

*І. О. КОСТЮКОВ***ОСОБЛИВОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ ЧАСТКОВИХ ЄМНОСТЕЙ ІЗОЛЯЦІЇ ТРЬОЖИЛЬНИХ СИЛОВИХ КАБЕЛІВ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ПРЯМИХ ВИМІРЮВАНЬ**

Стаття присвячена дослідженню впливу додаткової складової паразитної індуктивності схеми вимірювання, що зумовлена необхідністю застосування додаткового провідника для усунення впливу паразитних ємностей досліджуваного шару ізоляції, на результати визначення часткових ємностей ізоляції трьохжильних силових кабелів в спільній металевій оболонці із застосуванням прямих вимірювань. Експериментальним шляхом показано, що наявність додаткової складової паразитної індуктивності призводить до резонансних явищ в схемі вимірювання та, як наслідок, до збільшення результатів прямих вимірювань часткових ємностей із зростанням частоти, що суперечить частотній залежності діелектричної проникності паперової ізоляції в розглянутому частотному діапазоні. Наведено схеми підключення вимірювачів імітансу із 3 клемми для прямих вимірювань часткових ємностей ізоляції трьохжильних силових кабелів в спільній металевій оболонці.

Ключові слова: паперова імпрегнована ізоляція, часткові ємності, тангенс кута діелектричних втрат, контроль ізоляції силових кабелів.

*І. KOSTIUKOV***SPECIFIC PROPERTIES OF DETERMINATION OF PARTIAL CAPACITANCES OF INSULATION IN THREE-CORE POWER CABLES BY APPLYING THE DIRECT MEASUREMENTS**

The article is dedicated to the analysis of impact of the additional component of parasitic inductance of measuring circuit, which exists due to the necessity of applying the additional conductor in order to remove the influence of parasitic capacitances of the analyzed layer of insulation, on the results of determining the partial capacitances of insulation of three-core power cables in a common metal sheath by applying the direct measurements. It was experimentally shown that the existence of an additional component of parasitic inductance leads to resonance phenomena in the measuring circuit and, as a result, to the increasing of the results of the direct measurements of partial capacitances with the increasing of frequency, which contradicts the frequency dependence of dielectric permeability of paper insulation in the considered frequency range. Diagrams of connection of immittance meters with 3 terminals for direct measurements of partial capacitances of insulation in three-core power cables in a common metal sheath are presented. For the tested sample of power cable it was shown that at a frequency of 10 kHz, a high level of agreement is observed between the results of determining partial capacitances obtained by using the methods which require the applying of immittance meters with 2 and 3 terminals. This agreement is evidence that for the tested power cable design at a frequency of 10 kHz, the additional component of the inductance of the measurement circuit does not affect the results of measurements.

Keywords: paper impregnated insulation, partial capacitances, dielectric dissipation factor, control of insulation of power cables.

Вступ. Необхідність забезпечення надійного електропостачання побутових споживачів, промислових виробництв та об'єктів соціальної та критичної інфраструктури зумовлює актуальність контролю та діагностики технічного стану ізоляції силових кабелів. Так, значна кількість силових кабелів використовується в енергомережах із суттєвим перевищенням нормативного строку експлуатації, що, внаслідок зволоження, електричних, теплових та механічних навантажень а також дії часткових розрядів та накопичення об'ємних зарядів призводить до інтенсивного старіння електричної ізоляції, її пробів та виникнення аварійних ситуацій. Таким чином, актуальність забезпечення контролю технічного стану ізоляції силових кабелів визначає необхідність розвитку сучасних методів та приладів для вирішення зазначеної проблеми. Типовими прикладами широко розповсюджених методів контролю, що застосовуються в практиці оцінювання технічного стану ізоляції силових кабелів, є метод відновлювальної напруги [1], який полягає в спостереженні за напругою, що з'являється на електродах досліджуваного ємнісного об'єкту контролю після його довготривалого заряду від джерела постійної напруги та короткочасного розряду. Досить часто на практиці застосовуються методи контролю, засновані на вимірюванні параметрів часткових розрядів [2] та абсорбційних характеристик ізоляції. Широко розповсюдженими також є методи контролю за параметрами ємності та тангенса кута діелектричних втрат ($\text{tg}\delta$), що є чутливими

до ступеню зволоження ізоляції та її теплового старіння [3 - 6].

Незважаючи на розповсюджену тенденцію заміни в енергомережах силових кабелів з паперовою імпрегнованою ізоляцією на силові кабелі з ізоляцією із зшитого поліетилену, трьохжильні силові кабелі в спільній металевій оболонці низької та середньої (до 10 кВ) напруги з паперовою імпрегнованою ізоляцією досі складають значну частину серед кабельних ліній передачі електричної енергії. Зазначений тип силових кабелів містить шість ізоляційних проміжків між металевими елементами конструкції, при цьому контроль технічного стану таких кабелів вимагає визначення індивідуальних параметрів часткових ємностей та $\text{tg}\delta$ кожного з ізоляційних проміжків. На практиці задача визначення індивідуальних параметрів шарів діелектрика в трьохжильних силових кабелях вирішується шляхом застосування прямих, або сукупних вимірювань. Сукупні вимірювання характеризуються підвищеною трудомісткістю та можливим взаємним впливом похибок вимірювання сукупних параметрів діелектрика на результати визначення часткових ємностей силового кабелю. В той же час, такі вимірювання можуть бути виконані із застосуванням вимірювачів імітансу із двома клемми. В свою чергу, при визначенні параметрів ізоляції із застосуванням прямих вимірювань, виникає задача врахування можливого взаємного впливу паразитної індуктивності схеми під'єднання вимірювача імітансу та паразитних ємностей досліджуваного кабелю

© І. О. Костюков, 2025

на результати вимірювань. Стаття присвячена дослідженню можливого впливу, зумовленої необхідністю застосування третьої клема вимірювача імітансу, додаткової складової паразитної індуктивності схеми вимірювання, на результати визначення часткових ємностей ізоляції трьохжильних кабелів із застосуванням прямих вимірювань.

Мета статті полягає в дослідженні особливостей визначення часткових ємностей ізоляції трьохжильних силових кабелів, які полягають у впливі додаткової складової паразитної індуктивності схеми вимірювання, що зумовлена необхідністю застосування додаткового провідника в схемі підключення вимірювача імітансу при застосуванні прямих вимірювань, на результати вимірювання часткових ємностей шляхом порівняльного аналізу результатів, отриманих шляхом застосування прямих та сукупних вимірювань.

Визначення часткових ємностей із застосуванням прямих вимірювань. На рис. 1 наведено загальноприйнятну ємнісну схему заміщення трьохжильних силових кабелів в спільній металевій оболонці, що ілюструє ємнісні зв'язки між електропровідними елементами конструкції силового кабелю.

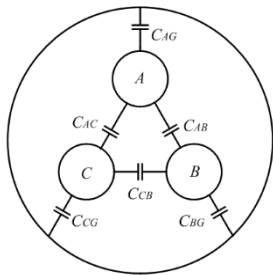


Рис. 1. Часткові ємності ізоляції трьохжильного силового кабелю, утворені ємнісними зв'язками між жилами кабелю та його оболонкою: C_{AB} , C_{BC} , C_{AC} – часткові ємності між жилами силового кабелю, C_{AG} , C_{BG} , C_{CG} – часткові ємності між жилами та оболонкою кабелю [5]

У випадку з'єднання однієї із жил силового кабелю з заземленою оболонкою та подачі тестової напруги вимірювача імітансу між двома іншими жилами, схема заміщення силового кабелю в режимі холостого ходу співпадає із загальноприйнятою в теорії електричних вимірювань схемою заміщення ємнісного об'єкта контролю із паразитними ємностями відносно землі. Зазначена схема заміщення наведена на рис. 2.

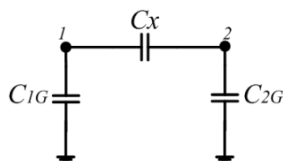


Рис. 2. Ємнісна схема заміщення трьохжильного силового кабелю для випадку з'єднаної з заземленою оболонкою однієї із жил кабелю: C_x – невідома часткова ємність досліджуваного шару ізоляції силового кабелю, C_{1G} та C_{2G} – паразитні ємності.

Для наведеної на рис. 2 схеми заміщення паразитні параметри досліджуваного шару ізоляції C_{1G} та C_{2G}

утворені ємнісними зв'язками між кожною з незаземлених жил силового кабелю та заземленими жилою та оболонкою. На практиці одним із найбільш поширених способів усунення впливу паразитних ємностей C_{1G} та C_{2G} на результати вимірювань C_x є застосування вимірювачів імітансу, що дозволяють забезпечувати трьохзажимне підключення об'єкту контролю. В цьому випадку третя клема вимірювача імітансу використовується для вирівнювання потенціалу одного з електродів (1 чи 2) з потенціалом заземленої оболонки та вимірювання струму, що протікає через досліджувану ємність C_x [7]. Такий спосіб під'єднання досліджуваного об'єкта контролю до вимірювача імітансу дозволяє усунути вплив паразитних ємностей C_{1G} та C_{2G} на результати вимірювання C_x . В той же час, застосування додаткової клема засобу вимірювання призводить до деякого збільшення паразитної індуктивності схеми, що, внаслідок резонансних явищ, може призводити до обмеження частотного діапазону вимірювань. При цьому, за наявності такого впливу, частотний діапазон в якому є можливим проведення вимірювань буде також визначатись величинами ємностей C_{1G} та C_{2G} . При дослідженні можливого впливу паразитних ємностей C_{1G} та C_{2G} на частотну залежність результатів вимірювань ємності C_x елементи досліджуваної схеми заміщення на рис. 2 моделювались із використанням поліпропіленових конденсаторів із заздалегідь відомою електричною ємністю. Вимірювання проводились цифровим вимірювачем імітансу DE-5000 в діапазоні частот від 0.1 кГц до 100 кГц із застосуванням трьохзажимної схеми підключення досліджуваного конденсатора. При вимірюваннях ємність C_x залишалась незмінною, в той же час, паразитні ємності C_{1G} та C_{2G} моделювались шляхом підключення конденсаторів з різною електричною ємністю. Результати вимірювань наведено на рис. 3.

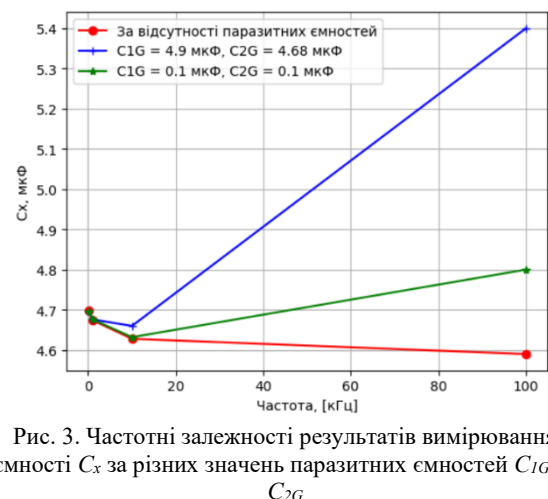


Рис. 3. Частотні залежності результатів вимірювання ємності C_x за різних значень паразитних ємностей C_{1G} та C_{2G}

З наведених на рис. 3 результатів вимірювань можна зробити висновок, що за відсутності паразитних ємностей C_{1G} та C_{2G} частотна залежність отриманих результатів є досить типовою для ємнісних об'єктів контролю та характеризується поступовим зниженням результатів вимірювання електричної ємності, що визначається зменшенням діелектричної проникності із

зростанням частоти прикладеної напруги. В той же час, за наявності паразитних ємностей частотна залежність ємності C_x в певному частотному діапазоні демонструє тенденцію до збільшення. При цьому, таке збільшення стає більш вираженим при збільшенні паразитних ємностей C_{1G} та C_{2G} та входить в протиріччя із частотною залежністю відносної діелектричної проникності діелектриків в розглянутому частотному діапазоні, в якому збільшення частоти, зазвичай, призводить до зменшення діелектричної проникності. Оскільки в більшості випадків збільшення результатів вимірювань ємності із зростанням частоти зумовлене паразитною індуктивністю досліджуваних ємнісних об'єктів [8], наведені на рис. 3 результати вимірювань свідчать, що збільшення паразитних ємностей C_{1G} та C_{2G} та відповідне зменшення ємнісного опору відповідних елементів схеми заміщення на рис. 2 призводить до збільшення впливу паразитної індуктивності на результати вимірювання електричної ємності та обмежує частотний діапазон вимірювань.

З метою дослідження проілюстрованої на рис. 3 можливості впливу паразитної індуктивності на результати вимірювань параметрів шарів діелектрика між електропровідними елементами конструкції в трьохжильному силовому кабелі були проведені вимірювання часткових ємностей кабелю ААШв 6-3×150. Вимірювання були проведені із використанням вимірювача імпедансу DE-5000 при застосуванні трьохжильних схем підключення досліджуваного кабелю, що наведені на рис. 4 – 6 та використовуються для випадку вимірювання часткових ємностей та $\tan \delta$ шарів ізоляції між жилами силового кабелю.

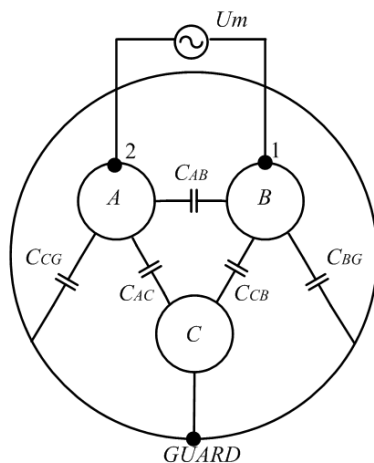


Рис. 4. Схема підключення вимірювача імпедансу з 3 клемми при визначенні часткової ємності між жилами A і B: 1, 2 – точки під'єднання перших двох клем та джерела тестового сигналу вимірювача імпедансу, GUARD – точка під'єднання третьої клемми вимірювача

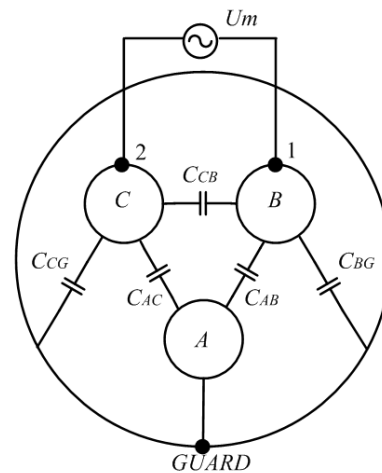


Рис. 5. Схема підключення вимірювача імпедансу з 3 клемми при визначенні часткової ємності між жилами B і C: 1, 2 – точки під'єднання перших двох клем та джерела тестового сигналу вимірювача імпедансу, GUARD – точка під'єднання третьої клемми вимірювача

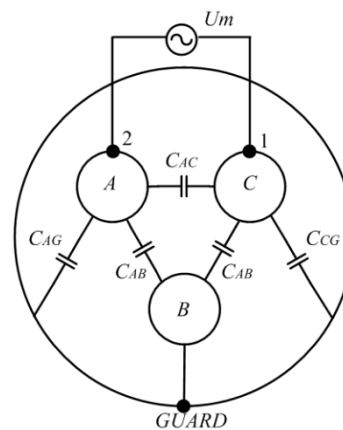


Рис. 6. Схема підключення вимірювача імпедансу з 3 клемми при визначенні часткової ємності між жилами A і C: 1, 2 – точки під'єднання перших двох клем та джерела тестового сигналу вимірювача імпедансу, GUARD – точка під'єднання третьої клемми вимірювача

З наведених на рис. 4 – 6 схем, видно, що при вимірюванні часткових ємностей між жилами в трьохжильних силових кабелях в спільній металевій оболонці тестова напруга вимірювача імпедансу прикладається до досліджуваного шару ізоляції силового кабелю. При цьому, третя жила повинна бути приєднана до оболонки, до якої, в свою чергу, приєднується третя клемма вимірювача імпедансу.

При вимірюванні часткових ємностей між жилою та оболонкою напруга також прикладається до досліджуваного шару ізоляції між жилою та оболонкою, при цьому дві інші жили повинні бути з'єднані між собою та приєднані до третьої клемми вимірювача імпедансу. Схематичне зображення способів з'єднання металевих елементів конструкції силового кабелю та підключення вимірювача імпедансу наведено на рис. 7 – 9.

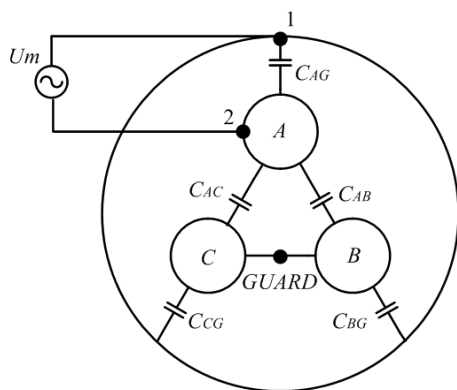


Рис. 7. Схема підключення вимірювача імітансу з 3 клемми при визначенні часткової ємності між жилою A та оболонкою кабелю: 1, 2 – точки під'єднання перших двох клем та джерела тестового сигналу вимірювача імітансу, GUARD – точка під'єднання третьої клемми вимірювача

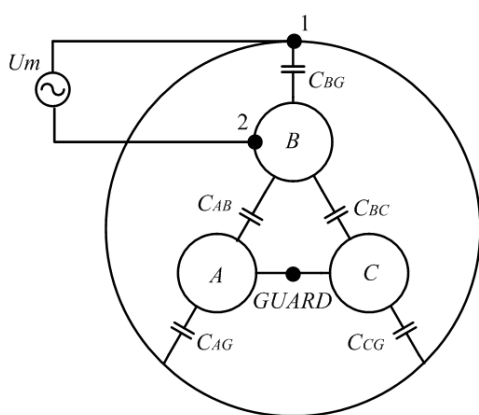


Рис. 8. Схема підключення вимірювача імітансу з 3 клемми при визначенні часткової ємності між жилою B та оболонкою кабелю: 1, 2 – точки під'єднання перших двох клем та джерела тестового сигналу вимірювача імітансу, GUARD – точка під'єднання третьої клемми вимірювача.

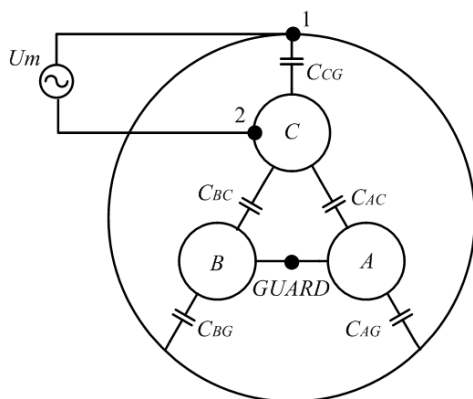


Рис. 9. Схема підключення вимірювача імітансу з 3 клемми при визначенні часткової ємності між жилою C та оболонкою кабелю: 1, 2 – точки під'єднання перших двох клем та джерела тестового сигналу вимірювача імітансу, GUARD – точка під'єднання третьої клемми вимірювача.

Застосування наведених на рис. 4 – 9 схем підключення вимірювача імітансу дозволяє проводити прямі вимірювання індивідуальних параметрів шарів ізоляції між електропровідними елементами конструкції для наведеної на рис. 1 схеми заміщення силового кабелю.

Визначення часткових ємностей із застосуванням сукупних вимірювань. У випадку визначення часткових ємностей ізоляції із застосуванням сукупних вимірювань використовується двохзажимне підключення досліджуваного кабелю. В цьому випадку вимірюють декілька сукупних значень електричної ємності за різних способів з'єднання металевих елементів конструкції, після чого невідомі значення часткових ємностей знаходять шляхом вирішення системи лінійних алгебраїчних рівнянь [9]:

$$\mathbf{A}_2 \mathbf{c}_1 = \mathbf{b}, \quad (1)$$

де вектор $\mathbf{c}_1$ містить невідомі часткові ємності силового кабелю: $\mathbf{c}_1 = [C_{AB}, C_{BC}, C_{AC}, C_{AG}, C_{BG}, C_{CG}]^T$, вектор $\mathbf{b}$ містить результати вимірювань сукупних значень електричної ємності: $\mathbf{b} = [C_A, C_B, C_C, C_{A-B}, C_{B-C}, C_{A-C}]^T$, де C_A, C_B, C_C – результати вимірювань сукупних значень електричної ємності при застосуванні схеми з'єднання струмопровідних елементів: «жила проти двох інших жил та оболонки», тобто при прикладанні тестової напруги до шару ізоляції між кожною із жил силового кабелю та з'єднаними між собою та оболонкою двома іншими жилами, $C_{A-B}, C_{B-C}, C_{A-C}$ – сукупні значення електричної ємності, що отримані із застосуванням схеми вимірювання: «дві жили проти жили та оболонки», тобто при подачі тестової напруги між двома з'єднаними між собою жилами кабелю за з'єднаною з оболонкою третьою жилою. Рядки та стовпчики матриці $\mathbf{A}_2$ визначаються за виразом:

$$\mathbf{A}_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Результати вимірювань сукупних значень електричної ємності, що формують вектор $\mathbf{b}$, наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Результати вимірювань сукупних значень електричної ємності досліджуваного зразка силового кабелю

C_A , пФ	C_B , пФ	C_C , пФ	C_{A-B} , пФ	C_{B-C} , пФ	C_{A-C} , пФ
541.9	542	532.5	879.4	841.9	868

Результати визначення часткових ємностей із застосуванням прямих та сукупних вимірювань та обговорення отриманих результатів. Результати вимірювань часткових ємностей трьохжильного силового кабелю, виконані із використанням вимірювача імітансу DE – 5000 на частоті 10 кГц, та отримані із застосуванням описаних в статті прямих та сукупних вимірювань наведені в табл. 2. При застосуванні сукупних вимірювань наведені в табл. 2 результати були отримані шляхом вирішення системи рівнянь (1) із використанням наведених в табл. 1 результатів вимірювань сукупних значень електричної ємності.

Таблиця 5 – Результати. визначення часткових ємностей досліджуваного зразка силового кабелю, отримані із використанням прямих та сукупних вимірювань

	Прямі вимірювання	Сукупні вимірювання
C_{AB} , пФ	101.7	102.25
C_{BC} , пФ	108.6	108.2
C_{AC} , пФ	97.8	98.7
C_{AG} , пФ	337.5	340.9
C_{BG} , пФ	327.5	331.5
C_{CG} , пФ	313.7	316.6

Наведені в табл. 2 результати вимірювань демонструють високий рівень узгодження часткових ємностей, невідповідність між якими у всіх випадках не перевищує 10 пФ. Такий високий рівень узгодження в даному випадку дозволяє зробити висновок про відсутність проілюстрованого на рис. 3 впливу паразитної індуктивності на результати вимірювань.

Висновки. Прямі вимірювання параметрів ізоляції між жилами трьохжильних силових кабелів в спільній металевій оболонці можуть бути виконані із використанням вимірювачів імітансу із 3 клемми. Експериментальним шляхом показано, що до особливостей таких вимірювань відноситься можливість впливу додаткової складової паразитної індуктивності схеми вимірювання на результати визначення часткових ємностей. Зазначений вплив зумовлений необхідністю застосування додаткового провідника, з метою усунення впливу паразитних ємностей досліджуваного шару ізоляції на результати вимірювань, та може призводити до збільшення отриманих значень часткових ємностей із зростанням частоти тестової напруги, внаслідок небажаних резонансних явищ в схемі вимірювання. В той же час, для досліджуваного зразка силового кабелю за частоти 10 кГц спостерігається високий рівень узгодження між результатами визначення часткових ємностей, отриманими із застосуванням методів, що вимагають застосування вимірювачів імітансу із 2 та 3 клемми. Зазначене узгодження є свідченням того, що для досліджуваної конструкції силового кабелю за частоти 10 кГц додаткова складова індуктивності схеми вимірювання не впливає на результати вимірювань.

Список літератури

- 1 Беспрозванных А. В. Физическая интерпретация кривых восстановления напряжения на основе схем замещения неоднородного диэлектрика. *Технічна Електродинаміка*. 2009. № 6. С. 23 – 27.

- 2 Беспрозванных А. В. Сильное электрическое поле и частичные разряды в многожильных кабелях. *Технічна Електродинаміка*. 2010. № 1. С. 23 – 29.
- 3 Bezprozvannyh, G.V., Kostiukov, I.A. A method of wavelet analysis of time series of parameters of dielectric absorption of electrical insulating structures. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2020. № 2. P. 52 – 58. doi: 10.15407/techned2019.04.048
- 4 Беспрозванных, А.В., Москвитин, Е.С. Критерии оценки степени старения силовых кабелей с бумажно-пропитанной изоляцией. *Електротехніка і електромеханіка*. 2013. № 4. С. 32 – 36.
- 5 Москвитин, Е.С. Контроль процессов старения силовых кабелей с бумажно-пропитанной изоляцией по измерению диэлектрических характеристик изоляционных промежутков. *Вісник НТУ «ХПИ»*. 2011. № 3. С. 95 – 106.
- 6 Cheng X., Gang Ye., Hao Fei 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.
- 7 Impedance Measurement Handbook. A guide to measurement technology and techniques. Application Note. 6th ed. Keysight Technologies: USA, 2016, 140 p.
- 8 Беспрозванных А. В., Набока Б. Г. Математические модели и методы расчета электроизоляционных конструкций. Х.: НТУ «ХПИ», 2012. 108 с.
- 9 Костюков І.О. Особливості оцінювання часткових ємностей ізоляції трьохжильних силових кабелів із застосуванням сукупних вимірювань. *Український метрологічний журнал*. 2021. № 1. С. 15 – 20. doi: 10.24027/2306-7039.1.2021.228201

References (transliterated)

- 1 Besprozvannyh A. V. Fizicheskaya interpretatsiya krivykh vosstanavlivayushchegosya napryazheniya na osnove shem zamesheniya neodnorodnogo dielektrika. *Tekhnichna Elektrodinamika*. 2009. no 6. Pp. 23 – 27.
- 2 Besprozvannyh A. V. Silnoe elektricheskoe pole i chastichnye razryady v mnogozhilnykh kabelyakh. *Tekhnichna Elektrodinamika*. 2010. no 1. Pp. 23 – 29.
- 3 Bezprozvannyh, G.V., Kostiukov, I.A. A method of wavelet analysis of time series of parameters of dielectric absorption of electrical insulating structures. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2020. no 2. Pp. 52 – 58. doi: 10.15407/techned2019.04.048
- 4 Besprozvannyh, A.V., Moskvitin, E.S. Kriterii ocenki stepeni stareniya silovykh kabelej s bumazhno-propitannoj izolyaciej. *Elektrotehnika i elektromekhanika*. 2013. no 4. Pp. 32 – 36.
- 5 Moskvitin, E.S. Kontrol processov stareniya silovykh kabelej s bumazhno-propitannoj izolyaciej po izmereniyu dielektricheskikh harakteristik izolyacionnykh promezhutkov. *Visnik NTU «HPI»*. 2011. no 3. Pp. 95 – 106.
- 6 Cheng X., Gang Ye., Hao Fei 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.
- 7 Impedance Measurement Handbook. A guide to measurement technology and techniques. Application Note. 6th ed. Keysight Technologies: USA, 2016, 140 p.
- 8 Besprozvannyh A. V., Naboka B. G. Matematicheskie modeli i metody rascheta elektroizolyacionnykh konstrukcij. H.: NTU «HPI», 2012. 108 p.
- 9 Kostyukov I.O. Osoblivosti ocinyuvannya chastkovih yemnostej izolyaciyi trohzhilnih silovykh kabeliv iz zastosuvannyam suкупnih vimiryuvan. *Ukrayinskij metrologichnij zhurnal*. 2021. no 1. Pp. 15 – 20. doi: 10.24027/2306-7039.1.2021.228201

Надійшла (received) 19.05.25

Відомості про авторів / About the authors

Костюков Іван Олександрович (Kostjukov Ivan Aleksandrovich) – доктор технічних наук, завідувач кафедри теоретичних основ електро-техніки, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; e-mail: iakostiukow@gmail.com