

## РОЗДІЛЕННЯ АБСОРБЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ В НЕОДНОРІДНІЙ ІЗОЛЯЦІЇ ЗА КРИВИМИ ВІДНОВНОЇ НАПРУГИ СИЛОВИХ ВИСОКОВОЛЬТНИХ КАБЕЛІВ

Г.В. Безпрозваних<sup>\*</sup>, докт.техн.наук, І.О. Костюков<sup>\*\*</sup>, канд.техн.наук, Є.С. Москвітін, канд.техн.наук  
Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут",  
вул. Кирпичова, 2, Харків, 61002, Україна.  
E-mail: [bezprozvannyvch@kpi.kharkov.ua](mailto:bezprozvannyvch@kpi.kharkov.ua), [iakostiukow@gmail.com](mailto:iakostiukow@gmail.com), [moskvitin@kpi.kharkov.ua](mailto:moskvitin@kpi.kharkov.ua)

На підставі запропонованої моделі структурно-неоднорідної двошарової ізоляції у вигляді послідовно-паралельної схеми заміщення з трьома релаксаційними ланцюжками отримано розрахункові криві відновної напруги фазної та поясної паперово-просоченої ізоляції силових кабелів. Виконано верифікацію модельної кривої з експериментальною кривою відновної напруги силового кабелю на напругу 6 кВ. Обґрунтовано можливість розділення уповільнених абсорбційних процесів в неоднорідній ізоляції на основі аналізу високочастотних складових спектру часових залежностей кривих відновної напруги. Підтверджено ефективність застосування вейвлет-перетворення для деталізації абсорбційних характеристик неоднорідної ізоляції силових кабелів. Встановлено наявність двох максимумів та динаміку змінення співвідношення між ними на відтворюваних кривих відновної напруги в процесі старіння неоднорідної ізоляції силових кабелів. Визначено переважні абсорбційні процеси та встановлено критерії для оцінки стану неоднорідної ізоляції силових кабелів на підставі співвідношення між двома амплітудними значеннями відтворюваної відновної напруги. Бібл. 16, рис. 5.

**Ключові слова:** неоднорідна двошарова ізоляція, релаксаційні ланцюжки, відновна напруга, силовий кабель, спектри кривих відновної напруги, вейвлет-перетворення, уповільнені абсорбційні процеси, зволоження ізоляції, теплове старіння, критерії оцінки стану неоднорідної ізоляції.

**Вступ.** Діелектрична діагностика електричної ізоляції високовольтного обладнання останнім часом стає все більш актуальною проблемою у міру підвищення вимог до надійності електроенергетичних систем [1]. Сучасний метод вимірювання відновної напруги розглядається як потенційний інструмент для оцінки старіння та деградації багатошарових електроізоляційних систем з різними діелектричними властивостями, в яких спостерігаються повільні процеси накопичення та релаксації заряду [2–8]. Метод базується на вимірюванні та аналізі часової залежності відновної напруги після нетривалого заряджання постійною напругою, значення якої значно менше робочої, та короткочасного розряджання ємності об'єкта [2–8]. За результатами діагностування можна оцінити стан ізоляції на підставі порівняння результатів кривих відновної напруги з раніше отриманими даними [3, 7, 8].

**Аналіз публікацій та постановка задачі.** Моделювання абсорбційних явищ ґрунтується на двох фізичних моделях неоднорідного діелектрика і відповідних їм еквівалентних схемах Дебая [9].

Перша модель являє діелектрик структурно-неоднорідним, що зводиться до набору складових релаксаційних процесів в ізоляції. Цієї моделі відповідає паралельно-послідовна еквівалентна схема Войта. Друга являє діелектрик просторово неоднорідним, що зводиться до багатошарової моделі ізоляції. Цієї моделі відповідає послідовно-паралельна еквівалентна схема Максвелла.

В [4] представлено еквівалентні схеми для моделювання абсорбційних процесів паперово-просоченої ізоляції силових трансформаторів, які базуються на спрощеній моделі неоднорідного діелектрика у вигляді одного  $RC$ -ланцюга. Аналіз експериментальних кривих відновної напруги дав змогу на підставі застосування еквівалентної схеми Максвелла визначити сталі часу двох компонентів паперово-просоченої ізоляції силових трансформаторів [9]. Динаміка змінення амплітуди відновної напруги та часу її досягнення підтверджують ефективність застосування методу відновної напруги для оцінки зволоженості паперово-просоченої ізоляції силових трансформаторів [10].

В [3] на підставі спрощеної паралельно-послідовної моделі з одним релаксаційним ланцюжком двошарової паперово-просоченої ізоляції отримано криві відновної напруги, які узгоджуються з експериментальними, та визначено три параметри: амплітудне значення відновної напруги, час досягнення та постійну часу саморозряду для оцінки технічного стану силових високовольтних кабелів.

У реальних технічних діелектриках існує цілий спектр постійних часу релаксації, які характеризують протікання абсорбційних процесів та повною мірою визначають стан неоднорідної ізоляції [11]. Інтерпретація результатів діагностики повинна ґрунтуватися не тільки на відповідності інтегральної кривої відновної напруги усталеній формі з характерним найбільшим значенням відновної напруги й відповідним часом досягнення та монотонним зменшенням в часі, яка уособлює абсорбційні процеси неоднорідної ізоляції, а з деталізацією та виявленням уповільнених процесів поляризації в композитній ізоляції.

**Мета** дослідження полягає у розділенні абсорбційних процесів у паперово-просоченій ізоляції на підставі деталізації модельних та експериментальних кривих відновної напруги силових високовольтних кабелів.

**Модельні криві відновної напруги фазної та поясної ізоляції силових кабелів.** Паперово-просочена ізоляція силових кабелів складається з фазної (ізоляція кожної жили) та поясної (ізоляція всіх трьох жил), тобто є двошаровою. Представимо кожний із шарів ізоляції послідовно-паралельною схемою заміщення з трьома релаксаційними ланцюжками (рис. 1, а).

На схемі заміщення (рис. 1, а) позначено:  $C_1, C_2$  – ємності швидких видів поляризації;  $C_{11} - C_{13}, C_{21} - C_{23}$  – ємності уповільнених видів поляризації;  $R_1, R_2$  – опори витоків;  $R_{11} - R_{13}, R_{21} - R_{23}$  – еквівалентні опори, що відображають втрати на розсіювання енергії уповільнених видів поляризації;  $U_c$  – напруга джерела постійної напруги з внутрішнім опором  $R_c$  (зарядний опір);  $R_r$  – розрядний опір;  $R_{pr}$  – внутрішній опір електростатичного вольтметра.

Ємності швидких видів поляризації ( $C_1, C_2$ ) фазної та поясної ізоляції визначаються як частки від заданої ємності  $C$  фази з урахуванням співвідношення між значеннями товщини компонентів (товщина фазної ізоляції в 2 рази вища за товщину поясної ізоляції силових кабелів з паперово-просоченою ізоляцією напруги 6 кВ):  $C_1 = C(1-x)^{-1}$ ,  $C_2 = Cx^{-1}$ , де  $x$  – відносна товщина поясної ізоляції.

За визначених значеннях  $C_1, C_2$  та заданих значеннях часу релаксації  $\theta_1, \theta_2$  шарів ізоляції знаходяться опори витоків кожного з компонентів

$$R_1 = \theta_1 / C_1, \quad R_2 = \theta_2 / C_2. \quad (1)$$

Ємності уповільнених видів поляризації визначаються з (2) за умови заданої частотної залежності тангенса кута діелектричних втрат для своєї, однієї з трьох, характерної частоти  $f$  (для поясної ізоляції в формулі (2) відповідні позначення  $C_2, C_{21}, C_{22}, C_{23}$ )

$$\operatorname{tg} \delta_1 = \frac{C_{11}/C_1}{2\sqrt{1+C_{11}/C_1}}, \quad \operatorname{tg} \delta_2 = \frac{C_{12}/C_1}{2\sqrt{1+C_{12}/C_1}}, \quad \operatorname{tg} \delta_3 = \frac{C_{13}/C_1}{2\sqrt{1+C_{13}/C_1}}. \quad (2)$$

Постійні часу релаксації визначаються на основі знайдених значень ємності уповільнених видів поляризації

$$\theta_{11} = (2\pi f_1)^{-1} \sqrt{1+C_{11}/C_1}, \quad \theta_{12} = (2\pi f_2)^{-1} \sqrt{1+C_{12}/C_1}, \quad \theta_{13} = (2\pi f_3)^{-1} \sqrt{1+C_{13}/C_1}, \quad (3)$$

(для поясної ізоляції в формулі (3) відповідні позначення  $C_2, C_{21}, C_{22}, C_{23}$  та  $\theta_{21}, \theta_{22}, \theta_{23}$ ).

Розрахунок напруги на ділянках заряду (ключ  $K_1$  – замкнуто, ключі  $K_2$  та  $K_3$  – розімкнені), саморозряду (ключ  $K_2$  – замкнуто, ключі  $K_1$  та  $K_3$  – розімкнені) і відновлення напруги (ключ  $K_3$  –

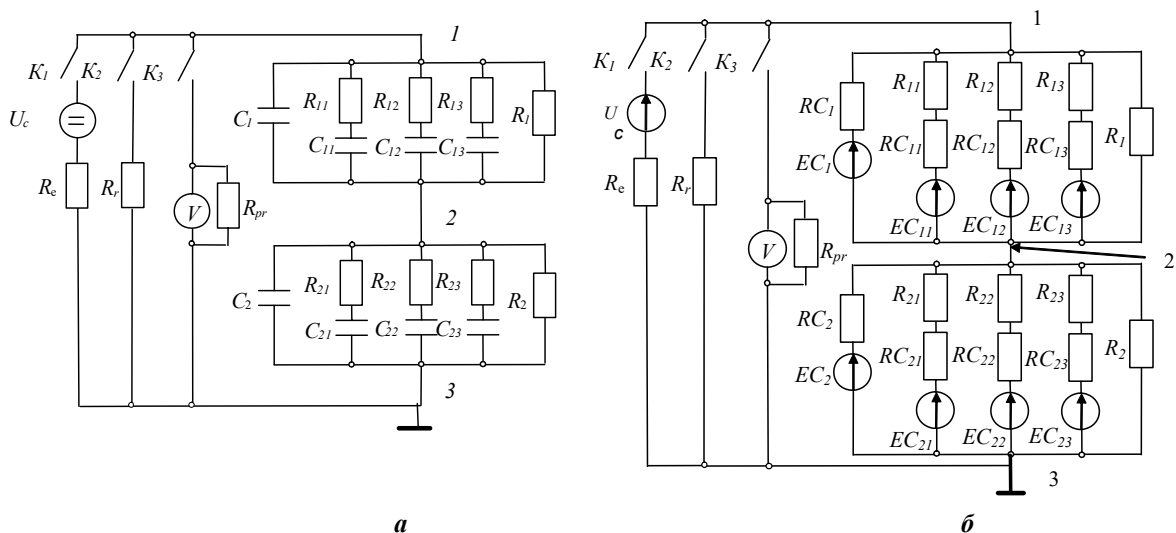


Рис. 1

замкнуто, ключі  $K_1$  та  $K_2$  – розімкнені) виконаємо методом дискретних резистивних схем заміщення та методом вузлових потенціалів за початкових умов: заданих значеннях напруги джерела, напруги на ємностях [3, 12].

На рис. 1, б показано дискретну резистивну схему заміщення двошарової неоднорідної ізоляції у вигляді послідовно-паралельної схеми заміщення з трьома релаксаційними ланцюжками (рис. 1, а). На малий проміжок часу  $h$  кожна ємність  $C$  замінена опором  $R_C = h/C$  і ідеальним джерелом ЕРС  $EC$ , який спрямований проти струму  $i$  в якому «запам'ятовується» напруга на ємності в попередній момент часу. На схемі позначено:  $EC_1, RC_1, EC_{11} - EC_{13}, RC_{11} - RC_{13}$  – ідеальні джерела ЕРС і опори, якими замінено на короткий час  $h$  ємності  $C_1$  та  $C_{11} - C_{13}$ . Для другого шару ізоляції позначення елементів схеми заміщення ідентичні.

Розрахунок базується на визначенні потенціалів  $\varphi_1, \varphi_2$  вузлів 1 та 2 за нульового потенціалу вузла 3 на підставі рішення системи лінійних алгебраїчних рівнянь другого порядку

$$\begin{pmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} J_1 \\ J_2 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

де  $G_{11} = \frac{1}{R_e} + \frac{1}{RC_1} + \frac{1}{R_{11} + RC_{11}} + \frac{1}{R_{12} + RC_{12}} + \frac{1}{R_{13} + RC_{13}} + \frac{1}{R_1}$  – вузлова провідність першого вузла;

$G_{22} = \frac{1}{RC_1} + \frac{1}{R_{11} + RC_{11}} + \frac{1}{R_{12} + RC_{12}} + \frac{1}{R_{13} + RC_{13}} + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{RC_2} + \frac{1}{R_{21} + RC_{21}} + \frac{1}{R_{22} + RC_{22}} + \frac{1}{R_{23} + RC_{23}} + \frac{1}{R_2}$  – вузлова провідність

другого вузла;  $G_{12} = -\left(\frac{1}{RC_1} + \frac{1}{R_{11} + RC_{11}} + \frac{1}{R_{12} + RC_{12}} + \frac{1}{R_{13} + RC_{13}} + \frac{1}{R_1}\right)$  – взаємна провідність між першим та

другим вузлами;  $G_{12} = G_{21}$ ;  $J_1 = \frac{U_c}{R_e} + \frac{EC_1}{RC_1} + \frac{EC_{11}}{R_{11} + RC_{11}} + \frac{EC_{12}}{R_{12} + RC_{12}} + \frac{EC_{13}}{R_{13} + RC_{13}}$  – вузловий струм першого

вузла;  $J_2 = \frac{EC_2}{RC_2} + \frac{EC_{21}}{R_{21} + RC_{21}} + \frac{EC_{22}}{R_{22} + RC_{22}} + \frac{EC_{23}}{R_{23} + RC_{23}} - \frac{EC_1}{RC_1} - \frac{EC_{11}}{R_{11} + RC_{11}} - \frac{EC_{12}}{R_{12} + RC_{12}} - \frac{EC_{13}}{R_{13} + RC_{13}}$  – вузловий струм

другого вузла.

Струм у гілках та напруги на ємностях за знайдених потенціалах вузлів визначаються відповідно

$$i_{11} = (\varphi_1 - \varphi_2 - EC_{11}) / (R_{11} + RC_{11}), \quad i_{12} = (\varphi_1 - \varphi_2 - EC_{12}) / (R_{12} + RC_{12}),$$

$$i_{13} = (\varphi_1 - \varphi_2 - EC_{13}) / (R_{13} + RC_{13}),$$

$$i_{21} = (\varphi_2 - EC_{21}) / (R_{21} + RC_{21}), \quad i_{22} = (\varphi_2 - EC_{22}) / (R_{22} + RC_{22}), \quad i_{23} = (\varphi_2 - EC_{23}) / (R_{23} + RC_{23}), \quad (5)$$

$$UC_1 = \varphi_1 - \varphi_2, \quad UC_{11} = i_{11} \cdot RC_{11} + EC_{11}, \quad UC_{12} = i_{12} \cdot RC_{12} + EC_{12}, \quad UC_{13} = i_{13} \cdot RC_{13} + EC_{13},$$

$$UC_2 = \varphi_2, \quad UC_{21} = i_{21} \cdot RC_{21} + EC_{21}, \quad UC_{22} = i_{22} \cdot RC_{22} + EC_{22}, \quad UC_{23} = i_{23} \cdot RC_{23} + EC_{23}. \quad (6)$$

Циклічне застосування (5) та (6) за заданих параметрах об'єкту діагностики: ємності  $C$  кабелю (фази), часу релаксації  $\theta_1, \theta_2$  швидких видів поляризації фазної й поясної ізоляції та залежності від частоти тангенса кута діелектричних втрат кабелю, необхідної задля визначення ємності уповільнених видів поляризації, дає змогу на кожному кроці часу  $h$  визначати стан схеми на рис. 1, а.

Розрахункові криві відновної напруги  $U_r$ , приведені до напруги заряджання  $U_c$ , неоднорідної двошарової ізоляції, ємність якої становить  $C_f = 1$  нФ, наведено на рис. 2 (крива 1) – рис. 3, а. Значення тангенса кута діелектричних втрат дорівнюють  $tg\delta=0,075$  для частоти  $f_1=0,1$  Гц,  $tg\delta=0,0125$  – для  $f_2=1$  Гц та  $tg\delta=0,05$  – для  $f_3=100$  Гц відповідно. Параметри схеми діагностики наступні:  $U_c = 500$  В;  $R_e = 10^9$  Ом; час заряджання 60 с; час розряджання 2 с; час спостереження за відновною напругою 1000 с;  $R_r = 24000$  Ом;  $R_{pr} = 10^{16}$  Ом.

На рис. 2 (крива 2) та рис. 3, б показано експериментальні залежності кривої відновної напруги  $U_r$  фази А відносно двох інших та металеві оболонки силового кабелю з паперово-просоченою ізоляцією на напругу 6 кВ, який знаходився в експлуатації 20 років.

На рис. 3 показано спектральні функції  $S(f)$  модельних (рис. 3, а, нижній рисунок) та експериментальних (рис. 3, б, нижній рисунок) часових залежностей відновної напруги.

Параметри двошарової ізоляції (фазної та поясної) еквівалентної схеми (рис. 1) для моделювання абсорбційних процесів обрано таким чином, що відповідають зістареній ізоляції,

причому в більшій мірі – поясній: стала часу  $\theta_2$  в 7 разів менша за  $\theta_1$ . У цьому випадку в неоднорідній ізоляції повинен спостерігатися не один домінуючий механізм повільної поляризації, а два.

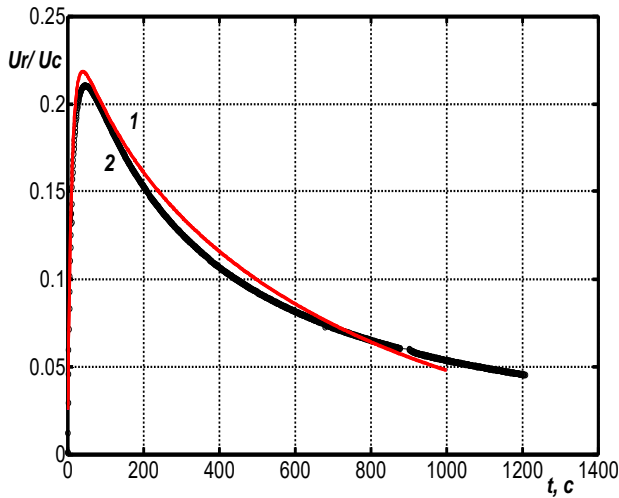


Рис. 2

оболонки, крива 2 – для фази  $A$  відносно двох інших та металевої оболонки, крива 3 – для трьох фаз разом відносно металевої оболонки, крива 4 – для фази  $B$  відносно двох інших та металевої оболонки.

Виявляється, що саме у височастотній області спектральні характеристики кривих відновної напруги (рис. 4, б) в більшій мірі відрізняються одна від одної, ніж в часовій (рис. 4, а). Аналіз спектрів часових залежностей кривих відновної напруги надає додаткову інформацію щодо абсорбційних процесів, що дає змогу підвищити точність оцінки технічного стану неоднорідної ізоляції в процесі експлуатації.

Під час вимірювань можлива стрибкоподібна зміна відновної напруги (рис. 4. а), яка

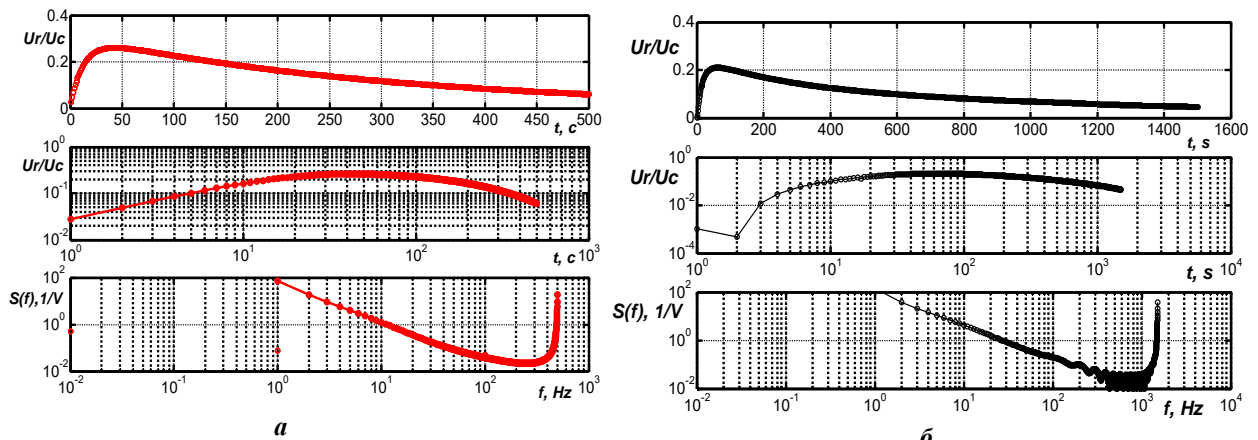


Рис. 3

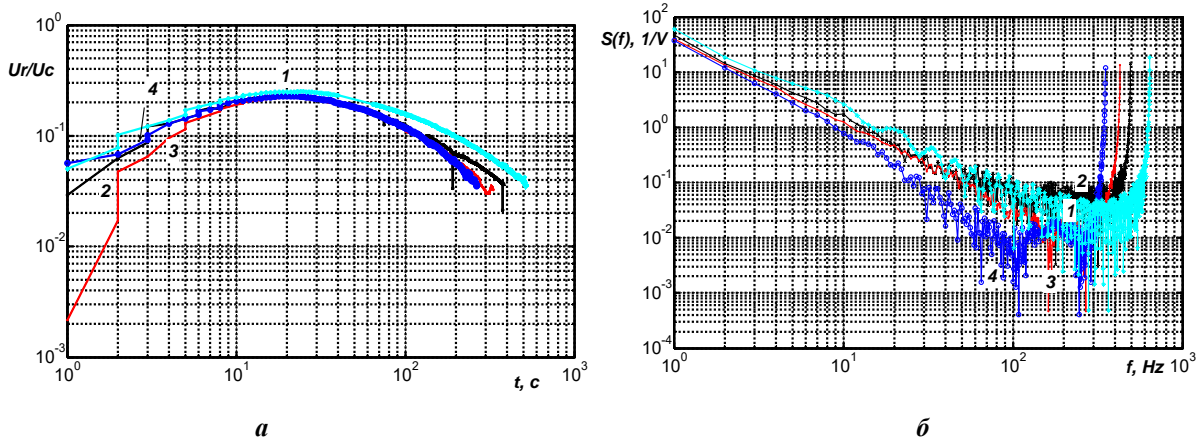


Рис. 4

На кривих відновної напруги слід очікувати, принаймні, два пікові значення відновної напруги з двома характерними значеннями часу.

**Деталізація та виявлення індивідуальних абсорбційних характеристик неоднорідної ізоляції силових кабелів.** Спектри модельних (рис. 3, а, нижній рисунок) та експериментальних (рис. 3, б, нижній рисунок) часових залежностей відновної напруги мають складові з частотою до 1 кГц, що дає змогу отримати інформацію щодо абсорбційних процесів в області часу  $10^{-3}$  с. Такі значення часу притаманні дипольній поляризації, пов'язаної з релаксацією води в неоднорідній ізоляції.

На рис. 4, а показано експериментальні криві відновної напруги трижильного силового кабелю з паперово-просоченою ізоляцією: крива 1 – для фази  $C$  відносно двох інших та металевої

пов'язана з високою чутливістю електростатичного вольтметра до зовнішніх електромагнітних завад. Це обумовлює низьку апроксимацію кривої відновної напруги тригонометричними функціями у разі застосування швидкого перетворення Фур'є [13-14]. У такому випадку більш привабливим математичним апаратом є застосування вейвлет-перетворення задля апроксимації та деталізації [15-16] кривих відновної напруги.

На рис. 5 показано оброблені із застосуванням вейвлета Добеши 12 порядку з 4-рівневим розкладанням модельні та експериментальні абсорбційні характеристики силових високовольтних кабелів, який забезпечує високий ступінь деталізації відновної напруги паперово-просоченої ізоляції в області малих значень часу.

Крива 1 на рис. 5, а відповідає модельній залежності кривої відновної напруги на рис. 2, крива 2 – експериментальній. Без деталізації (порівняйте криві 1 та 2, рис. 2) криві відновної напруги тотожні. Спостерігається маскування поляризаційних ефектів, які перекривають один одне, що ускладнює інтерпретацію результатів діагностики за відновною напругою. Відтворена за допомогою вейвлет-перетворення модельна крива відновної напруги має більше значення амплітуди: ізоляція зістарена в більшій мірі. Вейвлет-перетворення забезпечує розділення абсорбційних ефектів: на залежностях спостерігаються два значення часу  $t$  з характерними максимумами відновної напруги, які опосередковано свідчать про два механізми уповільненої поляризації в фазній та пояській неоднорідній паперово-просоченій ізоляції силових кабелів. Співвідношення між двома максимальними значеннями відновної напруги становлять: для модельної кривої – 1,07; для експериментальної – 1,05. При цьому в першому випадку домінують абсорбційні процеси, обумовлені більш швидкою релаксацією зарядів, найбільший час встановлення яких дорівнює  $t_1=28$  с. В другому задля відтворених експериментальних кривих навпаки: в більшій мірі – повільнішими процесами поляризації, найбільший час встановлення яких становить  $t_2=45$  с.

#### Критерії для визначення домінуючих абсорбційних процесів в неоднорідній ізоляції.

Ступінь деталізації особливо важлива для аналізу динаміки змінення кривих відновної напруги силових кабелів, які тривалий час знаходяться в експлуатації (рис. 5, б): криві 1 та 1' відповідають результатам діагностики фази А відносно двох інших та алюмінієвої оболонки силового кабелю напруги 6 кВ після 20 років експлуатації.

Після додаткового теплового старіння зразка кабелю спостерігається сушка ізоляції, що призводить до зменшення відновної напруги (порівняйте криві 1 та 1', 2 та 2' на рис. 5, б) та зміщенням двох максимумів відновної напруги в область більших значень (порівняйте криві 2 та 2'). Амплітудні значення відновної напруги змінюються в 1,25 та 1,50 рази для меншого та більшого значень часу відповідно. Без деталізації після додаткового теплового старіння амплітуда зменшується в 1,44 рази. Причому час досягнення максимального значення після додаткового теплового старіння зміщується в область менших значень, що є підтвердженням безпосередньо теплового старіння паперово-просоченої ізоляції.

Сама форма відтвореної кривої відновної напруги з характерними двома максимумами та їхнім співвідношенням дає можливість визначити домінуючі процеси в неоднорідній ізоляції. Для зволоженої неоднорідної ізоляції силових кабелів притаманні криві 2 на рис. 5, а та рис. 5, б. Для зістареної в процесі теплового старіння – крива 1 (модельна) на рис. 5, а та крива 2' на рис. 5, б.

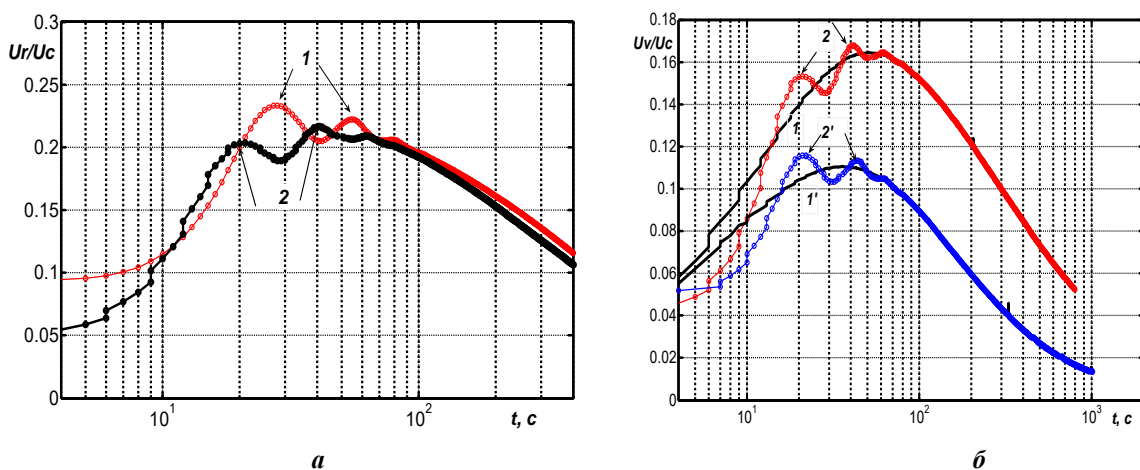


Рис. 5

Критерієм зволоженості паперово-просоченої ізоляції можна вважати виконання співвідношення  $K_1 < K_2$ , теплового старіння –  $K_1 > K_2$ , де  $K_1 = (U_r / U_c)_{t_1}$ ,  $K_2 = (U_r / U_c)_{t_2}$  – відносні значення відновної напруги  $U_r$  до напруги заряджання  $U_c$  в моменти часу  $t_1$  та  $t_2$  відповідно.

**Висновки.** 1. Часові залежності розрахункових кривих відновної напруги фазної та поясної паперово-просоченої ізоляції, представлені послідовно-паралельною схемою заміщення з трьома релаксаційними ланцюжками, в повній мірі відтворюють експериментальні, що підтверджує адекватність запропонованої математичної моделі двошарової неоднорідної ізоляції силових кабелів

2. Спектри часових залежностей модельної та експериментальної кривих відновної напруги займають діапазон частоти до 1 кГц, що дає змогу аналізувати уповільнені абсорбційні процеси в неоднорідній ізоляції.

3. Доведено ефективність вейвлет-перетворення для деталізації та виявлення індивідуальних абсорбційних характеристик неоднорідної ізоляції силових кабелів. На відтворюваних модельній та експериментальних кривих відновної напруги спостерігаються два характерних максимуми, кожному з котрих відповідає свій час встановлення.

4. Встановлено характер змінення та визначено співвідношення між амплітудними значеннями відтвореної відновної напруги в початковому стані та додатковому тепловому старінні силових кабелів з паперово-просоченою ізоляцією.

5. Запропоновані критерії дають змогу визначити домінуючі абсорбційні процеси зволоження та, власне, теплового старіння неоднорідної ізоляції, що підвищує достовірність оцінки технічного стану силових кабелів за результатами діелектричних обстежень.

6. Процедура обробки експериментальних кривих відновної напруги за допомогою вейвлет-перетворення з деталізацією абсорбційних процесів в неоднорідній ізоляції може бути застосована для силових кабелів зі шитою поліетиленовою ізоляцією, силових трансформаторів, високовольтних вводів.

*Роботу виконано за держбюджетною темою «Розробка теоретичних засад визначення технічного стану твердої ізоляції».*

1. Норми випробування електрообладнання. СОУ-Н ЕЕ 20.302:2007 (нова редакція 2020 р.). Київ, 2020, 262 с.
2. Stone G.C., Sasic M. Experience with DC polarization–depolarization measurements on stator winding insulation. *Electrical Insulation Conference (EIC)*. Ottawa, Canada, June 2-5, 2013. Pp. 7-10. DOI: <https://doi.org/10.1109/EIC.2013.6554191>
3. Беспрозванных А.В. Физическая интерпретация кривых восстанавливающегося напряжения на основе схем замещения неоднородного диэлектрика. *Технічна електродинаміка*. 2009. № 6. С.23-27.
4. Filipoviü-Grpiü Božidar, Filipoviü-Grpiü Dalibor, Uglešü Ivo Modeling of polarization in oil-paper insulation using recovery voltage measurements. *International Review of Electrical Engineering (I.R.E.E.)*. 2011. Vol. 6. No.1. Pp. 430–437.
5. Gavrilă Doina Elena, Ciprian Ilies, Horia Gavrilă. Applying the recovery voltage method (RVM) to study the degradation of high power transformer insulation. *Advanced Materials Research*. 2014. No 911. Pp. 260-265. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.911.260>
6. Csepes G., Hamos I., Brooks I., Karius V. Practical foundations of the RVM (Recovery Voltage Method for oil/paper insulation diagnosis. Conference on *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, (CEIDP), Atlanta, GA, USA, October 25-28, 1998. Vol. 1. Pp. 345-355. DOI: <https://doi.org/10.1109/CEIDP.1998.734015>
7. Patsch R. Return voltage measurements – A promising tool for the diagnosis of the insulation condition of power transformers. *IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*, Athens, Greece, 2018. Pp. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICHVE.2018.8642077>
8. Patsch R. Dielectric diagnostics of power transformers and cables – return voltage measurements, theory and practical results. *VDE High Voltage Technique Symposium (ETG)*, Neubiberg, Germany, November 11-14, 2018. Pp. 1–6.
9. Martínez M., Pleite J. Improvement of RVM test interpretation using a Debye equivalent circuit. *International Advanced Research Workshop on transformers (ARWtr2019)*, Cordoba, Spain, October 7-9, 2019. P. 13. DOI: <https://doi.org/10.23919/ARWtr.2019.8930187>.
10. Saha T. K., Purkait P., Müller F. Deriving an equivalent circuit of transformers Insulation for understanding the dielectric response measurements. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2005. Vol. 20. No 1. Pp. 149 – 157. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2004.835436>.
11. Беспрозванных А.В., Кессаев А.Г., Щерба М.А. Частотная зависимость тангенса угла диэлектрических потерь от степени увлажнения полиэтиленовой изоляции кабелей. *Технічна електродинаміка*. 2016. № 3. С. 18-24. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.03.018>.
12. Беспрозванных А.В., Набока Б.Г. Математические модели и методы расчета электроизоляционных конструкций: Навчальний посібник. Х.: НТУ ХПІ, 2012. 108 с.
13. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов: учеб. пособие. СПб.: БХВ-Петербург, 2011. 768 с.

14. Беспрозванных А.В., Костюков И.А. Погрешность контроля электроизоляционных конструкций по параметрам диэлектрической абсорбции в соответствии с концепцией неопределенности измерений. *Електротехніка і Електромеханіка*. 2020. № 1. С. 47-51. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2020.1.07>
15. Малла С. Вэйвлеты в обработке сигналов. М.: Мир, 2005. 671 с.
16. Беспрозванных А.В., Костюков И.А. Метод вейвлет-анализа временных рядов параметров диэлектрической абсорбции электроизоляционных конструкций. *Електротехніка і Електромеханіка*. 2020. № 2. С. 52-58. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2020.2.08>

## DIFFERENTIATION OF ABSORPTION PROCESSES IN INHOMOGENEOUS INSULATION BY CURVE OF RECOVERING VOLTAGE OF POWER HIGH VOLTAGE CABLES

G.V. Bezprozvannykh, I.A. Kostukov, E.S. Moskvitin

<sup>1</sup> National Technical University “Kharkov Polytechnic institute”

Str. Kirpichova 2, Kharkiv, 61002, Ukraine.

E-mail: [bezprozvannykh@kpi.kharkov.ua](mailto:bezprozvannykh@kpi.kharkov.ua), [iakostiukow@gmail.com](mailto:iakostiukow@gmail.com), [moskvitin@kpi.kharkov.ua](mailto:moskvitin@kpi.kharkov.ua)

Based on the proposed model of spatially inhomogeneous two-layer insulation in the form of a series-parallel substitution scheme with three relaxation chains, the calculated recovery voltage curves of phase and belt paper-impregnated insulation of power cables are obtained. The model was verified by comparison with the experimental voltage curve of the power cable with paper-impregnated insulation at a voltage of 6 kV. The possibility of separation of delayed absorption processes in inhomogeneous insulation is substantiated on the basis of the analysis of high-frequency components of the spectrum of time dependences of the recovery voltage curves. The effectiveness of wavelet transform for detailing the absorption characteristics of inhomogeneous insulation of power cables is confirmed. The presence of two maxima and the dynamics of change of the ratio between them in the process of aging of inhomogeneous insulation on the reproducible curves of the regenerative voltage of power cables are established. Based on the relationship between the two amplitude values of the reproducible reduction voltage, the preferred absorption processes are determined and the appropriate criteria for assessing the state of inhomogeneous insulation of power cables are established. References 16, figure 5.

**Key words:** inhomogeneous two-layer insulation, relaxation circuits, recovery voltage, power cable, spectra of recovery voltage curves, wavelet transform, delayed absorption processes, insulation humidification, thermal aging, criteria for assessing the state of inhomogeneous insulation.

- Standards for testing electrical equipment. SOU-N EE 20.302: 2007 (new version 2020). Kyiv, 262 p. (Ukr)
- Stone G.C., Sasic M. Experience with DC polarization–depolarization measurements on stator winding insulation. *Electrical Insulation Conference (EIC)*. Ottawa, Canada, June 2-5, 2013. Pp. 7-10. DOI: <https://doi.org/10.1109/EIC.2013.6554191>
- Bezprozvannykh G.V. Physical interpretation of recovering voltage curves based on inhomogeneous dielectric substitution schemes. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2009. No 6. Pp. 23-27. (Rus)
- Filipoviü-Grpiü Božidar, Filipoviü-Grpiü Dalibor, Uglešü Ivo Modeling of polarization in oil-paper insulation using recovery voltage measurements. *International Review of Electrical Engineering (I.R.E.E.)*. 2011. Vol. 6. No 1. Pp. 430-437.
- Gavrila Doina Elena, Ciprian Ilies, Horia Gavrila. Applying the recovery voltage method (RVM) to study the degradation of high power transformer insulation. *Advanced Materials Research*. 2014. No 911. Pp. 260-265. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.911.260>
- Csepes G., Hamos I., Brooks I., Karius V. Practical foundations of the RVM (Recovery Voltage Method for oil/paper insulation diagnosis. Conference on *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, (CEIDP), Atlanta, GA, USA, October 25-28, 1998. Vol. 1. Pp. 345-355. DOI: <https://doi.org/10.1109/CEIDP.1998.734015>
- Patsch, R. Return voltage measurements – A promising tool for the diagnosis of the insulation condition of power transformers. *IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*, Athens, Greece, 2018. Pp. 1-4.
- Patsch R. Dielectric diagnostics of power transformers and cables – return voltage measurements, theory and practical results. *VDE High Voltage Technique Symposium (ETG)*, Neubiberg, Germany, November 11-14, 2018. Pp. 1-6.
- Martínez M., Pleite J. Improvement of RVM test interpretation using a Debye equivalent circuit. *International Advanced Research Workshop on transformers (ARWtr2019)*, Cordoba, Spain, October 7-9, 2019. P. 13.
- Saha T.K., Purkait P., Müller F. Deriving an equivalent circuit of transformers Insulation for understanding the dielectric response measurements. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2005. Vol. 20. No 1. Pp. 149-157.
- Bezprozvannykh A.V., Kessaev A.G., Shcherba M.A. Frequency dependence of dielectric loss tangent on the degree of humidification of polyethylene cable insulation. *Technical Electrodynamics*. 2016. No 3. Pp. 18-24. (Rus).
- Bezprozvannykh G.V., Naboka B.G. Mathematical models and methods of calculation of electrical designs: Navchalniy posibnik. Kharkiv: NTU KhPI, 2012. 108 p. (Rus)
- Sergienko A.B. Digital signal processing: textbook. Saint Peterburg: BHV-Petersburg, 2011. 768 p. (Rus).
- Bezprozvannykh G.V., Kostyukov I.A. Precision of control of electrical insulation constructions according to the conception of uncertainty of measurement of dielectric absorption parameters. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2020. No 1. Pp. 47-51. (Rus). DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2020.1.07>
- Malla S. Wavelets in Signal Processing. Moskva: Mir, 2005. 671 p. (Rus).
- Bezprozvannykh G. V., Kostyukov I.A. Method of wavelet analysis of time series of parameters of dielectric absorption of electoinsulation construction. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2020. No 2. Pp. 52-58. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2020.2.08> (Rus).

Надійшла 22.06.2021