УДК 621.316 DOI: https://doi.org/10.15407/techned2024.06.077

ВИЗНАЧЕННЯ ВЕЛИЧИНИ ЄМНОСТІ СИСТЕМИ ПРОВІД-ІЗОЛЯТОР-ШТИР В ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЯХ НАПРУГОЮ 6-10 кВ ДЛЯ ОЦІНКИ МОЖЛИВОСТІ РАННЬОЇ ДІАГНОСТИКИ СТАНУ ІЗОЛЯЦІЇ

Р.О. Буйний[*], канд. техн. наук, **В.М. Безручко**[**], канд. техн. наук, **А.Ю. Строгій**[***]
Національний університет «Чернігівська політехніка»,
вул. Шевченка, 95, Чернігів, 14035, Україна.
E-mail: buinyiroman@gmail.com.

Проаналізовано негативний вплив однофазних замикань на землю в мережах з ізольованою нейтраллю, що виникають через пробій штирової ізоляції повітряних ліній 6-10 кВ. Запропоновано концепцію раннього виявлення пошкоджень штирових ізоляторів, що базується на вимірюванні зміни струму витоку через ізолятори, викликаного зміною ємності системи «провід-ізолятор-штир». Для цього в проведено імітаційне моделювання системи. У програмному пакеті AutoCAD створено геометричну модель ізолятора марки ШФ-20Г з урахуванням конструктивних особливостей кріплення проводу. Вона дала можливість оцінити електричну ємність системи «провід-ізолятор-штир» у програмному пакеті Comsol Multiphysics 5.6 на базі розподілу електричного поля. Проаналізовано залежність отриманої електричної ємності ізоляторів марки ШФ-20Г від діелектричної проникності матеріалу ізолятора, діаметрів і марок проводів, що використовуються на лініях 6-10 кВ, та варіантів в'язки проводу. Отримано чисельні значення ємності системи «провід-ізолятор-штир» для різних варіантів конфігурацій. Показано, що стан матеріалу ізолятора має вирішальний вплив на ємність системи. Бібл. 11, рис. 2, табл. 2.
***Ключові слова*:** замикання на землю, ізолятор, ємність, повітряна лінія, ізольована нейтраль.

Вступ. В Україні електричні мережі напругою 6-10 кВ працюють в режимі ізольованої нейтралі, що дає змогу здійснювати достатньо надійне електропостачання споживачів навіть під час однофазних замикань на землю (ОЗЗ) в електричній мережі. Найбільшу протяжність мають повітряні лінії (ПЛ) електропередавання, через пошкодження яких відбувається значна кількість ОЗЗ, в основному через дефекти штирової ізоляції та її забруднення. Менша кількість пошкоджень припадає на обриви проводу та обриви в'язки проводу до ізолятора. В даний час пошкодження на таких ПЛ виявляються шляхом аналізу електромагнітного поля вздовж траси повітряної лінії. Для цього оперативно-виїздна бригада операторів систем розподілу витрачає дуже багато часу [1], особливо на пошук пошкоджень штирової ізоляції, які не піддаються «візуальній» діагностиці.

У роботах [2, 3] авторами було запропоновано систему ідентифікації місця виникнення ОЗЗ, яка дає можливість відстежити ОЗЗ з точністю до опори та, як наслідок, підвищити надійність електропостачання споживачів. Проте така система дає змогу виявляти пошкодження на стадії, коли ОЗЗ вже виникло, і мережа перейшла в ненормальний режим роботи, за якого дві непошкоджені фази можуть знаходитися під лінійною напругою. Такий ненормальний режим може призвести до утворення замикання на іншій фазі та переходу ОЗЗ у міжфазне коротке замикання із подальшим відключенням як мінімум одного фідера. Підвищенню надійності саме таких електричних мереж присвячено багато робіт, зокрема [4–6], які направлено на боротьбу із наслідками, а не із їхньою причиною.

Тому було б доцільно розробити підходи щодо виявлення не самих ОЗЗ, а дефектів, які до них призводять, на ранніх стадіях розвитку [7]. Такі підходи повинні мати математичне обґрунтування можливості їхньої реалізації та експериментальне підтвердження результатів.

Для обґрунтування можливості виявлення дефектів штирової ізоляції ПЛ 6-10 кВ на ранніх стадіях необхідно створити модель самого штирового ізолятора, яка дасть змогу виконати математичне моделювання процесів розвитку дефектів із подальшим утворенням ОЗЗ.

© Буйний Р.О., Безручко В.М., Строгій А.Ю., 2024
ORCID ID:* https://orcid.org/0000-0002-5432-2924; ** https://orcid.org/0000-0002-3705-8543;
*** https://orcid.org/0000-0002-4481-8803
© Видавець Інститут електродинаміки НАН України, 2024
Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0
https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk

Метою роботи є дослідження впливу конструктивних параметрів штирової ізоляції повітряних ліній напругою 6-10 кВ в мережах з ізольованою нейтраллю на ємність системи «провід-ізолятор-штир» для подальшого виявлення дефектів на ранніх стадіях їхнього розвитку.

Основні матеріали дослідження. Зазвичай під час дослідження властивостей ізоляції використовують універсальну схему заміщення (математичну модель), яка враховує наступні фізичні складові ізоляції: геометричну та абсорбційну ємності, абсорбційний та омічний опори струму [8]. Проте така схема не дає можливості розрахувати (виявити) появу пошкоджень в ізоляції на ранніх стадіях. Пошук моделей штирової ізоляції на теренах інтернету не призвів до позитивного результату, але було знайдено моделі для розрахунку гірлянд підвісних ізоляторів [9, 10]. Також одним із факторів, підбурюючих до самостійного створення моделі штирового ізолятора, є відсутність у довідникових джерелах та у виробників даного типу ізоляторів інформації щодо величини будь-якої із компонентів електричної ємності.

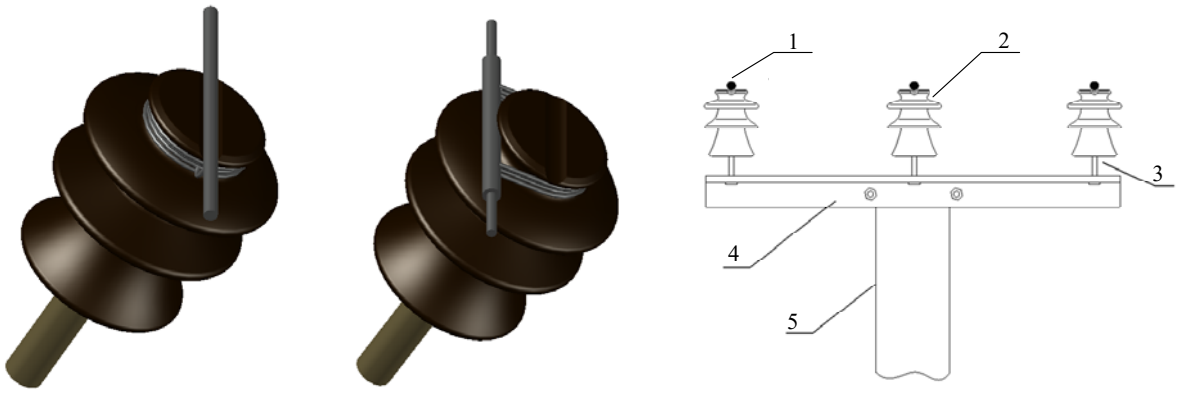
Задача створення математичної моделі ізолятора є складною і потребує нетривіальних рішень. В даний час для вирішення подібних задач може використовуватися імітаційне моделювання методом скінченних елементів, наприклад, із використанням програмного пакету Comsol Multiphysics 5.6, що дає змогу розраховувати фізичні процеси в складних просторових конфігураціях [11].

Для цього у програмному пакеті AutoCAD створено імітаційну 3D-модель (просторову) штирового ізолятора типу ШФ-20Г з урахуванням його паспортних геометричних розмірів та матеріалу.

В Україні в електричних мережах 6-10 кВ використовується два варіанта кріплення проводу до штирового ізолятора (марки ШФ-20Г): 1) «в'язка на головку»; 2) «в'язка на шийку» ізолятора. У випадку «в'язки на шийку» ізолятора виконують додаткову підмотку на фазні проводи підмотувальним дротом діаметром 2,8-3,8 мм. Загальна довжина підмотки з в'язкою не повинна перевищувати двох діаметрів шийки ізолятора. Згідно паспортних даних діаметр шийки ізолятора марки ШФ-20Г становить 80 мм, що вказує на те, що загальна довжина підмотки не може бути більше ніж 160 мм.

Для аналізу розподілу електричного поля у системі «провід-ізолятор-штир» за зазначених вище особливостях у програмному пакеті AutoCAD створено імітаційну 3D-модель такої системи. Модель враховує різні марки проводів на ПЛ 6-10 кВ, що зустрічаються в експлуатації (АС-35/6,2; АС-50/8, АС-70/11), можливі в'язки проводу («на головку», «на шийку») та можливі діаметри підмотувального в'язального дроту (2,8 мм та 3,8 мм). В імітаційній моделі системи прийняте обмеження: довжина проводу і довжина штиря дорівнюють 250 мм.

Просторову конфігурацію ізолятора ШФ-20Г з різними видами в'язки зображено на рис. 1, *а*, *б*, а штирові ізолятори розміщуються на металевій траверсі (рис. 1, *в*), де *1* – провід, *2* – штировий ізолятор, *3* – штир, *4* – траверса, *5* – стійка опори.

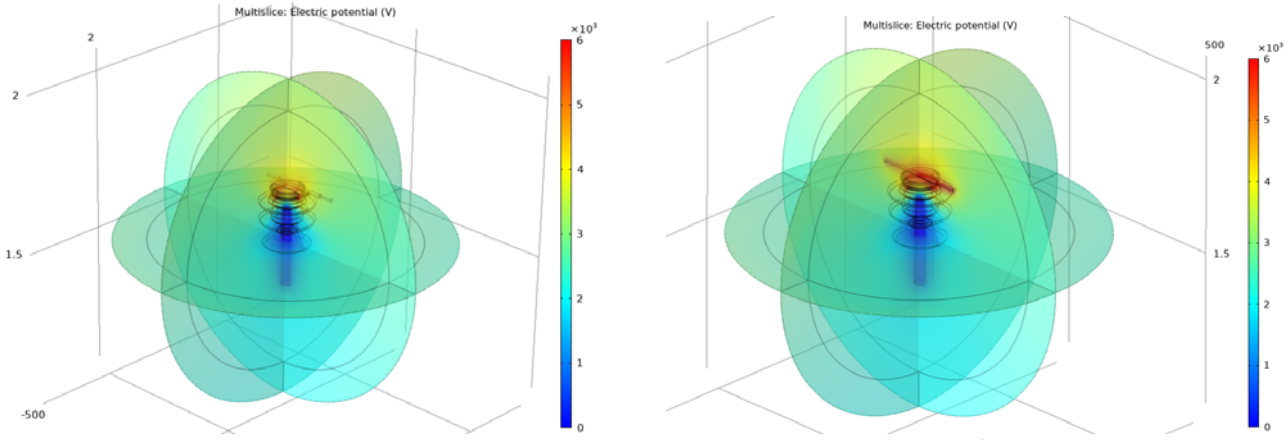


а ***б*** ***в***

Рис. 1

Для чисельних розрахунків геометричної ємності системи «провід-ізолятор-штир» в Comsol Multiphysics 5.6 завантажено вищеописану імітаційну 3D-модель такої системи (рис. 2).

На рис. 2 показано розподіл потенціалу електричного поля навколо та всередині системи «провід-ізолятор-штир» для варіантів в'язки проводу «на головку» та «на шийку» з проводом марки АС-70/11 за діаметра підмотувального дроту 2.8 мм та діелектричної проникності фарфору – 5. Використовуючи отримані дані у пакеті Comsol Multiphysics 5.6, розраховано чисельне значення геометричної електричної ємності системи «провід-ізолятор-штир» для усіх можливих конфігурацій.



а *б*

Рис. 2

Через відсутність даних від виробника ізоляції про діелектричну проникність фарфору під час розрахунків аналізувався фарфор в діапазоні діелектричних проникностей від 5 до 7 [8].

Отримані у програмному пакеті Comsol Multiphysics 5.6 значення геометричної електричної ємності для визначених вище конфігурацій системи «провід-ізолятор-штир» для варіантів в'язки проводу «на головку» та «на шийку» зведені до табл. 1 та табл. 2 відповідно.

Таблиця 1

Діелектрична проникність ε_0	**Електрична ємність системи "провід-ізолятор-штир", пФ варіант в'язки проводу «на головку»**					
	АС-35/6,2		**АС-50/8**		**АС-70/11**	
	з підмотувальним дротом діаметром $\Delta_п$, мм					
	2,8	**3,8**	**2,8**	**3,8**	**2,8**	**3,8**
5	8,0122	8,1475	8,0574	8,1850	8,1175	8,2385
7	9,8857	10,028	9,9302	10,068	9,9940	10,125

Таблиця 2

Діелектрична проникність ε_0	**Електрична ємність системи "провід-ізолятор-штир", пФ варіант в'язки проводу «на шийку»**					
	АС-35/6,2		**АС-50/8**		**АС-70/11**	
	з підмотувальним дротом діаметром $\Delta_п$, мм					
	2,8	**3,8**	**2,8**	**3,8**	**2,8**	**3,8**
5	7,9438	8,1812	8,0236	8,2578	8,1420	8,3741
7	9,6020	9,8917	9,6977	9,9860	9,8427	10,135

З табл. 1–2 видно, що зі збільшенням діаметра підмотувального дроту з 2,8 мм до 3,8 мм ємність системи «провід-ізолятор-штир» у варіанті в'язки «на головку» буде в середньому збільшуватися на 1,48%, а у варіанті в'язки «на шийку» – на 2,95%. Це вказує на те, що діаметр підмотувального дроту майже не впливає на ємність системи «провід-ізолятор-штир». Зі збільшенням діелектричної проникності матеріалу ізоляції з 5 до 7 ємність системи «провід-ізолятор-штир» буде збільшуватися на 23,1% для варіанті в'язки «на головку» та на 20,9% для варіанту в'язки «на шийку».

У випадку появи дефектів в середині ізолятора або на його поверхні, а також у випадку його забруднення та зволоження просторова діелектрична проникність ізоляції буде змінюватися, що дає змогу припустити, що ємність системи «провід-ізолятор-штир» буде змінюватися в достатньо широкому діапазоні. Величина ємності викликає зміну струмів витоку через ізоляцію ПЛ, за величиною яких можна виявляти дефекти на ранніх стадіях. Дану зміну можна використати для створення системи раннього виявлення дефектів штирової ізоляції. Це дасть можливість уникнути появи більшості

ОЗЗ в мережах з ізольованою нейтраллю та уникнути переходу більшості ОЗЗ у міжфазні короткі замикання та, як наслідок, підвищити надійність електропостачання споживачів.

Експериментальне підтвердження потребує великої кількості статистичної інформації. На даний час виконано тільки частину експериментальних досліджень струмів витоку через ізолятори марки ШФ-20Г, які мають різного роду дефекти та забруднення. Такі дослідження вказують на те, що ємність системи «провід-ізолятор-штир» з пошкодженням та забрудненням збільшується у 3-6 разів, а струм витоку через ізоляцію – від 5 до 12 разів, що обумовлено, зокрема, і зміною поверхневої активної провідності.

DETERMINATION OF THE CAPACITANCE VALUE OF THE CONDUCTOR-INSULATOR-PIN SYSTEM IN 6-10 kV OVERHEAD POWER LINES TO ASSESS THE FEASIBILITY OF EARLY DIAGNOSTICS OF THE INSULATION CONDITION

R.O. Buinyi, V.M. Bezruchko, A.Yu. Strogii
Chernihiv Politechnic National University,
str. Shevchenka, 95, Chernihiv, 14035, Ukraine.
E-mail: buinyiroman@gmail.com.

The negative influence of single-phase-to-ground faults in networks with an isolated neutral, resulting from a breakdown of pin insulation, is analyzed. A concept for early detection of damage to pin insulators is proposed, based on measuring changes in leakage current through the insulators caused by changes in the capacitance of the "pin-insulator-wire" system. For this purpose, a simulation of the system was done. A model of the geometric dimensions of the insulator is created with taking into account the design features of the installation of the line wire in the AutoCAD software package and the distribution of the electric field is simulated in the Comsol Multiphysics 5.6 package, which makes it possible to estimate the electrical capacitance. The dependence of the calculated electrical capacitance of ShF-20G insulators on the dielectric constant, diameters and grades of wires used on 6-10 kV overhead power lines and options for wire bundles is considered. Numerical values of the capacitance of the "pin-insulator-wire" system were obtained for different configuration options. It has been shown that the state of the insulator material has a decisive influence on the capacity of the system. References 11, figures 2, tables 2.
Key words: earth fault, insulator, capacity, overhead line, isolated neutral.

1. Xun J., Yue Zh., Wenlong M., Jianzhong W. Feasible operation region of an electricity distribution network. *Applied Energy*. 2023. Vol. 331:120419. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120419.

2. Bezruchko V., Buinyi R., Strogii A., Tkach V. Using GSM technologies to identify locations of single-phase ground faults in power networks with an isolated neutral with pin-type insulation. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2018. No 5. Pp. 96-99. DOI: https://doi.org/10.15407/techned2018.05.096. (Ukr)

3. Bezruchko V., Buinyi R., Strogii A., Tkach V. Integration of New Single-Phase-to-Ground Faults Detection Devices into Existing SmartGrid Systems. IEEE 6th International Conference on *Energy Smart Systems*, Kyiv, Ukraine, 17-19 April 2019. Pp. 84-87. DOI: https://doi.org/10.1109/ESS.2019.8764237.

4. Bezruchko V., Buinyi R., Dikhtyaruk I., Sereda A. The calculation of the Sectionalizer location in Medium Voltage Distribution Systems to reduction the Expected Energy Not-Supplied to consumer. IEEE 4th KhPI Week on *Advanced Technology*, Kharkiv, Ukraine, 02-206 October 2-23. Pp. 1-4. DOI: https://doi.org/10.1109/KhPIWeek61412.2023.10312921.

5. Li Z., Wu W., Tai X., Zhang B. Optimization Model-Based Reliability Assessment for Distribution Networks Considering Detailed Placement of Circuit Breakers and Switches. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2020. No 35(5). Pp. 3991-4004. DOI: https://doi.org/10.1109/TPWRS.2020.2981508.

6. Gay O.V., Tugai Yu. I. The optimal points of sectionalization in distributive networks. *Pratsi instytutu elektrodynamiky NAN Ukrainy*. 2011. Vyp. 28. Pp. 10-14. https://previous.ied.org.ua/ua/publishing/206. (Ukr)

7. Voufo J., Kenfack J., Tatietse T. Diagnosis of defects on medium voltage electric energy distribution networks: The case of rural zone's supply. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2013. No 45(1). Pp. 229-234. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2012.08.059.

8. Arora R. High voltage and electrical insulation engineering. Second edition. New Jersey: *Wiley-IEEE press*, 2022. 488 p. DOI: https://doi.org/10.1002/9781119568964.

9. Benguesmia H., M'ziou N., Boubakeur A. Simulation of the potential and electric field distribution on high voltage insulator using the finite element method. *Diagnostyka*. 2018. No 19(2). Pp. 41-52. DOI: https://doi.org/10.29354/diag/86414.

10. El-Kishky H., Gorur R. Electric potential and field computation along AC HV insulators. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 1994. No 1(6). Pp. 982–990. DOI: https://doi.org/10.1109/94.368665.

11. Kucheriava I.M. Electric field enhancement in polyethylene cable insulation with defects. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2018. No 2. Pp.11-16. DOI: https://doi.org/10.15407/techned2018.02.011.

Надійшла 06.06.2024
Остаточний варіант 05.08.2024