## DOI: 10.20998/EREE.2025.1(10).334173

### УДК 621.315.2

КОСТЮКОВ ІВАН ОЛЕКСАНДРОВИЧ 🖾 – доктор технічних наук, завідувач кафедри теоретичних основ електротехніки, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8923-0579; e-mail: iakostiukow@gmail.com.

КУЛИК ОЛЕКСИЙ СЕРГИЙОВИЧ – доктор філософії (PhD), старший викладач кафедри передачі електричної енергії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2545-6314; e-mail: oleksii.kulyk@khpi.edu.ua.

ЛИТВИНЕНКО СВІТЛАНА АНАТОЛІЇВНА – доктор філософії (PhD), доцент кафедри теоретичних основ електротехніки, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0818-2470; e-mail: lytvynenko.svitlana@khpi.edu.ua.

КУБРИК БОРИС ІВАНОВИЧ - кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теоретичних основ електротехніки, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8327-0350; e-mail: borys.kubryk@khpi.edu.ua.

ЛАВРІНЕНКО ОЛЬГА ВАЛЕРІЇВНА – кандидат історичних наук, доцент кафедри теоретичних основ електротехніки, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5274-3955; e-mail: Lavrinenko.Olga@khpi.edu.ua.

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ СХЕМИ ЗАМІЩЕННЯ ТРИЖИЛЬНОГО СИЛОВОГО КАБЕЛЮ З ПАПЕРОВОЮ ІМПРЕГНОВАНОЮ ІЗОЛЯЦІЄЮ ДЛЯ ВИПАДКУ РЕЗИСТИВНОГО ЗАЗЕМЛЕННЯ ОЛНІЄЇ ІЗ ЖИЛ

Стаття присвячена експериментальному обгрунтуванню схеми заміщення трижильного силового кабелю з паперовою імпрегнованою ізоляцією в спільній металевій оболонці у випадку резистивного заземлення однієї із жил кабелю, що використовуються при застосуванні одного з метолів вимірювання інливідуальних значень електричної ємності та тангенса кута ліелектричних втрат шарів ізоляції між жилами силового кабелю. Проведене експериментальне обгрунтування було засноване на порівнянні результатів розрахунку сукупних значень електричної ємності для розглянутої схеми заміщення із результатами вимірювання, отриманими із застосуванням вимірювача імітансу з 2 клемами на двох різних частотах прикладеної тестової напруги. При розрахунку сукупних значень ємності для схеми із резистивним заземленням однієї із жил використовувались значення часткових ємностей, попередньо отримані із застосуванням відомих методик обстеження трижильних силових кабелів, що засновані на застосуванні сукупних вимірювань. Порівняння результатів розрахунку сукупних значень електричної ємності для схем заміщення ізоляції кабелю із резистивним заземленням однієї із жил з результатами вимірювань засвідчило можливість застосування розглянутої в статті схеми заміщення. Отримані результати можуть бути використані при контролі технічного стану ізоляції трижильних силових кабелів за параметрами тангенса кута діелектричних втрат та електричної ємності. Застосування розглянутого в статті методу контролю не вимагає врахування впливу додаткової складової паразитної індуктивності у схемі вимірювання на результати визначення параметрів діелектрика та є альтернативою відомим методам контролю, що засновані на застосуванні прямих та сукупних вимірювань.

Ключові слова: діагностика ізоляції; прямі вимірювання; сукупні вимірювання; часткові ємності; система лінійних алгебраїчних рівнянь.

Вступ. В багатьох практичних випадках контроль стану ізоляції електротехнічного технічного обладнання проводиться за параметрами електричної ємності та тангенса кута діелектричних втрат (tgб) [1-7]. Так, для зшитої поліетиленової ізоляції силових кабелів результати вимірювань tgб в діапазоні частот від 10<sup>-2</sup> до 10 Гц демонструють кореляцію із рівнем пробивної напруги [8], для паперової імпрегнованої ізоляції встановлена кореляція між tgб та механічною характеристикою ізоляції – числом подвійних перегинів до розриву [9]. При контролі ізоляції трижильних силових кабелів в спільній металевій оболонці виникає задача визначення індивідуальних значень електричної ємності та tgб для кожного з шарів ізоляції між струмопровідними жилами а також між жилами та оболонкою кабелю. При цьому використані методи та засоби вимірювання повинні забезпечувати можливість усунення взаємного впливу сусідніх шарів

ізоляції на результати вимірювання їх діелектричних характеристик. При застосуванні прямих вимірювань застосовуються вимірювачі імітансу, що дозволяють забезпечити тризажимне підключення досліджуваного об'єкта контролю. В такому випадку виникає необхідність врахування можливого впливу резонансних явищ в об'єкті контролю, що зумовлені складовою індуктивності додатковою У схемі вимірювання, на результати контролю параметрів діелектрика. Застосування сукупних вимірювань дозволяє уникнути такого недоліку, та може бути проведене із застосуванням вимірювачів імітансу, що дозволяють забезпечити двозажимне підключення силового кабелю. В той же час, такі вимірювання характеризуються підвищеними витратами часу та можливим впливом похибок вимірювання сукупних значень електричної ємності на результати розрахунку часткових ємностей силового кабелю. Таким чином, © І. О. Костюков, О. С. Кулик, С. А. Литвиненко, Б. І. Кубрик, О. В. Лавріненко, 2025

СССУ ВУ NC Ця робота ліцензується відповідно до *Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (СС ВУ-NC 4.0)* Конфлікт інтересів: Автори заявили про відсутність конфлікту

при контролі ізоляції трижильних силових кабелів актуальною є задача розробки вдосконалених методів вимірювання індивідуальних значень часткових ємностей та tgб. Один з альтернативних методів передбачає застосування модифікованої схеми з'єднання металевих елементів конструкції кабелю, що полягає у резистивно-ємнісному заземленні однієї із жил кабелю, заземленні другої жили та прикладанні випробувальної напруги до шару ізоляції між третьою жилою та заземленою оболонкою кабелю [10]. Процес вимірювання полягає в регулюванні величини заземлюючого резистора до моменту нульового фазового зсуву між напругами на досліджуваному шарі ізоляції та на заземлюючому резисторі. Після вимірювання цих напруг повторне регулювання опору резистора, виконане за іншої величини підключеної паралельно до резистору допоміжної ємності, дає можливість сформувати систему рівнянь, вирішення якої дозволяє розрахувати невідому часткову ємність та tgб досліджуваного шару ізоляції. В той же час, модифікованої схеми застосування з'єднання металевих елементів конструкції кабелю вимагає експериментального обґрунтування відповідної схеми замішення.

Мета статті полягає в експериментальному обґрунтуванні схеми заміщення трижильного силового кабелю з паперовою імпрегнованою ізоляцією у випадку резистивного з'єднання однієї з жил з заземленою оболонкою кабелю.

Методика експериментального обґрунтування схеми заміщення. На рис. 1 наведено модифіковану схему з'єднання металевих елементів конструкції кабелю, що використовується при застосуванні описаного методу контролю [10].



Рисунок 1 – Схема заміщення трижильного силового кабелю у спільній металевій оболонці у випадку резистивного заземлення жили С:

С<sub>АВ</sub>, С<sub>СВ</sub>, С<sub>АС</sub> – часткові ємності, що утворені за рахунок ємнісних зв'язків між жилами силового кабелю, С<sub>АG</sub>, С<sub>СG</sub> – часткові ємності, що утворені за рахунок ємнісного зв'язку між жилами та оболонкою кабелю, R<sub>AB</sub>, R<sub>CB</sub>, R<sub>AC</sub>, R<sub>AB</sub>, R<sub>CB</sub> – шунтуючі опори, величина яких визначається діелектричними втратами у відповідних шарах ізоляції, R<sub>S</sub> – заземлюючий резистор Наведена на рис. 1 схема застосовується для вимірювання часткової ємності між жилами A та C, при цьому вимірювання параметрів ізоляції між жилами A, B та B, C проводиться шляхом застосування аналогічних схем з'єднання металевих елементів конструкції. Експериментальна верифікація схеми заміщення на рис. 1 була проведена на основі попередньо визначених із застосуванням сукупних вимірювань часткових ємностей  $C_{AB}$ ,  $C_{CB}$ ,  $C_{AC}$ ,  $C_{AG}$ ,  $C_{BG}$ ,  $C_{CG}$ . Визначення часткових ємностей із застосуванням сукупних вимірювань проводилось шляхом вирішення системи рівнянь [11]:

$$\mathbf{Ac} = \mathbf{b}; \tag{1}$$

де **b** =  $[C_A, C_B, C_C, C_{A_B}, C_{B_C}, C_{A_C}]^{T}$  – вектор результатів вимірювань сукупних значень електричної ємності. При формуванні вектору **b** складові  $C_A, C_B, C_C$ були виміряні шляхом подачі тестової напруги, відповідно, між жилами A, B, C та двома іншими, з'єднаними з оболонками жилами, складові  $C_{A_B}, C_{B_C}, C_{A_C}$ , відповідно, вимірювались при подачі тестової напруги між з'єднаними між собою жилами A та B, B, та C а також A, C та з'єднаною з оболонкою третьою жилою кабелю;

 $\mathbf{c} = [C_{AB}, C_{BC}, C_{AC}, C_{AG}, C_{BG}, C_{CG}]^{\mathrm{T}}$  – вектор, що містить невідомі часткові ємності силового кабелю;

А – матриця, рядки та стовпчики якої визначаються у відповідності до виразу:

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$
(2)

На рис. 2–5 наведено результати повторних вимірювань сукупних значень електричної ємності  $C_A$ ,  $C_B$ ,  $C_C$ ,  $C_{A\_B}$ ,  $C_{B\_C}$ ,  $C_{A\_C}$ , що використовувались при вирішенні системи рівнянь (1).

В таблицях 1 і 2 наведено розраховані для серії з 47 повторних вимірювань середні арифметичні результатів вимірювання сукупних значень електричної ємності, а також визначені шляхом вирішення системи рівнянь (1) часткові ємності між металевими елементами конструкції кабелю.



Рисунок 2 – Результати повторних вимірювань сукупних значень електричної ємності кабелю ААШв при використанні схеми з'єднання металевих елементів «жила проти двох інших жил та оболонки» за частоти 1 кГц



Рисунок 3 – Результати повторних вимірювань сукупних значень електричної ємності кабелю ААШв при використанні схеми з'єднання металевих елементів «дві жили проти жили та оболонки» за частоти 1 кГц



Рисунок 4 – Результати повторних вимірювань сукупних значень електричної ємності кабелю ААШв при використанні схеми з'єднання металевих елементів «жила проти двох інших жил та оболонки» за частоти 10 кГц



Рисунок 5 – Результати повторних вимірювань сукупних значень електричної ємності кабелю ААШв при використанні схеми з'єднання металевих елементів «дві жили проти жили та оболонки» за частоти 10 кГц

| Схема<br>з'єднання<br>металевих<br>елементів | Ємність,<br>пФ | Шар<br>ізоляції | Ємність,<br>пФ |
|--|----------------|-----------------|----------------|
| $C_A$  | 560.8          | AB              | 106.18         |
| $C_B$  | 562.8          | BC              | 112            |
| $C_C$  | 542.7          | AC              | 101.3          |
| $C_{A\_B}$                                   | 911.3          | AG              | 353            |
| $C_{B_C}$                                    | 881.4          | $\overline{BG}$ | 344.6          |
| $C_{A\_C}$                                   | 900.9          | CG              | 329.3          |

Таблиця 1 – Сукупні та часткові ємності досліджуваного зразка силового кабелю за частоти 1 кГц

Таблиця 2 – Сукупні та часткові ємності досліджуваного зразка силового кабелю за частоти 10 кГц

| Схема<br>з'єднання<br>металевих<br>елементів | Ємність,<br>пФ | Шар<br>ізоляції | Ємність,<br>пФ |
|--|----------------|-----------------|----------------|
| $C_A$  | 546.4          | AB              | 103.7          |
| $C_B$  | 550            | BC              | 109.5          |
| Cc   | 530            | AC              | 98.6           |
| $C_{A\_B}$                                   | 889            | AG              | 344            |
| $C_{B\_C}$                                   | 861            | BG              | 337            |
| $C_{A\_C}$                                   | 879            | CG              | 322            |

Обґрунтування наведеної на рис. 1 схеми заміщення проводилось шляхом порівняння результатів вимірювання її ємності, проведених за різних значень опору резистора  $R_s$ , з аналітично розрахованими, що бути отримані на основі наведених в таблицях 1 і 2 часткових ємностей. Так, для наведеної на рис. 1 схеми, у випадку  $R_s \rightarrow 0$  потенціал жили C буде дорівнювати потенціалу заземленої оболонки. Враховуючи зазначену рівність потенціалів, часткові ємності C<sub>CB</sub> та C<sub>CG</sub> не будуть впливати на результати вимірювань а величина ємності буде визначатись паралельно з'єднаними частковими ємностями Сав, Сас та  $C_{AG}$ . Таким чином, за виконання умови  $R_s \rightarrow 0$ тестова напруга вимірювача імітансу буде прикладена

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність, № 1 (10) 2025

до шару ізоляції між жилою А та з'єднаними між собою та оболонкою жилами В та С. Зазначений випадок повністю співпадає зі способом вимірювання сукупної ємності С<sub>А</sub>, що використовується при вирішенні системи рівнянь (1). Таким чином, свідченням обгрунтованості застосування схеми заміщення на рис. 1 є рівність результатів вимірювань сукупних ємностей С<sub>А</sub>, С<sub>В</sub>, та С<sub>С</sub> із відповідними результатами вимірювання ємності при застосуванні наведеної на рис. 1 схеми для випадку  $R_s = 0$ . В той же час, за достатньо високого значення опору  $R_s$  потенціал жили С буде відрізнятись від потенціалу заземленої оболонки. В такому випадку результати сукупних вимірювань ємності будуть визначатись частковими ємностями  $C_{CB}$ ,  $C_{CG}$  а також ємностями  $C_{AB}$ ,  $C_{AC}$  та  $C_{AG}$ . З метою наочного обґрунтування формули для результатів вимірювань сукупного розрахунку значення електричної ємності для наведеної на рис. 1 схеми з'єднання металевих елементів конструкції зазначена схема в розгорнутому вигляді представлена на рис. 6 [10].



Рисунок 6 – Наведена на рис. 1 схема з'єднання металевих елементів конструкції кабелю в розгорнутому вигляді

Для наведеної на рис. 6 схеми, із врахуванням того, що величина опору  $R_s$  дозволяє забезпечити різницю потенціалів між жилою C та оболонкою, результати вимірювань сукупного значення електричної ємності  $C_{A\_EF}$  може бути розраховане за формулою:

$$C_{A\_EF} = C_{AB} + C_{AG} + C_{A\_SP};$$
(3)

де  $C_{A SP}$  розраховується із використанням виразу:

$$C_{A_{-}SP} = \frac{C_{AC}(C_{CB} + C_{CG})}{C_{AC} + C_{CB} + C_{CG}};$$
(4)

При вимірюванні параметрів ізоляційного проміжку між жилами A і B жила C з'єднується з заземленою оболонкою кабелю, жила A з'єднується з оболонкою через резистор  $R_s$  а тестова напруги прикладається між жилою B та заземленою оболонкою кабелю. За виконання умови  $R_s \neq 0$  сукупне значення ємності може бути розраховане за формулою:

$$C_{B_{-}EF} = C_{BC} + C_{BG} + C_{B_{-}SP};$$
(5)

де  $C_{B_{SP}}$  розраховується за формулою:

$$C_{B_{-}SP} = \frac{C_{AB}(C_{AG} + C_{AC})}{C_{AB} + C_{AG} + C_{AC}};$$
 (6)

При вимірюванні параметрів ізоляційного проміжку між жилами B і C жила A з'єднується з заземленою оболонкою, жила B заснується з оболонкою через резистор  $R_s$  а тестова напруга прикладається між жилою C та оболонкою кабелю. В такому випадку сукупна ємність  $C_{C_{LF}}$  може бути розрахована за формулою:

$$C_{C_{-EF}} = C_{AC} + C_{CG} + C_{C_{-SP}};$$
(7)

де коефіцієнт *C*<sub>*A\_SP*</sub> розраховується із використанням виразу:

$$C_{B_{-}SP} = \frac{C_{BC}(C_{AB} + C_{BG})}{C_{BC} + C_{AB} + C_{BG}};$$
(8)

В таблицях 3 і 4 наведено результати аналітичного розрахунку сукупних ємностей за формулами (3–8), результати із вимірювання із застосуванням наведеної на рис. 1 схеми з'єднання металевих елементів конструкції кабелю.

Таблиця 3 – Результати вимірювань та аналітичного розрахунку сукупних ємностей досліджуваного зразка силового кабелю за частоти 1 кГц

| Сукупне<br>значення<br>ємності | Результати<br>розрахунку,<br>пФ | Виміряне<br>значення<br>ємності за<br><i>Rs</i> ≠ 0, пФ | Виміряне<br>значення<br>ємності за<br><i>Rs</i> = 0, пФ |
|--------------------------------|---------------------------------|---|---|
| $C_{A\_EF}$                    | 542                             | 537   | 555   |
| $C_{B\_EF}$                    | 542                             | 536   | 556   |
| $C_{C\_EF}$                    | 520.4                           | 517   | 539.5   |

Таблиця 4 – Результати вимірювань та аналітичного розрахунку сукупних ємностей досліджуваного зразка силового кабелю за частоти 10 кГц

| Сукупне<br>значення<br>ємності | Результати<br>розрахунку,<br>пФ | Виміряне<br>значення<br>ємності за<br><i>Rs</i> ≠ 0, пФ | Виміряне<br>значення<br>ємності за<br><i>Rs</i> = 0 пФ |
|--------------------------------|---------------------------------|---|--|
| $C_{A\_EF}$                    | 528                             | 526.5   | 545.7  |
| $C_{B\_EF}$                    | 534                             | 525   | 545  |
| $C_{C\_EF}$                    | 508                             | 507   | 528.8  |

Наведені в таблицях 3 і 4 результати вимірювань та розрахунків дають можливість зробити висновок про обґрунтованість застосування наведеної на рис. 1 схеми заміщення. Такі висновки можуть бути зроблені на основі порівняння наведених в таблиці 3 та 4 результатів вимірювань ємності за значення  $R_s \neq 0$  із наведеними в цих таблицях, та аналітично розрахованими за формулами (3–8) значеннями. Так, за частоти 10 кГц розраховані значення  $C_{A_{LEF}}$  та  $C_{C_{LEF}}$ практично збігаються з наведеними в таблиці 4 результатами розрахунків. При цьому, найбільша різниця спостерігається для ємності С<sub>В ЕГ.</sub> та складає 9 пФ. Для ємностей C<sub>A\_EF</sub> та C<sub>C\_EF</sub> різниця між та результатами вимірювань аналітичним розрахунком, відповідно, складає 1.5 пФ та 1 пФ. За частоти 1 кГц найбільша різниця між результатами вимірювань та результатами аналітичного розрахунку також спостерігається для ємності C<sub>B EF</sub> та складає 6 пФ. Для ємностей C<sub>A\_EF</sub> та C<sub>C\_EF</sub> різниця між результатами експерименту та розрахунком складає 5 пФ та 3.4 пФ. Порівняння наведених в таблицях 3 і 4 результатів вимірювань ємності за значення  $R_s = 0$  із представленими в таблицях відповідними значеннями С<sub>A</sub>, С<sub>B</sub>, С<sub>C</sub> також дозволяє зробити висновок про високу ступінь узгодження отриманих результатів.

Висновки. В статті наведено експериментальне розглянутої схеми обґрунтування заміщення трижильного силового кабелю паперовою 3 імпрегнованою ізоляцією для випадку резистивного заземлення однієї із жил кабелю, що використовується вимірювання індивідуальних значень 3 метою електричної ємності та тангенса кута діелектричних втрат шарів ізоляції між жилами кабелю. Отримані результати вимірювань сукупних значень електричної ємності демонструють високу ступінь узгодження із аналітичними розрахунками, що дозволяє зробити висновок про можливість практичного застосування розглянутої схеми заміщення кабелю.

#### Список літератури

- СОУ-Н ЕЕ 20.302:2007. Норми випробування електрообладнання. Чинний від 2020-04-06. Вид. офіц. Київ.
- ASTM D924-15. Standard Test Method for Dissipation Factor (or Power Factor) and Relative Permittivity (Dielectric Constant) of Electrical Insulating Liquids. Effective from 2023-12-25. Official edition. 8 p. DOI: https://doi.org/10.1520/D0924-15.
- Diagnostics of high water content paper-oil transformer insulation based on the temperature and frequency dependencies of the loss tangent / P. Zukowski et al. *Energies*. 2022. Vol. 15, no. 8. 2813. DOI: https://doi.org/10.3390/en15082813.
- Dependence of dielectric loss tangent on the parameters of multilayer insulation materials cable / M. N. Dubyago et al. Proceedings of the 2014 International Conference on Frontier of Energy and Environment Engineering (ICFEEE 2014), Taiwan, 6–7 December 2014. London, 2015. P. 1003–1008.
- Bezprozvannych G. V., Moskvitin Y. S. Physical Processes of Aging and Assessment of the Technical Condition of Power Cables with Paper-Impregnated Insulation. 2023 IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek), Kharkiv, 2–6 October 2023. 2023. DOI: https://doi.org/10.1109/khpiweek61412.2023.10312975.
- Напрями удосконалення засобів моніторингу технічного стану силових кабельних ліній систем електропостачання військових аеродромів / Г. І. Лагутін та ін. Системи озбросння і військова техніка. 2021. № 2(66). С. 66–72. DOI: https://doi.org/10.30748/soivt.2021.66.09.
- Москвітін Є. С. Методи контролю старіння паперово-просоченої ізоляції силових кабелів середньої напруги : дис. ... канд. техн. наук : 05.11.13. Харків, 2012. 185 с.
- Analysis of low-frequency dielectric loss of XLPE cable insulation based on extended Debye model / X. Cheng et al. *AIP Advances*. 2021. Vol. 11, no. 8. 085103. DOI: https://doi.org/10.1063/5.0060939.

- Беспрозванных А.В., Москвитин Е.С. Число двойных перегибов как індикатор степени старения кабельних бумаг. Електротехніка і Електромеханіка. 2011. №. 3. С. 62–66.
- Kostiukov I., Lytvynenko S., Lavrinenko O. Mathematical model for the evaluation of dielectric properties of inner layers of insulation in three-core belted cables. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2023. Vol. 1, no. 12. P. 179–182. DOI: https://doi.org/10.15199/48.2023.12.31.
- Костюков І. О. Особливості оцінювання часткових ємностей ізоляції трьохжильних силових кабелів із застосуванням сукупних вимірювань. Український метрологічний журнал. 2021. № 1. С. 15–20. DOI: https://doi.org/10.24027/2306-7039.1.2021.228201.

#### References

- 1. Normy vyprobuvannia elektroobladnannia [Testing standards for electrical equipment], SOU-N EE 20. 302:2007Vidkryte aktsionerne tovarystvo z pusku, nalahodzhennia udoskonalennia tekhnolohii ta ekspluatatsii elektrostantsii i merezh «LvivORHRES», Kyiv. (in Ukrainian)
- Standard Test Method for Dissipation Factor (Or Power Factor) and Relative Permittivity (Dielectric Constant) of Electrical Insulating Liquids, ASTM D924-15, Advancing Standards Transforming Markets(ASTM), doi: https://doi.org/10.1520/D0924-15
- P. Zukowski, P. Rogalski, V. Bondariev, and M. Sebok, "Diagnostics of high water content paper-oil transformer insulation based on the temperature and frequency dependencies of the loss tangent", *Energies*, vol. 15, no. 8, Apr. 2022, Art. no. 2813, doi: https://doi.org/10.3390/en15082813
- M. N. Dubyago, N. Poluyanovich, D. Burkov, and I. Tibeyko, "Dependence of dielectric loss tangent on the parameters of multilayer insulation materials cable", in *Proceedings of the 2014 International Conference on Frontier of Energy and Environment Engineering (ICFEEE 2014)*, Taiwan, Dec. 6–7, 2014. London: CRC Press, 2015, pp. 1003–1008.
- G. V. Bezprozvannych and Y. S. Moskvitin, "Physical processes of aging and assessment of the technical condition of power cables with paper-impregnated insulation", in 2023 IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek), Kharkiv, Ukraine, Oct. 2–6, 2023. IEEE, 2023, doi: https://doi.org/10.1109/khpiweek61412.2023.10312975
- H. Lahutin, S. Khabosha, V. Perepelytsya, I. Kulinich, and I. Soldatenko, "Directions of improving the means of monitoring the technical condition of power cable lines of military airfields power supply systems", *Systems of Arms and Military Equipment*, no. 2(66), pp. 66–72, May 2021, doi: https://doi.org/10.30748/soivt.2021.66.09 (in Ukrainian) (in Russian)
- Ye. S. Moskvitin, "Metody kontroliu starinnia paperovo-prosochenoi izoliatsii sylovykh kabeliv serednoi napruhy [Methods for controlling the aging of paper-impregnated insulation of medium-voltage power cables]", dissertation of Candidate of Technical Sciences, Nat. Tech. Univ. "Kharkiv Polytech. Inst.," Kharkiv, 2012.
- X. Cheng, G. Ye, H. Sun, T. Li, and C. Sun, "Analysis of lowfrequency dielectric loss of XLPE cable insulation based on extended Debye model", *AIP Advances*, vol. 11, no. 8, Aug. 2021, Art. no. 085103, doi: https://doi.org/10.1063/5.0060939
- A. V. Bezprozvannych and E. S. Moscvitin, "Double-kink number as an indicator of degree of cable paper ageing", Electrical Engineering & Electromechanics, no. 3, pp. 62–66, 2011. (in Russian)
- I. Kostiukov, S. Lytvynenko, and O. Lavrinenko, "Mathematical model for the evaluation of dielectric properties of inner layers of insulation in three-core belted cables", *Przegląd Elektrotechniczny*, vol. 1, no. 12, pp. 179–182, Dec. 2023, doi: https://doi.org/10.15199/48.2023.12.31
- I. Kostiukov, "Particular properties of estimation of partial capacitances of insulation of three core power cables by applying aggregate measurements", *Ukrainian Metrological Journal*, no. 1, pp. 15–20, Mar. 2021, doi: https://doi.org/10.24027/2306-7039.1.2021.228201 (in Ukrainian)

Надійшла (received) 23.06.2025

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність, № 1 (10) 2025

## UDC 621.315.2

**KOSTIUKOV IVAN** ⊠ – Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Theoretical Electrical Engineering, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"; Kharkiv, Ukraine; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8923-0579; e-mail: iakostiukow@gmail.com.

**KULYK OLEKSII** – Doctor of Philisophy (PhD), Senior Lecturer of the Department of Electric Power Transmission, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"; Kharkiv, Ukraine; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2545-6314; e-mail: oleksii.kulyk@khpi.edu.ua.

*LYTVYNENKO SVITLANA* – Doctor of Philisophy (PhD), Assistant Professor of the Department of Theoretical Electrical Engineering, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"; Kharkiv, Ukraine; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0818-2470; e-mail: lytvynenko.svitlana@khpi.edu.ua.

**KUBRYK BORYS** – Candidate of Technical Sciences (PhD), Docent, Assistant Professor of the Department of Theoretical Electrical Engineering, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"; Kharkiv, Ukraine; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8327-0350; e-mail: borys.kubryk@khpi.edu.ua

*LAVRINENKO OLGA* – Candidate of Historical Sciences (PhD), Assistant Professor of the Department of Theoretical Electrical Engineering, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"; Kharkiv, Ukraine; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5274-3955; e-mail: Lavrinenko.Olga@khpi.edu.ua.

# EXPERIMENTAL JUSTIFICATION OF THE SCHEME FOR REPLACING A THREE-CORE POWER CABLE WITH PAPER IMPREGNATED INSULATION FOR THE CASE OF RESISTIVE GROUNDING OF ONE OF THE CORES

The article is devoted to the experimental justification of the equivalent circuit of a three-core power cable with paper impregnated insulation in a common metal sheath in the case of resistive grounding of one of the cable cores, which are used when applying one of the methods of measuring individual values of the electric capacitance and the tangent of the angle of dielectric loss of the insulation layers between the cores of the power cable. The experimental justification was based on comparing the results of calculating the total values of the electric capacitance for the considered equivalent circuit with the measurement results obtained using an immittance meter with 2 terminals at two different frequencies of the applied test voltage. When calculating the total values of the capacitance for the circuit with resistive grounding of one of the cores, the values of partial capacitances previously obtained using known methods of surveying three-core power cables based on the use of total measurements were used. Comparison of the results of calculating the total values of the electrical capacitance for the equivalent schemes of cable insulation with resistive grounding of one of the cores with the measurement results showed the possibility of using the equivalent scheme considered in the article. The results obtained can be used to monitor the technical condition of the insulation of three-core power cables according to the parameters of the dielectric loss tangent and electrical capacitance. The application of the control method considered in the article does not require taking into account the influence of the additional component of parasitic inductance in the measurement scheme on the results of determining the parameters of the dielectric and is an alternative to the known control methods based on the use of direct and total measurements.

Keywords: diagnostics of insulation; direct measurements; aggregate measurements; partial capacitances; system of linier algebraic equations.