

*I. О. КОСТЮКОВ***ДИЕЛЕКТРИЧНА СПЕКТРОСКОПІЯ ІЗОЛЯЦІЇ СИЛОВИХ КАБЕЛІВ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ОСЦИЛОГРАФІЧНИХ МЕТОДІВ**

Стаття присвячена аналізу інструментальних похибок вимірювання електричної ємності та тангенса кута діелектричних втрат ізоляції силових кабелів при контролі її технічного стану із застосуванням осцилографічних методів. Наведено моделі для розрахунку тангенса кута діелектричних втрат, що дозволяють враховувати вплив кінцевого опору перетворювача струму в напругу, параметрів осцилографа та схеми його під'єднання на результати вимірювання параметрів ізоляції. Розглянуто схемотехнічні методи, що дозволяють зменшити вплив описаних інструментальних похибок на результати вимірювань електричної ємності та тангенса кута діелектричних втрат ізоляції. Отримані результати можуть бути використані при розробці лабораторних стендів для контролю технічного стану ізоляції силових кабелів у випадку застосування тестових напруг з частотою менше 1 Гц.

**Ключові слова:** діагностика ізоляції, електрична ємність, тангенс кута діелектричних втрат, поляризація діелектриків, повторювачі напруги.

*I. KOSTIUKOV***DIELECTRIC SPECTROSCOPY OF INSULATION IN POWER CABLES BY APPLYING THE OSCILLOSCOPE MEASUREMENTS**

This article is dedicated to the analysis of instrumental errors in measuring the capacitance and dielectric dissipation factor of power cable insulation during the oscilloscopic diagnostics. Models for calculating the dielectric dissipation factor are presented, accounting for the influence of the current-to-voltage converter's finite resistance, oscilloscope parameters, and its connection circuit on the measurement results. Circuit design methods for reducing the impact of these instrumental errors on insulation measurement results are discussed. The obtained results can be used in the development of laboratory setups for monitoring the technical condition of power cable insulation by applying the test voltages with a frequency of less than 1 Hz. It was shown that the application of oscilloscopic methods in dielectric spectroscopy of power cable insulation is characterized by additional instrumental error components due to the influence of oscilloscope parameters and its connection scheme on insulation measurement results. For the power cable insulation inspection example discussed in this article, the influence of these instrumental errors leads to overestimated values of the insulation's dielectric dissipation factor. The influence of oscilloscope parameters and its connection circuit on capacitance and dielectric dissipation factor measurements can be reduced by reducing the resistance of the resistive current-to-voltage converter or by using voltage followers, implemented on an electrometer operational amplifiers.

**Key words:** paper impregnated insulation, partial capacitances, dielectric dissipation factor, control of insulation of power cables.

**Вступ.** Протягом багатьох років методи діелектричної спектроскопії широко використовуються в практиці вирішення задач контролю технічного стану ізоляції електротехнічного обладнання [1–4]. На практиці розрізняють методи діелектричної спектроскопії в частотній та часовій області. При застосуванні методів діелектричної спектроскопії в частотній області діагностичні критерії засновані на дослідженнях частотних залежностей тангенса кута діелектричних втрат ( $\text{tg}\delta$ ) а також дійсної та уявної складових комплексної діелектричної проникності. Незважаючи на роботу ізоляції за промислової частоти прикладеної напруги, в практиці оцінювання ступеню старіння діелектриків вимірювання проводять в широкому діапазоні частот [5]. При застосуванні методів діелектричної спектроскопії в часовій області дослідження також засновані на аналізі частотних залежностей складових комплексної діелектричної проникності та тангенса кута діелектричних втрат, проте зазначені частотні залежності отримують шляхом застосування перетворення Фур'є до кривої струму деполяризації досліджуваного ємнісного об'єкта контролю. Однією з причин широкого інтересу до застосування методів діелектричної спектроскопії в практиці контролю технічного стану ізоляції силових кабелів стало впровадження в енергомережі кабелів з поліетиленовою ізоляцією. В той же час, завдяки своїй універсальності методи діелектричної спектроскопії знаходять застосування не лише при контролі технічного стану силових кабелів з поліетиленовою ізоляцією а і при вирішенні задач контролю силових кабелів, виконаних з паперовою імпрегнованою ізоляцією [6]. В загальному випадку такі вимірювання можуть бути

проведені із застосуванням сучасних цифрових вимірювачів імітансу, в яких реалізовано або різні модифікації методу вольтметра-амперметра (наприклад, прилади Е7-14, Е7-20), або інші методи вимірювань імпедансу електричних кіл. В той же час, застосування переважної більшості сучасних цифрових вимірювачів імітансу дозволяє проводити вимірювання лише за фіксованих значень частот прикладеної напруги. Зазначена особливість не дозволяє досліджувати частотні залежності діагностичних параметрів ізоляції із достатньою роздільною здатністю. Крім того, застосування зазначених вимірювачів імітансу не дозволяє проводити вимірювання за промислової частоти тестової напруги а також в діапазоні частот менше за 1 Гц, в якому безпосередньо розташовані значення  $\text{tg}\delta$ , що досить часто використовуються в якості діагностичних параметрів. Зазначена особливість зумовлює актуальність задачі розширення частотного діапазону та роздільної здатності по частоті при оцінюванні стану ізоляції силових кабелів із застосуванням методів діелектричної спектроскопії частотної області. Одним із можливих шляхів вирішення вказаної задачі є застосування в якості джерела тестової напруги сучасних генераторів сигналів, в яких реалізовано технологію прямого цифрового синтезу із одночасним вимірюванням сигналів струму та напруги із застосуванням двоканальних осцилографів та наступною обробкою осцилограм з метою визначення параметрів діелектрика. Зазначений підхід зумовлює актуальність задачі дослідження способів підключення осцилографа до досліджуваного силового кабелю на точність вимірювань параметрів ізоляції.

© I. О. Костюков, 2025

**Мета статті** полягає в аналізі впливу параметрів схеми підключення осцилографа на результати вимірювання електричної ємності та тангенса кута діелектричних втрат ізоляції силових кабелів та розробці схемотехнічних методів для зменшення зазначеного впливу.

**Аналіз властивостей схеми вимірювання електричної ємності та  $\tan\delta$ .** На рис. 1 наведено традиційну конфігурацію схеми вимірювання електричної ємності та  $\tan\delta$  [7], застосування якої засноване на розділенні синфазної та квадратурної складових струму через досліджуваний об'єкт контролю із застосуванням фазових детекторів.

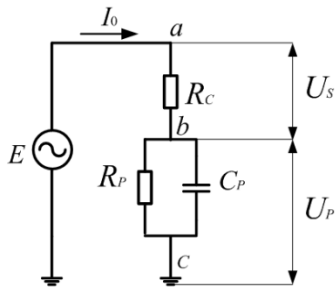


Рис. 1. Принципова схема вимірювання електричної ємності та  $\tan\delta$ :

$R_c$  – опір перетворювача струму в напругу,  $C_p$  – електрична ємність досліджуваного зразка для випадку паралельної схеми заміщення ізоляції силового кабелю,  $R_p$  – опір, зумовлений діелектричними втратами в ізоляції,  $I_0$  – повний струм, що протікає через перетворювач струму в напругу та ізоляцію досліджуваного силового кабелю,  $E$  – джерело тестової напруги,  $U_s$  – напруга на між точками  $a$  та  $b$ , що визначається напругою на резисторі  $R_c$ ,  $U_p$  – напруга між точками  $b$  та  $c$ , що дорівнює напрузі на ємності досліджуваного об'єкта контролю.

Для наведеної на рис. 1 конфігурації схеми вимірювання розділення синфазної та квадратурної складових струму через досліджуваний діелектрик може бути проведено шляхом застосування схемотехнічних рішень, що дозволяють забезпечити зсув тестової напруги на  $90^\circ$  [7]. В той же час, суттєво відзначити існування певних недоліків наведеної на рис. 1 конфігурації схеми вимірювання із перетворювачем струму в напругу на основі резистора  $R_c$ . Один з таких недоліків зумовлений кінцевим значенням опору перетворювача струму в напругу  $R_c$ , та визначає похибку вимірювання  $\tan\delta$  шляхом безпосереднього визначення фазового зсуву між струмом через ізоляцію кабелю та прикладеною до неї напругою. Так, за відсутності перетворювача струму в напругу ( $R_c = 0$ ) повний струм  $I_0$ , що протікає через досліджувану ізоляцію силового кабелю, можна розрахувати із використанням формули:

$$I_0 = \frac{E(1 + j\omega C_p R_p)}{R_p}. \quad (1)$$

З формули (1) можна зробити висновок, що для випадку  $R_c = 0$  реактивна складова струму  $I_c$  не залежить від зумовленого діелектричними втратами опору  $R_p$  а активна складова струму, в свою чергу, залишається незалежною від ємності кабелю  $C_p$ . Таким чином, за  $R_c = 0$  відсутня похибка вимірювання  $\tan\delta$ , зумовлена впливом опору  $R_p$  на квадратурну складову струму та

впливом ємності  $C_p$  на його синфазну складову. В цьому випадку значення  $\tan\delta$  для паралельної схеми заміщення ізоляції силового кабелю може бути розраховане із використанням загальноприйнятого виразу [8]:

$$\tan\delta_1 = \frac{1}{\omega C_p R_p}, \quad (2)$$

де  $\tan\delta_1$  – результат вимірювання тангенса кута діелектричних втрат для ідеалізованого випадку  $R_c = 0$ . В той же час, кінцевий опір перетворювача струму в напругу  $R_c$  зумовлює похибки вимірювання параметрів досліджуваного шару діелектрика. Так, у випадку  $R_c \neq 0$  струм  $I_0$  може бути розрахований із використанням формули:

$$I_0 = \frac{E}{R_c + \frac{R_p}{1 + j\omega C_p R_p}} = \frac{E(1 + j\omega C_p R_p)}{R_c + R_p + j\omega C_p R_p R_c}. \quad (3)$$

Виділення активної та реактивної складових струму  $I_0$  дозволяє визначити рівень тангенса кута діелектричних втрат із використанням формули:

$$\tan\delta_2 = \frac{\omega^2 C_p^2 R_p^2 R_c + R_c + R_p}{\omega C_p R_p^2}, \quad (4)$$

де  $\tan\delta_2$  – результат вимірювання тангенса кута діелектричних втрат для  $R_c \neq 0$ . У випадку  $R_c = 0$  формула (4) співпадає із виразом (2). При цьому, кінцевий опір перетворювача струму в напругу не впливає на точність вимірювань параметрів досліджуваного кабелю. Таким чином, застосування конфігурації вимірювальної схеми, наведеної на рис. 1, є доцільним у випадку, коли активний опір перетворювача струму в напругу є набагато меншим за імпеданс досліджуваного ємнісного об'єкта контролю. Іншим недоліком наведеної на рис. 1 схеми вимірювання є залежність амплітуди тестової напруги, прикладеної до досліджуваного шару ізоляції, від її частоти, що виникає внаслідок частотної залежності ємнісного опору силового кабелю. Зазначений недолік змушує обмежувати область застосування наведеної на рис. 1 схеми випадками досліджень за відносно невисоких рівнів прикладеної до діелектрика напруги, що не ставлять за мету визначення впливу прикладеної напруги на інтенсивність розвитку водних каналів в діелектрику.

При вимірюваннях  $U_s$  та  $U_p$  із застосуванням осцилографічних методів у випадку приєднання кожного з щупів відповідно між точками  $b$ ,  $c$ , та  $a$ ,  $c$  напруга на резисторі  $R_c$  може бути визначена із застосуванням формули:

$$U_s = E - U_p. \quad (5)$$

При цьому суттєво відзначити, що під'єднання щупа осцилографа між точками  $a$  та  $c$  не впливає на точність вимірювань параметрів досліджуваного об'єкта контролю. Так, враховуючи паралельне з'єднання відповідних параметрів осцилографа по відношенню до джерела тестової напруги  $E$  та імпедансу електричного ланцюга, що зумовлений послідовним з'єднанням опору  $R_c$  та імпедансу досліджуваного зразка силового кабелю, величина струму, що протікає через об'єкт контролю буде визначатись лише наступними параметрами схеми:  $R_c$ ,  $C_p$ ,  $R_p$ , та  $E$ . Приєднання щупа осцилографа між точками  $a$  та  $c$  не впливає на величину напруги між цими точками і не змінює величину струму  $I_0$ , що протікає через ізоляцію. В той же час,

приєднання щупа між точками  $b$  та  $c$ , може змінювати величину струму через ізоляцію досліджуваного кабелю та призводити до похибок при вимірюванні її параметрів. Схема заміщення вимірювального ланцюга для випадку підключення одного з щупів осцилографа між точками  $b$  та  $c$ , з метою вимірювання напруги на ємності досліджуваного кабелю, наведена на рис. 2.

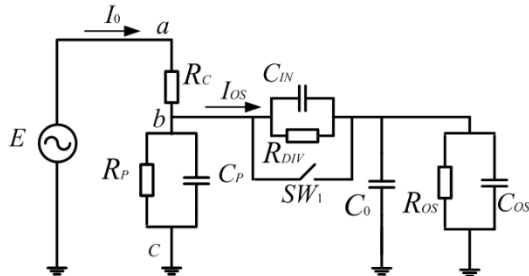


Рис. 2. Схема для визначення впливу схеми під'єднання осцилографа на результати вимірювання електричної ємності та  $\text{tg}\delta$  ізоляції силового кабелю із послідовним з'єднанням перетворювача струму в напругу та імпедансу кабелю:  $R_{os}$  – опір осцилографа ( $R_{os} = 1 \text{ МОм}$ ),  $C_{os}$  – вхідна ємність осцилографа ( $C_{os} = 30 \text{ пФ}$ ),  $C_0$  – ємність кабелю щупа осцилографа ( $C_0 = 100 \text{ пФ}$ ),  $R_{DIV}$  – активний опір дільника напруги ( $R_{DIV} = 9 \text{ МОм}$ ),  $C_{IN}$  – вхідна ємність щупа осцилографа,  $SW_1$  – ключ, що використовується для регулювання коефіцієнту ділення.

Для наведеної на рис. 2 схеми вимірювального кола величина струму через об'єкт контролю не може бути розрахована із використанням виразів (1, 3), через необхідність врахування впливу параметрів осцилографа. В такому випадку, за припущень, що ключ  $SW_1$  при вимірюваннях залишається замкненим, величина струму  $I_0$  може бути визначена із використанням формули:

$$I_0 = \frac{E((1 + j(C_0 + C_p + C_{os})\omega R_p)R_{os} + R_p)}{((1 + j(C_0 + C_p + C_{os})R_c\omega)R_p + R_c)R_{os} + R_p R_{os}}. \quad (6)$$

В такому випадку величина струму  $I_p$ , що протікає через ізоляцію силового кабелю (елементи  $C_p$  та  $R_p$  на рис. 2), може бути визначена із використанням формули:

$$I_p = I_0 \frac{Z_{os}}{Z_{os} + Z_p}, \quad (7)$$

де  $Z_p$  – імпеданс досліджуваного зразка силового кабелю, що визначається за формулою (8),  $Z_{os}$  – імпеданс частини схеми вимірювання, що визначається параметрами щупа та осцилографа. Для випадку замкненого ключа  $SW_1$  параметр  $Z_{os}$  може бути розрахований за формулою (9).

$$Z_p = \frac{R_p}{1 + j\omega C_p R_p}, \quad (8)$$

$$Z_{os} = \frac{R_{os}}{1 + j\omega(C_{os} + C_0)R_{os}}. \quad (9)$$

Приймаючи до уваги вирази (8, 9), формула (7) може бути записана у вигляді:

$$I_p = \frac{ER_{os}(1 + j\omega C_p R_p)}{((1 + j(C_0 + C_p + C_{os})R_c\omega)R_p + R_c)R_{os} + R_c R_p}. \quad (10)$$

Суттєво відзначити, що у випадку відсутності в схемі перетворювача струму в напругу ( $R_c = 0$ )

знаменник формули (6) буде визначатись лише складовою  $R_p R_{os}$ . В такому випадку визначення струму  $I_p$  із використанням формули (7) дозволяє отримати результат, що співпадає з виразом (1) і, таким чином, параметри осцилографа та схеми його під'єднання не будуть впливати на результати вимірювання параметрів діелектрика. Виділення активної та реактивної складових для розрахованого із використанням формули (10) струму  $I_p$  дозволяє визначити тангенс кута діелектричних втрат ізоляції із врахуванням впливу параметрів осцилографа та схеми його під'єднання:

$$\text{tg}\delta_3 = \frac{((-1 - C_p\omega^2(C_0 + C_p + C_{os})R_p^2)R_c - R_p)R_{os} - R_c R_p}{(((C_0 + C_{os})R_c - C_p R_p)R_{os} - C_p R_c R_p)\omega R_p},$$

де  $\text{tg}\delta_3$  – результат вимірювання тангенса кута діелектричних втрат для випадку  $R_c \neq 0$  із врахуванням впливу параметрів осцилографа та схеми його під'єднання. Результати розрахунків параметрів  $\text{tg}\delta_1$ ,  $\text{tg}\delta_2$ ,  $\text{tg}\delta_3$ , визначення яких дозволяє робити висновки щодо рівня  $\text{tg}\delta$  досліджуваного діелектрика, відповідно, без врахування впливу кінцевого опору перетворювача струму в напругу  $R_c$ , із врахуванням цього опору, проте без врахування параметрів осцилографа та схеми його під'єднання а також із одночасним врахуванням опору  $R_c$  та параметрів осцилографа наведені в таблиці 1. Всі наведені результати розрахунків були проведені у випадку  $R_c = 200 \text{ Ом}$ , для ємнісного об'єкта контролю з параметрами:  $C_p = 1016.7 \text{ пФ}$ ,  $R_p = 8.696706285 \cdot 10^7 \text{ Ом}$ , за частоти прикладеної напруги  $1 \text{ кГц}$ .

Таблиця 1 – Результати порівняльного аналізу впливу інструментальних похибок на результати визначення  $\text{tg}\delta$

| Значення тангенса кута діелектричних втрат | Результати розрахунків |
|--------------------------------------------|------------------------|
| $\text{tg}\delta_1$                        | 0.018                  |
| $\text{tg}\delta_2$                        | 0.018127               |
| $\text{tg}\delta_3$                        | 0.018144               |

У відповідності з наведеними в таблиці 1 результатами розрахунків, для розглянутого прикладу інструментальні похибки, зумовлені кінцевим опором перетворювача струму в напругу  $R_c$  та параметрами осцилографа та схеми його під'єднання, призводять до завищених результатів визначення  $\text{tg}\delta$  ізоляції.

**Зменшення впливу схеми під'єднання осцилографа на результати вимірювань електричної ємності та  $\text{tg}\delta$ .** Зменшення впливу параметрів осцилографа та його щупів на результати вимірювань параметрів досліджуваного зразка силового кабелю може бути досягнуте із використанням відомих схемотехнічних рішень, що полягають в зменшенні взаємного впливу між різними частинами електричних кіл шляхом використання повторювачів напруги. Відповідна схема заміщення вимірювального кола наведена на рис. 3.

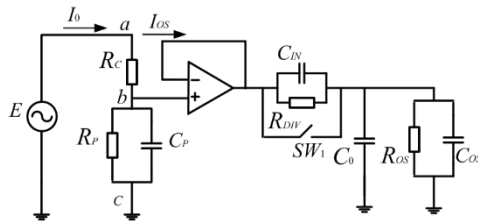


Рис. 3. Зменшення впливу параметрів осцилографа та схеми його підключення на результати вимірювань ємності та  $\text{tg}\delta$  шляхом застосування повторювачів напруги.

Для наведеної на рис. 3 схеми вимірювання доцільно використовувати повторювачі напруги, виконані на електрометричних операційних підсилювачах, вхідні каскади яких виконані із використанням Р-канальних JFET транзисторів, що дозволяє суттєво зменшити вхідні струми підсилювача та обмежити їх рівні значеннями, що не перевищують декількох пА. В якості типових прикладів можна навести електрометричні підсилювачі: AD549, AD645, AD795. Застосування наведеної на рис. 3 схеми вимірювання, враховуючи низький вхідний струм виконаних на електрометричних підсилювачах повторювачів напруги, дозволяє зменшити вплив параметрів осцилографа та схеми його під'єднання на результати вимірювань ємності та  $\text{tg}\delta$  ізоляції. Інший можливий шлях зменшення похибок вимірювання полягає в зменшенні опору перетворювача струму в напругу  $R_c$ .

**Висновки.** Застосування осцилографічних методів в практиці діелектричної спектроскопії ізоляції силових кабелів характеризується додатковими складовими інструментальних похибок, внаслідок впливу параметрів осцилографа та схеми його під'єднання на результати вимірювань параметрів ізоляції. Для розглянутого в статті прикладу обстеження ізоляції силового кабелю вплив зазначених інструментальних похибок призводить до завищених значень тангенса кута діелектричних втрат ізоляції. Зменшення впливу параметрів осцилографа та схеми його під'єднання на результати вимірювань електричної ємності та тангенса кута діелектричних втрат може бути досягнуте шляхом зменшення опору резистивного перетворювача струму в напругу або шляхом застосування включених перед вимірювальним каналом осцилографа повторювачів напруги, виконаних із використанням електрометричних підсилювачів.

#### Список літератури

- 1 Костюков І.О. Особливості оцінювання часткових ємностей ізоляції трьохжильних силових кабелів із застосуванням сукупних

- 15 – 20. doi: [10.24027/2306-7039.1.2021.228201](https://doi.org/10.24027/2306-7039.1.2021.228201)
- 2 Zaengl, W. S. Dielectric spectroscopy in time and frequency domain for HV power equipment, Part 1: Theoretical considerations. *IEEE Electrical insulation magazine*. 2003. Vol. 19 No. 5. P. 5-19. doi: [10.15199/48.2015.08.18](https://doi.org/10.15199/48.2015.08.18)
- 3 Беспрозванных, А.В., Москвитин, Е.С. Критерии оценки степени старения силовых кабелей с бумажно-пропитанной изоляцией. *Электротехника и Электромеханика*. 2013. № 4. С. 32 – 36.
- 4 Onal, E. A study for examining dissipation factors of various insulations and test transformers in the wide range of frequency. *Electronika ir electrotechnika*. 2012. No. 5. P. 27 – 32. doi: [10.5755/j01.eee.121.5.1647](https://doi.org/10.5755/j01.eee.121.5.1647)
- 5 Cheng X., Gang Ye., Haofei S., Tao L., Changwei S. Analysis of low frequency dielectric loss of XLPE cable insulation based on extended Debye model. *AIP Advances*. 2021. No. 11, P. 085103.
- 6 Neimanis, R., Saha, T., Eriksson, R. Determination of moisture content in mass impregnated cable insulation using low frequency dielectric spectroscopy. *Proc of 2000 Power Engineering Society Summer Meeting*. Seattle, USA, 2000, pp. 1-6 doi: [10.1109/PES.2000.867630](https://doi.org/10.1109/PES.2000.867630)
- 7 Raven M. S., Raven D. New approaches to the direct measurement of capacitance. *Electrocomponent Science and Technology*, 1977. No. 4, p. 37-42.
- 8 Беспрозванных А. В., Набока Б. Г. Математические модели и методы расчета электроизоляционных конструкций. Х.: НТУ «ХПИ», 2012. 108 с.

#### References (transliterated)

- 1 Kostyukov I.O. Osoblivosti ocinyuvannya chastkovih yemnostej izolyaciyi trohzhilnih silovih kabeliv iz zastosuvannyam suкупnih vimiryuvan. *Ukrayinskij metrologichnij zhurnal*. 2021. No 1. Pp. 15 – 20. doi: [10.24027/2306-7039.1.2021.228201](https://doi.org/10.24027/2306-7039.1.2021.228201)
- 2 Zaengl, W. S. Dielectric spectroscopy in time and frequency domain for HV power equipment, Part 1: Theoretical considerations. *IEEE Electrical insulation magazine*. 2003. Vol. 19 No. 5. P. 5-19. doi: [10.15199/48.2015.08.18](https://doi.org/10.15199/48.2015.08.18)
- 3 Besprozvannyh, A.V., Moskvitin, E.S. Kriterii ocenki stepeni starenija silovyh kabelej s bumazhno-propitannoj izoljaciej. *Elektrotehnika i elektromehanika*. 2013. No 4. Pp. 32 – 36.
- 4 Onal, E. A study for examining dissipation factors of various insulations and test transformers in the wide range of frequency. *Electronika ir electrotechnika*. 2012. No. 5. Pp. 27 – 32. doi: [10.5755/j01.eee.121.5.1647](https://doi.org/10.5755/j01.eee.121.5.1647)
- 5 Cheng X., Gang Ye., Haofei S., Tao L., Changwei S. Analysis of low frequency dielectric loss of XLPE cable insulation based on extended Debye model. *AIP Advances*. 2021. No. 11, P. 085103.
- 6 Neimanis, R., Saha, T., Eriksson, R. Determination of moisture content in mass impregnated cable insulation using low frequency dielectric spectroscopy. *Proc of 2000 Power Engineering Society Summer Meeting*. Seattle, USA, 2000, Pp. 1-6 doi: [10.1109/PES.2000.867630](https://doi.org/10.1109/PES.2000.867630)
- 7 Raven M. S., Raven D. New approaches to the direct measurement of capacitance. *Electrocomponent Science and Technology*, 1977. No. 4, Pp. 37-42.
- 8 Besprozvannyh A. V., Naboka B. G. Matematicheskie modeli i metody rascheta elektroizolyacionnyh konstrukcij. H.: NTU «HPI», 2012. 108 p.

Надійшла (received) 27.11.2025

#### Відомості про авторів / About the authors

**Костюков Іван Олександрович (Kostjukov Ivan Aleksandrovich)** – доктор технічних наук, завідувач кафедри теоретичних основ електротехніки, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8923-0579>; e-mail: [iakostiukow@gmail.com](mailto:iakostiukow@gmail.com).