

*І. О. КОСТЮКОВ, А. М. БОРИСЕНКО, С. А. ЛИТВИНЕНКО, Я. М. ІЛЬЧАКОВА*

### ДІАГНОСТИКА ІЗОЛЯЦІЇ СИЛОВИХ КАБЕЛІВ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ МЕТОДІВ ДІЕЛЕКТРИЧНОЇ СПЕКТРОСКОПІЇ: ОГЛЯД ФІЗИЧНИХ ОСНОВ ТА ОСОБЛИВОСТЕЙ ПРАКТИЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ

Стаття присвячена огляду фізичних основ діелектричної спектроскопії паперової та поліетиленової ізоляції силових кабелів в часовій та частотній областях. Наведено аналіз основних факторів, що впливають на частотну залежність тангенса кута діелектричних втрат та комплексної діелектричної проникності ізоляції. Наведено перелік та коротку характеристику основних типів реакції поліетиленової ізоляції на рівні та частоту прикладеної напруги в залежності від ступеню її зволоження та розвитку водних каналів. Наведено зв'язок між параметрами діелектричної спектроскопії в часовій та частотній областях.

**Ключові слова:** діагностика ізоляції, комплексна діелектрична проникність, діелектричні втрати, поляризація діелектриків, електропровідність діелектриків.

*I. KOSTIUKOV, A. BORYSENKO, S. LYTVYNYENKO, Y. ILCHAKOVA*

### DIAGNOSTICS OF POWER CABLE INSULATION BY USING THE METHODS OF DIELECTRIC SPECTROSCOPY: OVERVIEW OF PHYSICAL BASIS AND FEATURES OF PRACTICAL APPLICATION

The article provides an overview of the physical foundations and features of the application of diagnostic methods for the insulation of power cables using dielectric spectroscopy methods in the frequency and time domains. The relationship between the depolarization currents and the frequency spectrum of the complex dielectric constant is shown. An analysis of the factors determining the frequency dependence of the tangent angle of dielectric losses of paper and polyethylene insulation of power cables is given. The main types of reaction of dielectric materials with different levels of development of water channels at the level and frequency of the applied voltage are listed. According to the results of the analysis, it is shown that for high-voltage measurements, one of the factors that complicates the diagnosis of the insulation of power cables by analyzing the frequency dependences of the capacitance and the tangent of the dielectric loss angle is the distortion of the sinusoidal current through the dielectric due to the nonlinear dependence of the complex dielectric constant on the level of the applied voltage. A comparative analysis of dielectric spectroscopy methods in the frequency domain, involving high-voltage and low-voltage measurements of the complex dielectric constant, was carried out. The correlation between the tangent of the dielectric loss angle of paper insulation and its mechanical characteristics is shown.

**Keywords:** insulation diagnostics, complex dielectric permittivity, dielectric losses, polarization of dielectrics, electrical conductivity of dielectrics.

**Вступ.** Методи діелектричної спектроскопії широко використовуються в практиці контролю та діагностики технічного стану ізоляції електротехнічного обладнання, зокрема силових кабелів з ізоляцією із зшитого поліетилену та паперовою імпрегнованою ізоляцією [1] а також силових трансформаторів [2]. При застосуванні методів діелектричної спектроскопії оцінювання технічного стану ізоляції досліджуваних об'єктів контролю здійснюється на основі дослідження впливу різноманітних зовнішніх факторів (в першу чергу рівнів та частоти прикладеної напруги а також зволоження ізоляції та ступеню розвитку в ній водних каналів) на процеси поляризації та електропровідності в діелектриках. При цьому такі дослідження проводяться як в частотній, так і в часовій областях. В частотній області методи діелектричної спектроскопії, в основному, засновані на дослідженні частотних залежностей дійсної та уявної складових комплексної діелектричної проникності а також таких похідних від комплексної діелектричної проникності параметрів як тангенс кута діелектричних втрат ( $\text{tg}\delta$ ) та комплексна електрична ємність ізоляції. На практиці такі дослідження проводяться із застосуванням як високовольтних, так і низьковольтних вимірювань. При цьому, незважаючи на роботу електротехнічного обладнання за промислової частоти прикладеної напруги, дослідження складових комплексної діелектричної проникності в частотній області можуть виконуватись в значно ширшому діапазоні частот, наприклад, до  $10^{12}$  Гц.

В часовій області методи діелектричної спектроскопії передбачають реєстрацію зарядного та розрядного струмів досліджуваних об'єктів контролю, аналіз яких дозволяє робити висновки щодо електропровідності діелектричного матеріалу. При цьому варто відзначити, що багато із поширених на практиці методів контролю технічного стану ізоляції електротехнічного обладнання досить часто розглядаються як один із різновидів діелектричної спектроскопії. Так, наприклад, поширений на практиці метод відновлюваної напруги [3], розглядається як один із різновидів методів діелектричної спектроскопії в часовій області [4].

Достатньо висока інформативність методів діелектричної спектроскопії зумовлює значну увагу, що приділяється методам діагностики, що засновані на вимірюваннях таких параметрів електротехнічного обладнання як  $\text{tg}\delta$  та електрична ємність [5, 6]. Зазначене поширення методів діелектричної спектроскопії, та суттєва увага, що приділяється їх розвитку, визначають доречність аналітичного огляду їх фізичних основ та особливостей практичного застосування.

**Мета статті** полягає аналітичному огляді методів діагностики ізоляції силових кабелів, заснованих на застосуванні діелектричної спектроскопії в частотній та часовій областях.

**Діелектрична спектроскопія в часовій області.** Застосування методів діелектричної спектроскопії в часовій області передбачає експериментальне визначення кривих зарядного та розрядного струму (струми

поляризації та деполяризації, згідно із термінологією [4]) досліджуваних ємнісних об'єктів контролю. Схематичне зображення типових кривих струму поляризації та деполяризації а також типова технічна реалізація лабораторних установок, що використовуються для реєстрації струмів поляризації та деполяризації наведені на рис. 1 та рис. 2 [4].

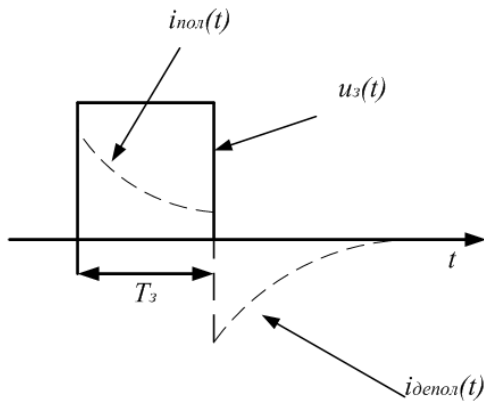


Рис. 1. Схематичне зображення струмів поляризації та деполяризації при застосуванні діелектричної спектроскопії в часовій області

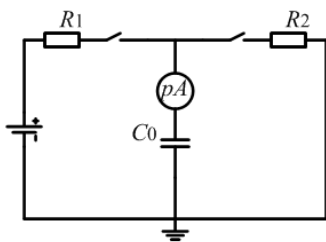


Рис. 2. Принципова схема лабораторного стенду для вимірювання струмів поляризації та деполяризації

На рис. 2  $C_0$  – ємність досліджуваного об'єкта контролю,  $R_1$ ,  $R_2$  – захисні резистори. Таким чином, у відповідності із рис. 1 діелектрична спектроскопія ізоляційних матеріалів в часовій області полягає у вимірюванні струмів поляризації та деполяризації, що протікають внаслідок заряду ємності досліджуваного об'єкта контролю протягом часу  $T_3$  та наступного його розряду. При цьому таке спостереження за струмами поляризації та деполяризації дає можливість експериментального визначення електропровідності діелектричного матеріалу, що може бути розрахована за формулою [1]:

$$\sigma = \frac{\epsilon_0}{C_0 U_0} (i_{\text{пол}}(t) - i_{\text{депол}}(t)), \quad (1)$$

де  $U_0$  – рівень зарядної напруги,

$C_0$  – геометрична ємність досліджуваного об'єкта контролю,

$\epsilon_0$  – електрична постійна,

$i_{\text{пол}}(t)$ ,  $i_{\text{депол}}(t)$  – струми поляризації та деполяризації.

Результати експериментальних досліджень струмів поляризації та деполяризації зразків із різним вмістом води показують високу ступінь ідентичності кривих струмів поляризації та деполяризації для зразків діелектриків із низьким вмістом води. В той же час, збільшення вмісту води призводить до збільшення різниці

між цими струмами. Таким чином, при застосуванні діелектричної спектроскопії в часовій області ознакою високоякісної ізоляції є саме висока ідентичність кривих струму поляризації та деполяризації, що, у відповідності із виразом (1), буде спостерігатись саме для діелектричного матеріалу із низькою електропровідністю та, відповідно, низьким вмістом води.

**Діелектрична спектроскопія в частотній області.** В практиці методів діелектричної спектроскопії, що передбачають дослідження параметрів діелектрика в частотній області, по відношенню до частоти та рівнів випробувальної напруги в переважній більшості випадків вимірювання складових комплексної діелектричної проникності та тангенса кута діелектричних втрат можна розділити на дві великі групи:

1. Вимірювання, що проводяться за промислової частоти, проте за різних рівнів відносно високої (від 1 кВ) прикладеної до досліджуваного об'єкта контролю випробувальної напруги.

2. Вимірювання, що передбачають застосування випробувальної напруги, що змінюється в широкому діапазоні частот, проте за відносно невисоких (до декількох вольт) рівнів випробувальної напруги. Так, наведені в оглядовій публікації [4] результати вимірювань  $\text{tg}\delta$  та дійсної частини комплексної електричної ємності були виконані в діапазоні частот від  $3.16 \cdot 10^{-4}$  Гц до  $10^4$  Гц за рівня прикладеної напруги, що складає 3 В. Аналогічний частотний діапазон використовувався авторами [7] при дослідженнях частотної залежності  $\text{tg}\delta$  зразків силових кабелів з ізоляцією із зшитого поліетилену. Дослідження частотних властивостей дійсної та уявної складових комплексної діелектричної проникності а також  $\text{tg}\delta$  зразків паперової ізоляції силових кабелів, що дозволили встановити вплив ступеню зволоження ізоляції на локальні мінімуми частотної залежності  $\text{tg}\delta$ , були проведені в діапазоні частот від  $10^{-3}$  Гц до  $10^3$  Гц та за рівня прикладеної напруги, що складає 5 В [1].

За низьких рівнів випробувальних напруг, що не призводять до появи часткових розрядів в електричній ізоляції, типові частотні залежності  $\text{tg}\delta$  визначаються втратами на електропровідність та поляризацію. В діапазоні відносно низьких частот значення  $\text{tg}\delta$ , перш за все, визначаються втратами на електропровідність. Для цього частотного діапазону характерними є відносно високі рівні  $\text{tg}\delta$  та практично лінійне зменшення цього параметру електричної ізоляції із зростанням частоти прикладеної напруги.

При визначенні ємності та  $\text{tg}\delta$  із застосуванням цифрових вимірювачів імтансу, в яких реалізовані послідовна чи паралельної схеми заміщення досліджуваного об'єкта контролю, необхідно приймати до уваги неможливість описання частотної залежності  $\text{tg}\delta$  в широкому діапазоні частот шляхом використання зазначених простих моделей ємнісних об'єктів контролю. Для таких схем заміщення характерним є або поступове збільшення, або поступове зменшення  $\text{tg}\delta$  із зростанням частоти прикладеної напруги. В той же час, для реальних об'єктів контролю, ізоляція яких в загальному випадку представлена багатокомпонентними неоднорідними діелектриками, частотна залежність  $\text{tg}\delta$  в

широкому діапазоні частот не може бути описана монотонно зростаючою, чи спадаючою функцією. Для реальних об'єктів контролю, на відміну від послідовної, чи паралельної схем заміщення, більш актуальною є наведена на рис. 1 схема заміщення Фойгта, яка дозволяє більш точно описати частотну залежність  $\text{tg}\delta$ .

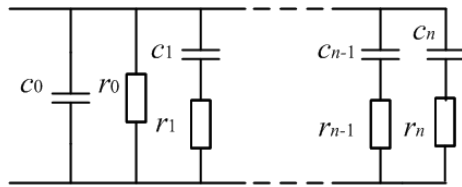


Рис. 3. Еквівалентна схема заміщення неоднорідних діелектриків

Для наведеної на рис. 3 схеми заміщення  $r_0$  – електричний опір, що зумовлений існуванням певного струму витoku, внаслідок кінцевого значення електричного опору ізоляції,  $c_0$  – електрична ємність, обумовлена «швидкими» видами поляризації, що не призводять до діелектричних втрат та є практично незалежними від частоти прикладеної напруги. Ланцюжки  $c_1r_1..c_nr_n$  відображують існування «повільних» видів поляризації, що призводять до діелектричних втрат та суттєво залежать від частоти прикладеної напруги. Для випадку одного, зумовленого повільними видами поляризації, ланцюжка  $c_1r_1$ , частотна залежність  $\text{tg}\delta$  характеризується досить великими значеннями в області низьких частот, де рівень  $\text{tg}\delta$  та добротності об'єкта контролю визначаються, в основному, втратами на електропровідність, наступним поступовим зменшенням  $\text{tg}\delta$  із зростанням частоти, наступним збільшенням, внаслідок додаткових втрат на поляризацію, із локальним максимумом, який досягається за приблизного виконання умови, за якої втрати на поляризацію є максимальними, що виконується у випадку, коли час встановлення поляризаційних процесів приблизно співпадає із періодом прикладеної напруги, та наступним поступовим зменшенням  $\text{tg}\delta$ , внаслідок зниження здатності діелектрика до поляризації в області високих частот. Враховуючи наявність в неоднорідних діелектриках декількох різних видів поляризації, частотна залежність  $\text{tg}\delta$ , в загальному випадку, може характеризуватись декількома локальними максимумами, кожен з яких зумовлений локальним максимумом діелектричних втрат для кожного конкретного типу поляризації. При цьому суттєво відзначити, що для багатьох розповсюджених на практиці об'єктів контролю врахування декількох видів поляризації відповідними  $rc$  ланцюжками на Рис. 3, не дозволяє точно описати частотну залежність  $\text{tg}\delta$  в широкому діапазоні частот прикладеної напруги. Типовим прикладом таких об'єктів контролю є силові кабелі з ізоляцією із зшитого поліетилену, елементами конструкції яких є напівпровідні шари, що нанесені по жилі та по ізоляції кабелю, оскільки для такої конструкції характерним є монотонне зростання  $\text{tg}\delta$  в області високих частот, внаслідок додаткових втрат в напівпровідних екранах.

Актуальність методів діелектричної спектроскопії варто відзначити навіть для випадків, коли рівні  $\text{tg}\delta$  не

регламентуються для конкретного типу силових кабелів. Типовим прикладом таких кабелів є силові кабелі з паперовою імпрегнованою ізоляцією, виконані на роботу напругу до 6 кВ. Ізоляція таких кабелів є неоднорідним діелектриком, що складається із кабельного паперу (марок К та КМП з товщиною одного шару від 80 мкм до 140 мкм), каніфолі (від 2.5% до 25% від всієї маси компаунду), мінерального масла та, для деяких композицій компаунду, поліетиленового воску (3% від маси компаунду), селілену та композиції на основі поліізобутилену (20% від всієї маси компаунду) [8]. В той же час, для аналогічних кабелів виконаних на напругу 10 кВ,  $\text{tg}\delta$  не повинен перевищувати 0.8% за рівня випробувальної напруги 5 кВ [8]. Крім того, збільшення прикладеної напруги з 5 кВ до 20 кВ не повинно призводити до збільшення  $\text{tg}\delta$  більше ніж на 0.7%. Незважаючи на зазначену відсутність нормування рівнів  $\text{tg}\delta$  для силових кабелів з паперовою ізоляцією на напругу менше ніж 6 кВ, дослідження кореляції між  $\text{tg}\delta$  та механічними характеристиками (число подвійних згинів смужки кабельного паперу до моменту її зламу) паперової імпрегнованої ізоляції дозволили встановити значення  $\text{tg}\delta$ , що відповідають різному ступеню деградації паперової ізоляції [9, 10]:

- $\text{tg}\delta \leq 0.4\%$  – нормальний технічний стан ізоляції;
- $0.4\% \leq \text{tg}\delta \leq 0.6\%$  – наявні початкові ознаки старіння ізоляції;
- $0.6\% \leq \text{tg}\delta \leq 1\%$  – помірний рівень старіння ізоляції;
- $1\% \leq \text{tg}\delta \leq 2\%$  – критичний стан;
- $\text{tg}\delta \geq 2\%$  – можливість швидкого виникнення теплового пробою ізоляції.

Як вже зазначалося, наведені рівні  $\text{tg}\delta$  були отримані шляхом встановлення суттєвої кореляції між результатами вимірювання електричних ( $\text{tg}\delta$ ) та механічних (число подвійних перегинів до зламу) характеристик ізоляції. При цьому коефіцієнти кореляції склали -0.9733 та -0.98 для фазної та поясної ізоляції [10]. Враховуючи від'ємну кореляцію між зазначеними електричними та механічними характеристиками ізоляції, неважко зробити висновок, що старіння ізоляції силових кабелів супроводжується збільшенням рівня її  $\text{tg}\delta$  із одночасним зменшенням кількості подвійних перегинів. Суттєво також відзначити, що зазначений кореляційний зв'язок був встановлений за низьких рівнів прикладеної напруги, що не призводять до виникнення часткових розрядів в досліджуваному об'єкті контролю. Приймаючи до уваги частотну залежність тангенса кута діелектричних втрат, використання встановлених рівнів  $\text{tg}\delta$  для оцінювання рівня деградації електричної ізоляції є доцільним лише за частоти, за якої була отримана вибірка результатів вимірювань  $\text{tg}\delta$ , для якої були досліджені кореляційні зв'язки з механічними характеристиками ізоляції. Незважаючи на таке обмеження, зазначений підхід до проблеми контролю технічного стану ізоляції силових кабелів, що передбачає вивчення кореляційних зв'язків між електричними та механічними параметрами ізоляції, дозволяє суттєво розширити можливості низьковольтної діелектричної спектроскопії.

При порівнянні високовольтних та низьковольтних випробувань, що проводяться в практиці діелектричної

спектроскопії, варто також відзначити різний вплив рівнів прикладеної напруги на характер часових рядів результатів вимірювань електричної ємності та tgδ. Так, за відносно низького рівня випробувальної напруги (100 В) часові ряди ємності та tgδ залишалися практично незмінними протягом всього експерименту (240 хв) [11]. В той же час, за рівня випробувальної напруги 1 кВ зазначені параметри досліджуваних зразків силових кабелів з початкових значень 20 пФ та 8% зрости до 22 пФ та 10%, що пов'язано із розвитком водних каналів в ізоляції під дією високих напруг.

Розповсюдження в енергосистемах силових кабелів з ізоляцією із зшитого поліетилену стимулювало розвиток досліджень, присвячених старінню поліетиленової ізоляції під дією водних трієнгів. Методи діелектричної спектроскопії широко застосовуються для оцінювання ступеню розвитку водних каналів в поліетиленовій ізоляції силових кабелів. В залежності від ступеню розвитку водних каналів в поліетиленовій ізоляції силових кабелів виділяють наступні типи реакції діелектрика на частоту та збільшення прикладеної напруги [12]:

- LLLP (low loss linear permittivity), що характеризується практично незалежною від частоти прикладеної напруги дійсною компонентою комплексної діелектричної проникності та слабкою частотною залежністю її уявної складової. При цьому обидві складові комплексної діелектричної проникності не демонструють помітної залежності від рівня прикладеної напруги. Зазначений тип реакції є характерним для діелектричного матеріалу без розвинених водних каналів;

- LLLP (low loss linear permittivity), який характеризується залежністю складових комплексної діелектричної проникності від рівня прикладеної напруги. Такий тип реакції є характерним для ізоляції з розвиненими водними каналами, що, проте, не встигли розвинути в усьому об'ємі діелектрика;

- TCL (transition to leakage current), за низьких рівнів прикладеної напруги цей тип реакції є аналогічним до реакції типу LLLP, проте збільшення прикладеної напруги призводить до практично лінійного зменшення уявної складової комплексної діелектричної проникності із зростанням частоти. Такий тип реакції є характерним для зістареної під дією вологи поліетиленової ізоляції із розгалуженими водними трієнгами;

- LC (leakage current), для такого типу реакції діелектричного матеріалу вже за низьких рівнів прикладених напруг в подвійному логарифмічному масштабі характерним є практично лінійне зменшення уявної складової комплексної діелектричної проникності із зростанням частоти прикладеної напруги. Такий тип реакції є характерним для ізоляції із розвиненими на всю товщину водними каналами та, як наслідок, суттєво зменшеною електричною міцністю.

При цьому також суттєво відзначити існування кореляції між типом реакції діелектричного матеріалу та його електричною міцністю [12].

Залежність складових комплексної діелектричної проникності від рівня прикладеної напруги зумовлює спотворення синусоїдального струму через діелектрик

внаслідок появи вищих гармонік. При цьому таке спотворення відбувається за рахунок як парних, так і непарних гармонік і є найбільш явно вираженим саме для кабелів із зістареною ізоляцією (TCL та LC типи реакцій), в той же час для кабелів із відносно не зістареною ізоляцією (LLLП та LLLP типи реакцій) таке спотворення є менш сильним [12]. Зазначена особливість може бути певною перешкодою при діагностиці електричної ізоляції за параметрами ємності та тангенса кута діелектричних втрат, через широке розповсюдження методів та приладів вимірювання імітансу, при розробці яких передбачалась протікання саме синусоїдального струму по досліджуваним об'єктам контролю.

**Зв'язок методів діелектричної спектроскопії в частотній та часовій області.** Вимірювання струму деполіаризації, після застосування перетворення Фур'є, дозволяє визначити частотний спектр tgδ. Таке визначення може бути проведене на основі розрахунку частотного спектру комплексної діелектричної проникності діелектрика [13]:

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{1}{C_0 U_0} \int_0^\infty i_{\text{депол}}(t) \exp(-j\omega t) dt - j \frac{\sigma}{\omega C_0}, \quad (2)$$

де  $\omega$  – кутова частота,  $\varepsilon^*$  – комплексна діелектрична проникність,  $\varepsilon_\infty$  – високочастотна діелектрична проникність матеріалу, що визначається тільки «швидкими» видами поляризації.

**Висновки.** В статті проведено огляд фізичних основ та особливостей застосування методів діагностики ізоляції силових кабелів із застосуванням методів діелектричної спектроскопії в частотній та часовій областях. Показано зв'язок між струмами деполіаризації та частотним спектром комплексної діелектричної проникності. Наведено аналіз факторів, що визначають частотну залежність тангенса кута діелектричних втрат паперової та поліетиленової ізоляції силових кабелів. Перелічені основні типи реакції діелектричних матеріалів із різним рівнем розвитку водних каналів на рівні та частоти прикладеної напруги. За результатами проведеного аналізу показано, що для високовольтних вимірювань одним із факторів, що ускладнюють діагностику ізоляції силових кабелів шляхом аналізу частотних залежностей ємності та тангенса кута діелектричних втрат, є спотворення синусоїдального струму через діелектрик внаслідок нелінійної залежності комплексної діелектричної проникності від рівня прикладеної напруги. Проведено порівняльний аналіз методів діелектричної спектроскопії в частотній області, що передбачають високовольтні та низьковольтні вимірювання комплексної діелектричної проникності. Показано кореляційний зв'язок між тангенсом кута діелектричних втрат паперової ізоляції та її механічними характеристиками.

#### Список літератури

- 1 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/PESS.2000.867630

- 2 Onal, E. A study for examining dissipation factors of various insulations and test transformers in the wide range of frequency. *Elektronika 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)
- 3 Gutten M., Korenciak D., Sebok M. Diagnostics of transformer with insulation oil-paper. *Przeglad Elektrotechniczny*. 2015. No. 8. P. 69-72. doi: [10.15199/48.2015.08.18](https://doi.org/10.15199/48.2015.08.18)
- 4 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)
- 5 Беспрозванных, А.В., Костюков, И.А. Метод вейвлет анализа временных рядов параметров диэлектрической абсорбции электроизоляционных конструкций. *Электротехника и электромеханика*. 2020. № 2. С. 52 – 58. doi: [10.20998/2074-272X.2020.2.08](https://doi.org/10.20998/2074-272X.2020.2.08)
- 6 Беспрозванных, А.В., Костюков, И.А. Характеристики корпусной электроизоляционной системы асинхронных электрических машин на резонансной частоте. *Технічна електродинаміка*. 2019. № 4. С. 48 – 55. doi: [10.15407/techne2019.04.048](https://doi.org/10.15407/techne2019.04.048)
- 7 Fothergill, J., Dodd, S., Nilsson, U., Tong Liu, Dissado, L.A. The measurement of very low conductivity and dielectric loss in XLPE cables. A possible method to detect degradation due to thermal aging. *IEEE Transactions on dielectrics and electrical insulation*. 2011. Vol. 18. No. 5. P. 1544-1553. doi: [10.1109/TDEI.2011.6032823](https://doi.org/10.1109/TDEI.2011.6032823)
- 8 Карпушенко В. П., Щебенюк Л. А., Антоненко Ю. О., Науменко О. А. Силові кабелі низької та середньої напруги. *Конструювання, технологія, якість*. Х.: Region-інформ, 2000. – 376 с.
- 9 Беспрозванных, А.В., Москвитин, Е.С. Число двойных перегибов как индикатор степени старения кабельных бумаг. *Электротехника и электромеханика*. 2011. № 3. С. 62 – 66.
- 10 Беспрозванных, А.В., Москвитин, Е.С. Критерии оценки степени старения силовых кабелей с бумажно-пропитанной изоляцией. *Электротехника и электромеханика*. 2013. № 4. С. 32 – 36.
- 11 Ozaki, T., Ito, N., Nakamura, S., Kawai, J. Changes in capacitance and dielectric dissipation factor of water-treed XLPE with applied voltage. *Electrical engineering in Japan*. 2003. Vol. 144. No. 1. P. 459-462. doi: [10.1002/eej.10160](https://doi.org/10.1002/eej.10160)
- 12 Werelius P. Tharning P., Eriksson R., Holmgren B., Gafvert U. Dielectric spectroscopy for diagnostics of water tree deteriorated XLPE cables. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2001. Vol. 8. No. 1. P. 27-42. doi: [10.1109/94.910423](https://doi.org/10.1109/94.910423)
- 13 Fothergill, J., Dodd, S., Nilsson, U., Tong Liu. Dielectric spectroscopy measurements on very low loss cross-linked polyethylene power cables. *Journal of Physics: Conference Series*. 2009. No. 183. doi: [10.1088/1742-6596/183/1/012002](https://doi.org/10.1088/1742-6596/183/1/012002)
- lectric spectroscopy. *Proc of 2000 Power Engineering Society Summer Meeting*. Seattle, USA, 2000, pp. 1-6 doi: [10.1109/PESS.2000.867630](https://doi.org/10.1109/PESS.2000.867630)
- 2 Onal, E. A study for examining dissipation factors of various insulations and test transformers in the wide range of frequency. *Elektronika 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)
- 3 Gutten M., Korenciak D., Sebok M. Diagnostics of transformer with insulation oil-paper. *Przeglad Elektrotechniczny*. 2015. No. 8. P. 69-72. doi: [10.15199/48.2015.08.18](https://doi.org/10.15199/48.2015.08.18)
- 4 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)
- 5 Besprozvannyh, A.V., Kostjukov, I.A. Metod vejvlet analiza vremennyh rjadov parametrov dijelektricheskoj absorbcii jel-ektroizoljacionnyh konstrukcij. *Elektrotehnika i elektromehani-ka*. 2020. No. 2. P. 52 – 58. doi: [10.20998/2074-272X.2020.2.08](https://doi.org/10.20998/2074-272X.2020.2.08)
- 6 Besprozvannyh, A.V., Kostjukov, I.A. Harakteristiki korpusnoj jel-ektroizoljacionnoj sistemy asinhronnyh jelektricheskikh mashin na rezonansnoj chastote. *Tehnichna elektrodinamika*. 2019. No. 4. P. 48 – 55. doi: [10.15407/techne2019.04.048](https://doi.org/10.15407/techne2019.04.048)
- 7 Fothergill, J., Dodd, S., Nilsson, U., Tong Liu, Dissado, L.A. The measurement of very low conductivity and dielectric loss in XLPE cables. A possible method to detect degradation due to thermal aging. *IEEE Transactions on dielectrics and electrical insulation*. 2011. Vol. 18. No. 5. P. 1544-1553. doi: [10.1109/TDEI.2011.6032823](https://doi.org/10.1109/TDEI.2011.6032823)
- 8 Karpushenko V. P., Shhebenjuk L. A., Antonec' Ju. O., Naumenko O. A. Silovi kabeli niz'koї ta sredn'oi napруги. *Konstrujuvannja, tehnologija, jakist'*. X.: Region-inform, 2000. – 376 P.
- 9 Besprozvannyh, A.V., Moskvitin, E.S. Chislo dvojnnyh peregi- bов kak indikator stepeni starenija kabel'nyh bumag. *Elektrotehnika i elektromehani-ka*. 2011. No. 3. P. 62 – 66.
- 10 Besprozvannyh, A.V., Moskvitin, E.S. Kriterii ocenki stepeni starenija silovyh kabelej s bumazhno-propitannoj izoljaciej. *El-ektrotehnika i elektromehani-ka*. 2013. No. 4. P. 32 – 36.
- 11 Ozaki, T., Ito, N., Nakamura, S., Kawai, J. Changes in capacitance and dielectric dissipation factor of water-treed XLPE with applied voltage. *Electrical engineering in Japan*. 2003. Vol. 144. No. 1. P. 459-462. doi: [10.1002/eej.10160](https://doi.org/10.1002/eej.10160)
- 12 Werelius P. Tharning P., Eriksson R., Holmgren B., Gafvert U. Die- lectric spectroscopy for diagnostics of water tree deteriorated XLPE cables. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2001. Vol. 8. No. 1. P. 27-42. doi: [10.1109/94.910423](https://doi.org/10.1109/94.910423)
- 13 Fothergill, J., Dodd, S., Nilsson, U., Tong Liu. Dielectric spectroscopy measurements on very low loss cross-linked polyethylene power cables. *Journal of Physics: Conference Series*. 2009. No. 183.. doi: [10.1088/1742-6596/183/1/012002](https://doi.org/10.1088/1742-6596/183/1/012002)

## References (transliterated)

- 1 Neimanis, R., Saha, T., Eriksson, R. Determination of moisture content in mass impregnated cable insulation using low frequency die-

Надійшла (received) 09.06.24

## Відомості про авторів / About the authors

**Костюков Іван Олександрович (Kostiukov Ivan)** – доктор технічних наук, завідувач кафедри теоретичних основ електротехніки НТУ «ХПІ» м. Харків; e-mail [jakostiukow@gmail.com](mailto:jakostiukow@gmail.com)

**Борисенко Анатолій Миколайович (Borysenko Anatoliy)** – доктор технічних наук, професор кафедри теоретичних основ електротехніки НТУ «ХПІ» м. Харків;

**Литвиненко Світлана Анатолівна (Lytvynenko Svitlana)** – доктор філософії, доцент кафедри теоретичних основ електротехніки НТУ «ХПІ» м. Харків;

**Льчакова Яна Михайлівна (Lchakova Yana)** – інженер кафедри теоретичних основ електротехніки НТУ «ХПІ» м. Харків;