sqrt{pd}). \quad (6)$$

З (6) можна встановити, що в залежності від співвідношення складових у дужках величина заряду буде зростати пропорційно або як $q_{PD} \approx d^{1,5}$, або як $q_{PD} \approx d^2$.

На рис. 4 наведено результати розрахунку ЧР для двох значень діаметру включення: $d = 0,3$ та 1 мм, а в таблиці наведено основні характеристики ЧР за різних значень d .

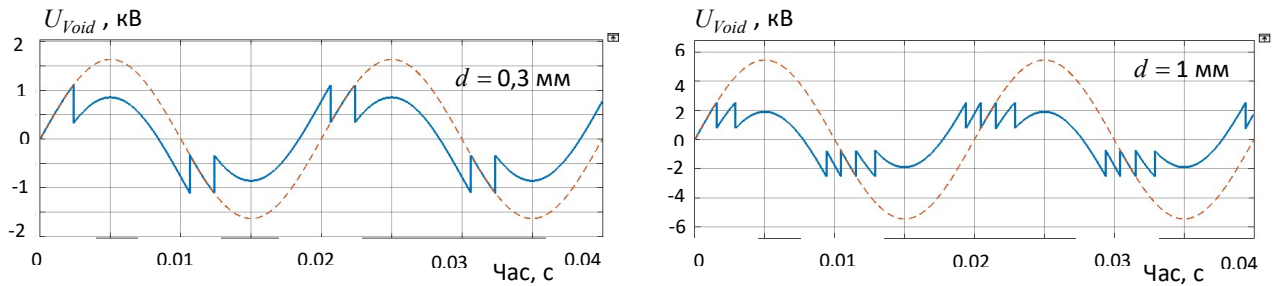


Рис. 4

d , мм	0,2	0,3	0,6	1
n_T	4	4	8	8
q_T , пКл	4,5	8,5	57	150
q_{PD} , пКл	1,1	2,1	7,1	18,7

З цих результатів видно, що зростання розміру дефекту приводить до зростання всіх наведених вище чотирьох характеристик ЧР (значення струму $I_{PD} = fq_T$ також зростає завдяки росту q_T), і характер такого зростання відповідає виразу (6).

Вплив амплітуди та частоти напруги на характеристики ЧР. На рис. 5 наведено результати розрахунку ЧР для трьох діючих значень прикладеної напруги $U_0 = 20, 30$ та 50 кВ на частоті 50 Гц, звідки видно, що через збільшення напруги збільшується число ЧР за період – величина n_T . При цьому заряд одного ЧР – q_{PD} зали-

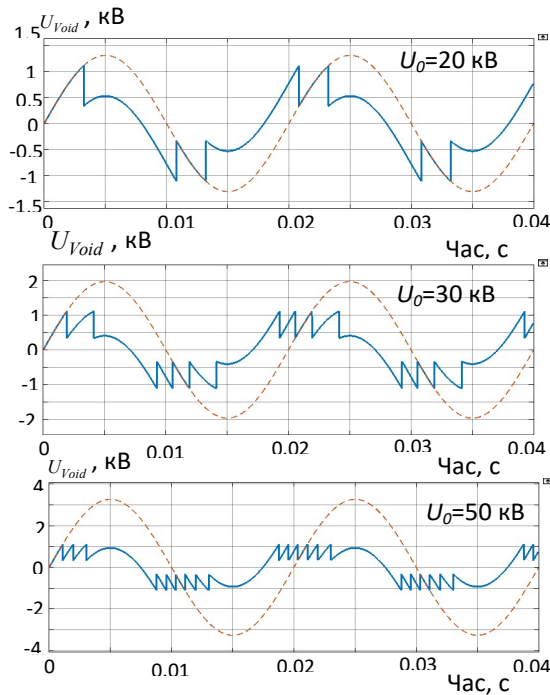


Рис. 5

шається майже незмінним. Отже, у разі збільшення напруги саме внаслідок зростання числа n_T зростає q_T і електричний струм ЧР, який змінюється пропорційно $I_{PD} \sim q_T$.

На рис. 6 показано результати розрахунку ЧР для трьох значень частоти прикладеної напруги $f = 1, 20$ і 50 кГц за $U_0 = 25$ кВ, $d = 0,3$ мм, $\tau_e = 1$ мкс.

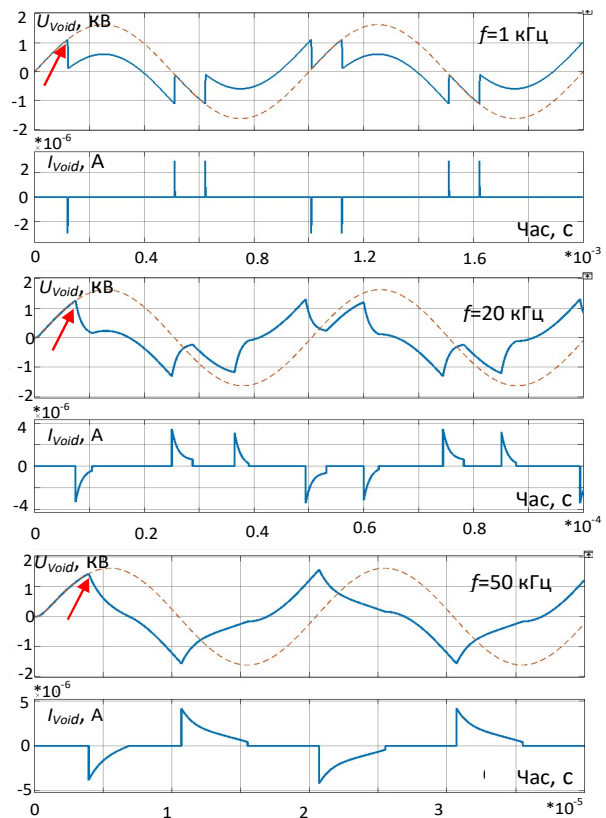


Рис. 6

Слід зазначити, що протікання ЧР у діелектрику характеризується двома власними часовими константами – $\tau_{PD} = C_{Void}R_{Void}$ та τ_e .

За умови, коли $\tau_e, \tau_{PD} \ll T$, значення частоти напруги f слабо впливає на число ЧР за період – n_T та на величину одного ЧР – q_{PD} . За високої частоти, коли значення цих констант наближається до значення періоду T , число ЧР за період зменшується. Це можна з'ясувати із даних рис. 6, значення q_T змінюється слабо, оскільки за високої частоти внаслідок затримки у часі ємність включення заряджається до більшої напруги, що показано на рис. 6 червоними стрілками. Середнє значення струму ЧР, тобто величина $I_{PD} = f q_T$, буде зростати приблизно пропорційно частоті. Отже, у порівнянні зі струмом на частоті 50 Гц можна записати, що

$$I_{PD}(f) \cong I_{PD_50\text{Гц}} \frac{f}{50}. \quad (7)$$

Слід зазначити, що отримані характеристики, що відображаються цим виразом, за результатами вимірювання рівня ЧР на високій частоті (доцільність використання якої розглянуто в роботі [16], а в публікації [17] обґрунтовано концепцію реалізації ВВ височастотних ЕТС резонансного типу і в роботі [18] представлено методику визначення та аналізу робочих характеристик таких ЕТС) можна перераховувати потім для промислової частоти 50 Гц і здійснювати таким чином прогнозування технічного стану сучасної ВВ ізоляції силових кабелів та інших енергооб'єктів, які використовують напругу і струм промислової частоти.

Висновки. В роботі вдосконалено Simulink-модель сучасної ВВ полімерної ізоляції силових кабелів та інших енергооб'єктів, у газових мікровключеннях якої можуть виникати часткові розряди. Враховуються залежність напруги на включенні від його діаметру, значення напруг початку та закінчення розряду, а також тривалість часу, необхідна для формування у включенні вільних електронів як необхідної умови для появи наступного часткового розряду.

Задля кількісної оцінки ЧР наведено основні його характеристики і за результатами проведених комп'ютерних розрахунків визначено вплив діаметру включення, амплітуди та частоти прикладеної синусоїдної напруги на ці характеристики. Показано, що у разі збільшення діаметру включення d зростають число розрядів за період і величина заряду одного ЧР, яка зростає приблизно пропорційно $d^{1,5+2}$. Через збільшення напруги на кабелі зростає число ЧР, що виникають за один період, та інші характеристики ЧР. У разі збільшення частоти прикладеної напруги середнє значення струму ЧР зростає майже пропорційно цій частоті.

Отримані результати щодо впливу частоти прикладеної напруги на характеристики ЧР дають змогу перераховувати результат вимірювання рівня ЧР під час дії напруги високої частоти на результат впливу такої ж напруги промислової частоти 50 Гц і прогнозувати таким чином змінення технічного стану ВВ ізоляції силових кабелів та інших енергооб'єктів, які використовують напругу і струм промислової частоти.

Дослідження виконані за Проектом № 2022.01/0211 "Розробка мобільної системи формування напруги зі змінними параметрами для моніторингу безпеки і надійності високовольтного електрообладнання енергетичних об'єктів критичної інфраструктури України", який фінансується Національним фондом досліджень України.

1. Shahsavarian T., Yue Pan, Zhang Z. Review of Knowledge-Based Defect Identification via PRPD Patterns in High Voltage Apparatus. *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. Pp. 77705–77728. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3082858>.

2. Золотарев В.В., Щербань М.А., Гурин А.Г., Супруновская Н.И., Чопов Е.Ю., Обозный А.Л. Электротехнологический комплекс производства кабельных систем на напряжение до 400 кВ. К.: Про формат, 2017. 594 с.

3. Проектування кабельних ліній напругою до 330 кВ. Настанова (зі змінами). СОУ-Н МЕН 40. 1-37471933-49:2011 К.: ДП "НЕК "Укренерго", 2017. 139 с.

4. Kumar H., Shafiq M., Kauhaniemi K., Elmusrati M. A Review on the Classification of Partial Discharges in Medium-Voltage Cables: Detection, Feature Extraction, Artificial Intelligence-Based Classification, and Optimization Techniques. *Energies*. 2024. Vol. 17(5). 1142. DOI: <https://doi.org/10.3390/en17051142>.

5. Densley J. Ageing mechanisms and diagnostics for power cables – An overview. *IEEE Elect. Insul. Mag.* 2001. Vol. 17. No 1. Pp. 14–22. DOI: <https://doi.org/10.1109/57.901613>.

6. Eigner A., Rethmeier K. An overview on the current status of partial discharge measurements on AC high voltage cable accessories. *IEEE Elect. Insul. Mag.* 2016. Vol. 32. No 2. Pp. 48–55. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEI.2016.7414231>.
7. Shahsavarian T., Shahrtash S.M. Modelling of aged cavities for partial discharge in power cable insulation. *IET Sci., Meas. Technol.* 2015. Vol. 9. No 6. Pp. 661–670. DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-smt.2014.0222>.
8. Eyring H. Dielectric breakdown of solids (Whitehead S.). *J. Chem. Educ.* 1952, 29, 108. DOI: <https://doi.org/10.1021/ed029p108.2>.
9. Xiaohua Zhang, Bo Pang, Yaxin Liu, Shaoyu Liu, Peng Xu, Yan Li, Yifan Liu, Leijie Qi, Qing Xie. Review on Detection and Analysis of Partial Discharge along Power Cables. *Energies*. 2021. Vol. 14(22). 7692. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14227692>.
10. Norasage Pattanadech, Rainer Haller, Stefan Kornhuber, Michael Muhr. Partial Discharges. Detection, Identification and Localization. Wiley, 2023. 339 p. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119568414>.
11. Albarracin R., Rodriguez-Serna J.M., Masud A.A. Finite-element-analysis models for numerical simulation of partial discharges in spherical cavities within solid dielectrics: A review and a novel method. *High Voltage*. 2020. Vol. 5. Issue 5. Pp. 556–568. DOI: <https://doi.org/10.1049/hve.2019.0392>.
12. Niemeyer L. A generalized approach to partial discharge modeling. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 1995. Vol. 2. Issue 4. Pp. 510–528. DOI: <https://doi.org/10.1109/94.407017>.
13. Umar Musa, Abdullahi A. Mati, Abdullahi Abubakar Mas'ud. An improved technique for quantifying PD activity in cross-linked polyethylene (XLPE) power cables. *Measurement*. 2023. Vol. 211. 112633. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.112633>.
14. Illias H., Jian L.T., Ab Haim abu Bakar, Hazlie Mokhlis. Partial Discharge Simulation under Various Applied Voltage Waveforms. IEEE International Conference on Power and Energy (PECon), Kota Kinabalu, Malaysia, 02–05 December 2012. Pp. 967–972. DOI: <https://doi.org/10.1109/PECon.2012.6450358>.
15. Bleaney B.I., Bleaney B. Electricity and Magnetism. Oxford, UK: Clarendon Press, 1965. 778 p.
16. Кучинский Г.С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. Л.: Энергия, 1979. 224 с.
17. Щерба А.А., Вінниченко Д.В., Супруновська Н.І. Наукова концепція розробки високовольтних електротехнічних систем резонансного типу з швидкодіючими керуванням і параметричною стабілізацією режимів навантаження. *Техн. електродинаміка*. 2024. № 2. С. 30–41. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2024.02.030>.
18. Щерба А.А., Подольцев О.Д., Супруновська Н.І., Вінниченко Д.В. Визначення та аналіз робочих характеристик високовольтних електротехнічних систем на основі високодобротного резонансного LC-контуру. *Техн. електродинаміка*. 2024. № 1. С. 3–11. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2024.01.003>.

COMPUTER SIMULATION OF ELECTRICAL PROCESSES WHEN APPEARING PARTIAL DISCHARGES IN MODERN POLYMER INSULATION OF POWER CABLES

A.A. Shcherba, O.D. Podoltsev, M.S. Hutorova

Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,
Beresteiskyi Ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine.

E-mail: anat.shcherba@gmail.com; podoltsev.alexander@gmail.com; ma_gu@ukr.net.

A Simulink model of modern polymer insulation of power cables with a spherical gas micro-inclusion, in which high-frequency partial discharges (PDs) occur, has been developed. The magnitude of the voltage both at the beginning of the PD appearance and during its decay was taken into account during numerical calculations and research of such threshold electro-physical processes as PD in solid polymer insulation. The dependence of the voltage drop on the gas micro-inclusion on its size, as well as the time interval between discharges, which is necessary for the formation of free electrons in this gas micro-inclusion, as a necessary condition for the appearance of the next PD, was also taken into account. Based on the results of the calculations, the electro-physical dependences that occur during the PD, such as the influence of the size of the inclusion, the amplitude and frequency of the applied sinusoidal voltage on the above-mentioned characteristics were investigated. It has been revealed that with an increase in the diameter d of a gas microinclusion, such characteristics as the number of discharges per period and the charge of one PD also increase, and this charge increases in proportion to a power function $d^{1.5 \pm 2}$. When the voltage on the cable insulation increases, the number of PDs per period increases, which causes an increase in other characteristics, and when the frequency of the applied voltage increases, the average value of the PDs current increases almost proportionally to the increase in this frequency. Having obtained the results of the calculation of the level of PDs that occur when high-frequency voltage is applied, it is possible to obtain results for the main characteristics of PDs that occur at other frequencies, in particular at the industrial frequency of 50 Hz, which will make it possible to predict the technical condition of the insulation in terms of the residual resource of its trouble-free operation. References 18, figures 6, table 1.

Key words: power cable, solid electrical insulation, gas micro-inclusions, partial discharges, electro-physical characteristics of partial discharges, Simulink model.

1. Shahsavarian T., Yue Pan, Zhang Z. Review of Knowledge-Based Defect Identification via PRPD Patterns in High Voltage Apparatus. *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. Pp. 77705–77728. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3082858>.
2. Zolotarev V.M., Shcherba M.A., Gurin A.G., Suprunovska N.I., Chopov Ye.Yu., Obozny A.L. Electrotechnological complex for the production of cable systems for voltages up to 400 kV. Kyiv: Pro format, 2017. 594 p. (Rus)
3. Design of cable lines with a voltage of up to 330 kV. Standard (with changes). SOU-N MEV 40. 1-37471933-49:2011. Kyiv: SE NEC Ukrenergo, 2017. 139 p. (Ukr)
4. Kumar H., Shafiq M., Kauhaniemi K., Elmusrati M. A Review on the Classification of Partial Discharges in Medium-Voltage Cables: Detection, Feature Extraction, Artificial Intelligence-Based Classification, and Optimization Techniques. *Energies*. 2024. Vol. 17(5). 1142. DOI: <https://doi.org/10.3390/en17051142>.
5. Densley J. Ageing mechanisms and diagnostics for power cables – An overview. *IEEE Elect. Insul. Mag.* 2001. Vol. 17. No 1. Pp. 14–22. DOI: <https://doi.org/10.1109/57.901613>.
6. Eigner A., Rethmeier K. An overview on the current status of partial discharge measurements on AC high voltage cable accessories. *IEEE Elect. Insul. Mag.* 2016. Vol. 32. No 2. Pp. 48–55. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEI.2016.7414231>.
7. Shahsavarian T., Shahrtash S.M. Modelling of aged cavities for partial discharge in power cable insulation. *IET Sci., Meas. Technol.* 2015. Vol. 9. No 6. Pp. 661–670. DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-smt.2014.0222>.
8. Eyring H. Dielectric breakdown of solids (Whitehead S.). *J. Chem. Educ.* 1952, 29, 108. DOI: <https://doi.org/10.1021/ed029p108.2>.
9. Xiaohua Zhang, Bo Pang, Yaxin Liu, Shaoyu Liu, Peng Xu, Yan Li, Yifan Liu, Leijie Qi, Qing Xie. Review on Detection and Analysis of Partial Discharge along Power Cables. *Energies*. 2021. 14. 7692. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14227692>.
10. Norasage Pattanadach, Rainer Haller, Stefan Kornhuber, Michael Muhr. Partial Discharges. Detection, Identification, and Localization. Wiley, 2023. 339 p. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119568414>.
11. Albarracin R., Rodriguez-Serna J.M., Masud A.A. Finite-element-analysis models for numerical simulation of partial discharges in spherical cavities within solid dielectrics: A review and a novel method. *High Voltage*. 2020. Vol. 5. Issue 5. Pp. 556–568. DOI: <https://doi.org/10.1049/hve.2019.0392>.
12. Niemeyer L. A generalized approach to partial discharge modeling. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 1995. Vol. 2. Issue 4. Pp. 510–528. DOI: <https://doi.org/10.1109/94.407017>.
13. Umar Musa, Abdullahi A. Mati, Abdullahi Abubakar Mas'ud. An improved technique for quantifying PD activity in cross-linked polyethylene (XLPE) power cables. *Measurement*. 2023. Vol. 211. 112633. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.112633>.
14. Illias H., Jian L.T., Ab Haim abu Bakar, Hazlie Mokhlis. Partial Discharge Simulation under Various Applied Voltage Waveforms. IEEE International Conference on Power and Energy (PECon), Kota Kinabalu, Malaysia, 02–05 December 2012. Pp. 967–972. DOI: <https://doi.org/10.1109/PECon.2012.6450358>.
15. Bleaney B.I., Bleaney B. Electricity and Magnetism. Oxford, UK: Clarendon Press, 1965. 778 p.
16. Kuchinskii G.S. Partial discharges in high-voltage structures. Leningrad: Energiya, 1979. 224 p. (Rus)
17. Shcherba A.A., Vinnychenko D.V., Suprunovska N.I. Scientific concept for the creation of high-voltage electrical systems of a resonance type with high-speed control and parametric stabilization of load modes. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2024. No 2. Pp. 30–41. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2024.02.030> (Ukr)
18. Shcherba A.A., Podoltsev O.D., Suprunovska N.I., Vinnychenko D.V. Determining and analysing performance characteristics of high-voltage electrotechnical systems based on a series resonant LC-circuit with a high Q-factor. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2024. No 1. Pp. 3–11. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2024.01.003> (Ukr)

Надійшла 20.05.2024