

ЗАЛЕЖНІСТЬ ЕКВІВАЛЕНТНОЇ ЄМНОСТІ ЕЛЕМЕНТАРНОГО ОБ'ЄМУ ІЗОЛЯЦІЇ ВІД ХАРАКТЕРУ УШКОДЖЕННЯ ТВЕРДОЇ ІЗОЛЯЦІЇ

¹Перетятко Ю.В., к.т.н., доцент, ¹Троценко Є.О., к.т.н., доцент, ²Гайко М.Р., студент

КПІ ім. Ігоря Сікорського, ¹кафедра теоретичної електротехніки факультету електроенергетехніки та автоматики, ²кафедра автоматизації електротехнічних та мехатронних комплексів навчально-наукового інституту енергозбереження та енергоменеджменту

Вступ. Триємнісна модель залишається одним із основних інструментів для аналізу та моделювання часткових розрядів в ізоляції електротехнічного обладнання [1]. Подальший розвиток та удосконалення триємнісної моделі часткового розряду є актуальним завданням для встановлення закономірностей взаємного впливу розміру, розташування та наповнення порожнин або включень в ізоляції на ємність електричної ізоляції, зокрема ізоляції кабельних ліній [2].

Мета роботи. Встановлення закономірностей впливу розмірів, розташування та наповнення включень на еквівалентну ємність ізоляції кабельної лінії шляхом застосування триємнісної моделі дослідження часткових розрядів у твердій ізоляції.

Матеріали і результати досліджень. Класична триємнісна модель, дозволяє виконати аналіз та провести моделювання часткових розрядів у разі розташування одного включення біля струмопровідної жили або біля екрану кабелю (рис. 1).

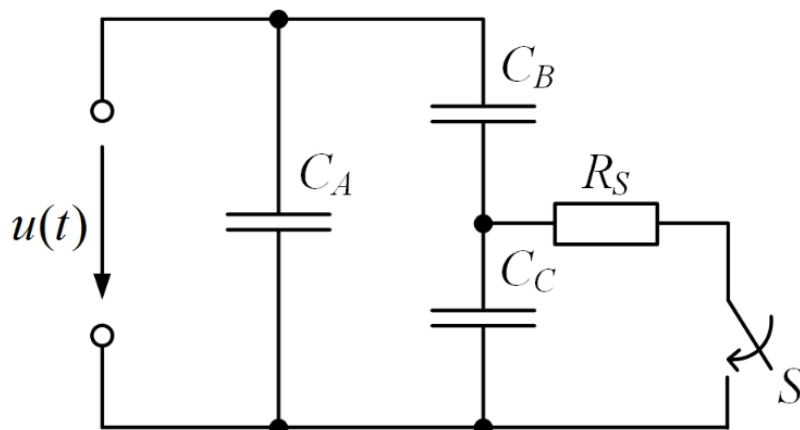


Рисунок 1 – Триємнісна модель часткового розряду в ізоляції

У триємнісній моделі кожен конденсатор (або ємність) представляє певний компонент або характеристику ізоляції електрообладнання.

Ємність C_A представляє ємність ізоляційної системи (рис. 1). Ця ємність характеризує здатність зберігати електричну енергію в об'ємі ізоляції та зазвичай пов'язана з діелектричною проникністю ізоляційного матеріалу. Ця ємність відображає взаємодію між електродами або провідниками та об'ємною ізоляцією.

Ємність C_C це ємність порожнини або включення в ізоляційній системі. На ємність C_C впливають геометрія, розташування і діелектричні властивості дефекту ізоляції або включення. Вона відображає електричну енергію, збережену в локалізованій області порожнини, включаючи процеси накопичення заряду та розряду, які відбуваються в порожнині.

Ємність C_B представляє ємність зв'язку між порожниною (представленою ємністю C_C) та навколишнім ізоляційним матеріалом (представленим ємністю C_A). Ємність C_C враховує зв'язок електричного поля та передачу електричної енергії між порожниною та навколишньою ізоляцією.

Порожнини або включення у товщі кабельної ізоляції можуть локалізуватись випадковим чином, утворювати скупчення, розташовуватись як вздовж ліній поля, так і вздовж нормалі та мати різне наповнення (вода та/або повітря).

Для створення імітаційної моделі часткового розряду в ізоляції, необхідно попередньо провести оцінку ємності кабельної ізоляції. У якості об'єкта дослідження обрано зшиту полімерну ізоляцію типової одножильної кабельної лінії напругою 20 кВ. Для цього ізоляція кабельної лінії розбивається на множину елементарних ділянок, у формі паралелепіпедів, видовжених у напрямку від жили до екрану. Дані дослідження проводились для елементарного об'єму ізоляції у формі паралелепіпеда (рис. 2).

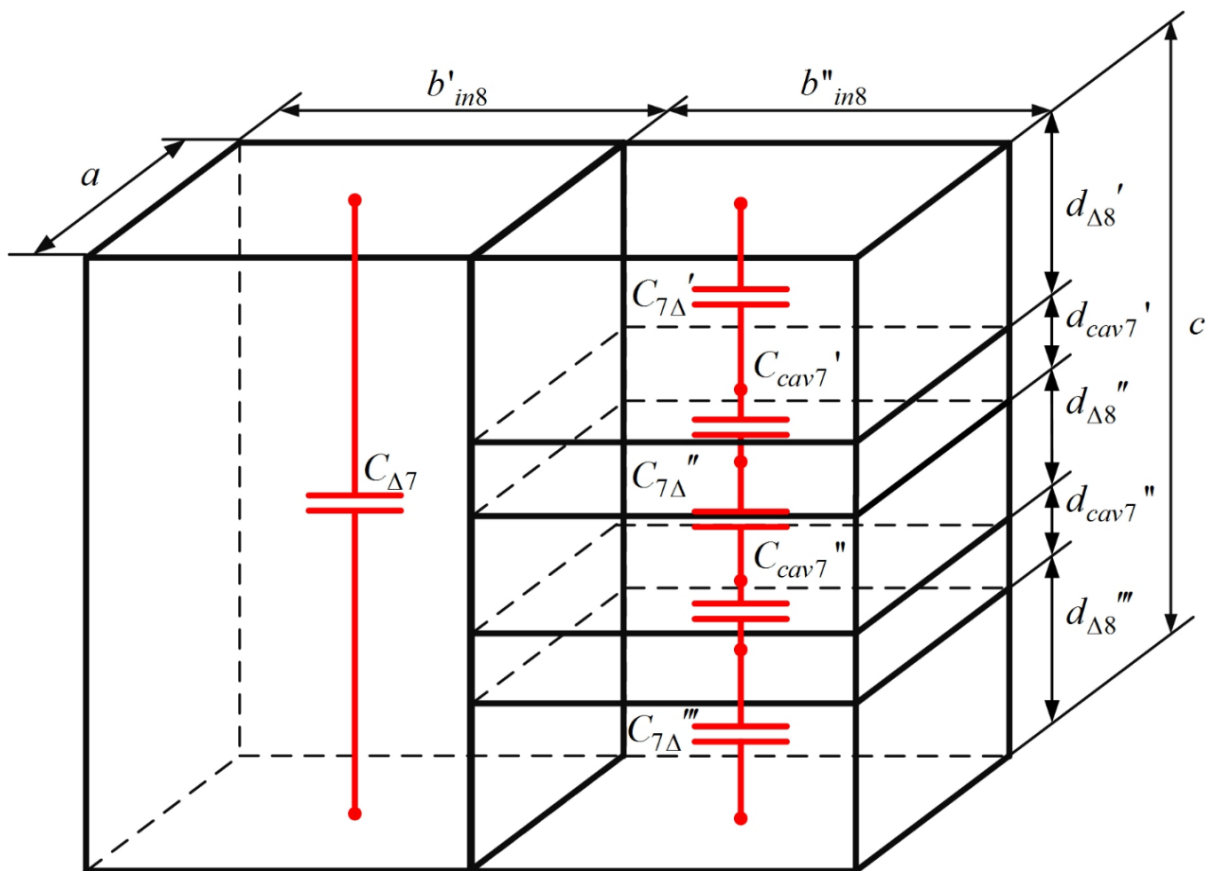


Рисунок 2 – Елементарний об'єм ізоляції з двома порожнинами з частковим розрядом

На рис. 2: $C_{\Delta 7}$ – ємність неушкодженої частини елементарного об'єму ізоляції; C_{cav7}' й C_{cav7}'' – ємності першої та другої порожнини в ізоляції, відповідно; $C_{7\Delta}'$ – ємність зв'язку між границею першої порожнини та верхнім електродом; $C_{7\Delta}''$ – ємність зв'язку між порожнинами в ізоляції; $C_{7\Delta}'''$ – ємність зв'язку між границею другої порожнини та нижнім електродом.

В роботі для побудови моделі елементарного об'єму ізоляції з частковим розрядом було використано паралелепіпед з наступними розмірами:

$$a \times b_{in} \times c, \quad (1)$$

де: $a = 100$ мкм – товщина елемента ізоляції кабелю; $b_{in1} = 2 \cdot a$ мкм – ширина елемента ізоляції кабелю; $c = 5.5$ мм – довжина елемента ізоляції кабелю, що дорівнює типовій товщині кабельної ізоляції для кабелю з номінальною лінійною напругою 20 кВ.

Нижче наведено результати розрахунку для елементарного об'єму кабельної ізоляції з двома внутрішніми ушкодженнями (порожнінами в товщі ізоляції). В роботі прийнято, що перша порожнина в ізоляції заповнена водою, а друга порожнина заповнена повітрям, що відображає типові дефекти в кабелях середньої напруги. Було прийнято, що ширина неушкодженої ділянки ізоляції відноситься до ширини ділянки з дефектами всередині ізоляції, як 1:1:

$$b'_{in8} = \frac{b_{in1}}{2} = 100, \text{ мкм}; \quad b''_{in8} = b'_{in8} = 100, \text{ мкм};$$

$$C_{\Delta 7} = \frac{\varepsilon_{XLPE} \cdot \varepsilon_0 \cdot a \cdot b'_{in8}}{c} = 3,86 \cdot 10^{-17} \text{ Ф};$$

$$d_{cav7}' = 100, \text{ мкм}; \quad d_{cav7}'' = 100, \text{ мкм}; \quad d_{\Delta 8}' = \frac{c - 2 \cdot d_{cav7}}{3} = 2650, \text{ мкм};$$

$$d_{\Delta 8}'' = d_{\Delta 8}' = 2650, \text{ мкм}; \quad d_{\Delta 8}''' = d_{\Delta 8}' = 2650, \text{ мкм};$$

$$C_{cav7}' = \frac{\varepsilon_{wat} \cdot \varepsilon_0 \cdot a \cdot b''_{in6}}{d_{cav7}'} = 7,08 \cdot 10^{-14}, \text{ Ф};$$

$$C_{cav7}'' = \frac{\varepsilon_{air} \cdot \varepsilon_0 \cdot a \cdot b''_{in6}}{d_{cav7}''} = 8,85 \cdot 10^{-16}, \text{ Ф};$$

$$C_{7\Delta}' = \frac{\varepsilon_{xlpe} \cdot \varepsilon_0 \cdot a \cdot b''_{in6}}{d_{\Delta 8}'} = 1,2 \cdot 10^{-16}, \text{ Ф};$$

$$C_{7\Delta}'' = C_{7\Delta}' = 1,2 \cdot 10^{-16}, \text{ Ф}; \quad C_{7\Delta}''' = C_{7\Delta}' = 1,2 \cdot 10^{-16}, \text{ Ф};$$

$$C_{eq7} = \frac{1}{\frac{1}{C_{cav7}'} + \frac{1}{C_{cav7}''} + \frac{1}{C_{7\Delta}'} + \frac{1}{C_{7\Delta}''} + \frac{1}{C_{7\Delta}'''}} = 3,83 \cdot 10^{-17}, \text{ Ф};$$

$$C'_{eq7} = C_{\Delta 7} + C_{eq7} = 7,69 \cdot 10^{-17}, \text{ Ф}.$$

Дані розрахунки були проведені за таких фізичних властивостей середовища (ізоляції та дефектів всередині неї):

$$\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ – електрична стала, } \Phi / \text{м};$$

$$\varepsilon_{xpe} = 2,4 \text{ – діелектрична проникність зшитої полімерної ізоляції};$$

$$\rho_{xpe} = 10^{15} \text{ – питомий опір зшитої полімерної ізоляції, Ом \cdot м};$$

$$\varepsilon_{air} = 1 \text{ – діелектрична проникність повітря};$$

$$\varepsilon_{wat} = 80 \text{ – діелектрична проникність води.}$$

Результати інших розрахунків, проведених в роботі систематизовано в таблиці 1.

Таблиця 1 – Еквівалентна ємність в залежності розміру елементарного об'єму ізоляції та типу дефектів

Умовне позначення еквівалентної ємності	Значення еквівалентної ємності, Ф	Тип дефекту всередині ізоляції	Відношення ширини неушкодженої ділянки до ширини дефектної ділянки ізоляції	
C'_{eq}	$7,72 \cdot 10^{-17}$	Ізоляція без внутрішніх дефектів або ушкоджень	–	
C'_{eq1}	$7,63 \cdot 10^{-17}$	Ізоляція з порожниною, заповненою повітрям	1:1 (100)	Зменшилась на 1,16%
C'_{eq2}	$7,68 \cdot 10^{-17}$	Ізоляція з порожниною, заповненою повітрям	3:1 (50)	Зменшилась на 0,52%
C'_{eq3}	$7,79 \cdot 10^{-17}$	Ізоляція з порожниною, заповненою водою	1:1 (100)	Збільшилась на 0,9%
C'_{eq4}	$7,76 \cdot 10^{-17}$	Ізоляція з порожниною, заповненою водою	3:1 (50)	Збільшилась на 0,52%
C'_{eq5}	$7,86 \cdot 10^{-17}$	Ізоляція з двома порожнинами, заповненими водою	1:1 (100)	Збільшилась на 1,8%
C'_{eq6}	$7,54 \cdot 10^{-17}$	Ізоляція з двома порожнинами, заповненими повітрям	1:1 (100)	Зменшилась на 2,3%
C'_{eq7}	$7,69 \cdot 10^{-17}$	Ізоляція з двома порожнинами, одна з яких заповнена водою, а інша заповнена повітрям	1:1 (100)	Зменшилась на 0,4%

У випадку елемента ізоляції з двома дефектами було прийнято, що порожнини в ізоляції розташовані вертикально одна до одної, аналогічно до моделі на рис. 2.

Висновки. Аналіз отриманих результатів показав, що ізоляція з двома порожнинами, заповненими повітрям, має найменшу еквівалентну ємність серед усіх розглянутих випадків, дорівнюючи $7,54 \times 10^{-17}$ Ф. У випадку заповнення однієї з порожнин водою замість повітря, призводить до збільшення еквівалентної ємності ділянки кабелю на 1,99%. В свою чергу, заповнення водою обох порожнин всередині ізоляції, призводить до збільшення еквівалентної ємності елемента ізоляції на 4,24%. Якщо розглядати ізоляцію лише з одним ушкодженням, то найменшу еквівалентну ємність матиме елемент кабельної ізоляції з порожниною, заповненою газом (повітрям), що дорівнює $7,63 \times 10^{-17}$ Ф, що менше від еквівалентної ємності цілої ізоляції на 1,17%. У випадку заповнення єдиної порожнини в ізоляції водою, еквівалентна ємність сягає значення $7,79 \times 10^{-17}$ Ф, що на 0,9% перевищує еквівалентну ємність суцільної неушкодженої ізоляції. Збільшення відношення ширини неушкодженої ділянки ізоляції до ширини дефектної ділянки ізоляції з 1:1 до 3:1 не має суттєвого впливу на значення еквівалентної ємності ізоляції. Зокрема, у випадку порожнини, заповненої повітрям еквівалентна ємність зменшується на 0,52%, а у випадку порожнини, заповненої водою, еквівалентна ємність зростає на 0,52% порівняно з суцільною ізоляцією.

Перелік посилань

1. H. A. Ilias, G. Chen and P. L. Lewin, "Comparison between three-capacitance, analytical-based and finite element analysis partial discharge models in condition monitoring," IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, vol. 24, no. 1, pp. 99-109, doi: 10.1109/TDEI.2016.005971.

2. U. K. Kalla, N. Adhikari and A. Rustagi, "Modeling and investigation of insulation defects by partial discharge in HV XLPE cable," 2018 8th IEEE India International Conference on Power Electronics (IICPE), pp. 1-6, 2018.