

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

ФОЩІЙ МАРІЯ ДМИТРІВНА – старший викладач кафедри менеджменту, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1555-3110>; e-mail: Marina.Foshchii@khp.edu.ua.

СИЗОВ ЄВГЕНІЙ ВІКТОРОВИЧ – аспірант кафедри теоретичних основ електротехніки, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; e-mail: sizovevgeniy94@gmail.com.

СПОСОБИ ФОРМУВАННЯ СИСТЕМ РІВНЯНЬ ПРИ ВИЗНАЧЕННІ ПАРАМЕТРІВ ДІЕЛЕКТРИЧНОЇ АБСОРБЦІЇ ІЗОЛЯЦІЇ ТРИЖИЛЬНИХ СИЛОВИХ КАБЕЛІВ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ СУКУПНИХ ВИМІРЮВАНЬ

Стаття присвячена огляду способів формування систем рівнянь при визначенні часткових ємностей та індивідуальних значень тангенса кута діелектричних втрат шарів ізоляції трижильних силових кабелів з паперовою імпрегнованою ізоляцією в спільній металевій оболонці. Наведено способи з'єднання металевих елементів конструкції силового кабелю при вимірюванні сукупних значень ємності та тангенса кута діелектричних втрат, що використовуються при формуванні систем рівнянь. Проведено аналітичний огляд найбільш поширених методів контролю, що використовуються при оцінюванні ступеню старіння паперової ізоляції трижильних силових кабелів. Наведено порівняльний аналіз основних особливостей методів визначення індивідуальних значень електричної ємності та тангенса кута діелектричних втрат із застосуванням прямих та сукупних вимірювань. Показано, що із врахуванням необхідності проведення контролю в широкому частотному діапазоні, зменшується ефективність застосування існуючих способів усунення впливу паразитних ємностей на результати вимірювань. При застосуванні автокомпенсаційних перетворювачів імпедансу в напругу таке зменшення пов'язано із зниженням коефіцієнта підсилення операційного підсилювача а у випадку застосування вимірювачів імітансу з трьома клемми з виникненням резонансних явищ в об'єкті контролю внаслідок збільшення його паразитної індуктивності через застосування додаткової клемми вимірювача імітансу. Запропоновано спосіб оцінювання індивідуальних значень тангенса кута діелектричних втрат із застосуванням сукупних вимірювань, що полягає у вимірюванні провідності ізоляційних проміжків, що, після попереднього визначення часткових ємностей ізоляції, дозволяє визначити її тангенс кута діелектричних втрат шляхом застосування відповідного виразу для неідеального конденсатора з діелектричними втратами.

Ключові слова: діагностика ізоляції; діелектричні втрати; атомні станції; вимірювання імпедансу; метод найменших квадратів.

Вступ. Трижильні силові кабелі з паперовою імпрегнованою ізоляцією в спільній металевій оболонці знаходять широке застосування в енергомережах України. Конструктивно такі силові кабелі мають фазну та поясну ізоляцію та виготовляються з сегментними жилами, що дозволяє забезпечити суттєву економію матеріалів та високу компактність конструкції, проте обмежує можливість їх застосування в кабельних лініях передачі електричної енергії вище за 10 кВ. Таке обмеження зумовлене виникненням тангенціальної складової напруженості електричного поля, що призводить до прискореного старіння паперової ізоляції [1]. Значна кількість силових кабелів зазначеного типу використовується в енергомережах із суттєвим перевищенням встановленого терміну експлуатації. Так, в експлуатації все ще можуть знаходитись силові кабелі з напрацюванням від 25 до 59 років [2]. В той же час, повна заміна кабелів із перевищенням терміном напрацювання на відповідні аналоги з не зістареною під дією експлантаційних факторів ізоляцією є суттєво ускладненою та пов'язана із значними економічними витратами. Зазначена обставина визначає актуальність вирішення задачі забезпечення контролю технічного стану ізоляції трижильних силових кабелів в спільній металевій оболонці. Ця задача також є важливою при оцінюванні ступеню старіння силових кабелів, що забезпечують електропостачання систем охолодження реакторів атомних електростанцій. При цьому,

необхідність забезпечення контролю технічного стану силових кабелів на атомних електростанціях набуває особливої актуальності із врахуванням тенденції до збільшення терміну експлуатації енергоблоків на строк до 60–80 років [3], що визначає додаткове навантаження на ізоляцію силових кабелів.

На практиці в більшості випадків контроль технічного стану силових кабелів проводять із застосуванням методів електричних вимірювань, що дозволяють визначити залежні від ступеню старіння електрофізичні параметри ізоляції. При застосуванні абсорбційних методів контролю в якості таких параметрів досить часто використовуються індекс поляризації та коефіцієнт абсорбції. Зазначені коефіцієнти дозволяють визначити ступінь зволоження ізоляції та фактично представляють собою коефіцієнти, що характеризують швидкість зміни опору діелектрика після моменту прикладання постійної випробувальної напруги. Такі параметри ізоляції можуть бути виміряні із застосуванням сучасних цифрових мегомметрів (таких як UNI-T UT513C). Досить розповсюдженим на практиці також є метод відновлюваної напруги. Цей метод також належить до групи абсорбційних методів та полягає в тривалому заряді електричної ємності досліджуваного об'єкта контролю від джерела постійної напруги з наступним її короткочасним розрядом, після якого проводять вимірювання напруги, що відновлюється на електродах об'єкта контролю. В такому випадку в

© І. О. Костюков, М. Д. Фошій, Є. В. Сизов, 2025



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

якості чутливих до ступеню старіння ізоляції критеріїв найчастіше використовують відношення зарядної напруги до максимального значення відновлюваної напруги а також час, за якого відновлювана напруга приймає максимальне значення. Встановлено, що старіння ізоляції супроводжується зменшенням часу, за якого відновлювана напруга досягає свого максимального значення, при цьому відношення зарядної напруги до максимального значення відновлюваної спочатку збільшується а потім – зменшується [4]. Крім перелічених абсорбційних методів контролю на практиці часто застосовуються класичні методи контролю, що полягають у вимірюванні електричної ємності та тангенса кута діелектричних втрат ($\tan\delta$) ізоляції. Зазначені параметри широко використовуються в практиці діелектричної спектроскопії при дослідженні процесів поляризації та електропровідності в діелектриках. Спостереження за залежністю $\tan\delta$ від рівня прикладеної до діелектрика напруги є широко відомим непрямим методом оцінювання наявності часткових розрядів в ізоляції. Електрична ємність та $\tan\delta$ також є досить чутливими до ступеню зволоження ізоляції. Крім того, встановлено, що $\tan\delta$ демонструє з механічними характеристиками паперової ізоляції. При дослідженнях на частоті 100 кГц також встановлена кореляція між рівнем $\tan\delta$ та відносною видовженням при розриві для етилен-пропіленової гумової ізоляції.

Трижильні силові кабелі з паперовою імпрегнованою ізоляцією містять 6 ізоляційних проміжків, з яких 3 утворені шарами ізоляції між жилами силового кабелю а 3 інші – шарами ізоляції між його жилами та оболонкою. При контролі ізоляції таких кабелів необхідним є визначення індивідуальних параметрів діелектрика між металевими елементами конструкції. Доцільність таких вимірювань викликана необхідністю виявлення саме локальних ділянок застареної ізоляції, оскільки при вимірюваннях її сукупних параметрів ділянки діелектрика з відносно задовільними діелектричними властивостями здатні приховувати старіння ділянок ізоляції із явними ознаками деградації. Таким чином, при контролі ізоляції трижильних силових кабелів за параметрами електричної ємності та $\tan\delta$ виникає задача визначення індивідуальних параметрів кожного з шарів діелектрика між металевими елементами конструкції. На практиці різниця між індивідуальними значеннями ємності та $\tan\delta$ може бути зумовлена як експлуатаційними факторами (наприклад, нерівномірне навантаження фаз внаслідок асиметрії), так і недосконалою технологією виробництва.

Задача визначення індивідуальних значень електричної ємності та $\tan\delta$ шарів ізоляції між металевими елементами конструкції в трижильних силових кабелях може бути вирішена із застосуванням прямих, або сукупних вимірювань. Враховуючи наявність в конструкції кабелю декількох металевих елементів, та відповідне існування багатьох паразитних ємнісних зв'язків досліджуваного шару ізоляції, при застосуванні прямих вимірювань необхідне використання вимірювачів імітансу, що

здатні забезпечити повне усунення небажаного впливу паразитних ємностей на результати контролю. Конструктивно такі вимірювачі імітансу повинні давати можливість забезпечувати трьохзажимне підключення досліджуваного зразка силового кабелю. В цьому випадку дві клема використовуються для подачі випробувальної напруги а третя клема – для відведення паразитних ємнісних струмів. Інший спосіб усунення паразитних ємностей полягає в застосуванні вимірювачів імітансу на основі автокомпенсаційних перетворювачів, що досить часто використовуються в практиці вимірювання біоімпедансу. Такі перетворювачі представляють собою інвертуючий підсилювач, що завдяки можливості підтримувати близьку до нуля різницю потенціалів на своїх інвертуючому та неінвертуючому входах дозволяє практично усунути вплив паразитних ємностей на результати вимірювання електричної ємності та $\tan\delta$. В той же час, враховуючи необхідність проведення вимірювань в широкому частотному діапазоні, застосування таких конструктивних рішень вимагає врахування можливого впливу частоти на їх ефективність. Так, застосування третьої клема вимірювача імітансу збільшує паразитну індуктивність схеми вимірювання, що, особливо при вимірюваннях відносно великих ємностей об'єкта контролю, змушує враховувати можливість впливу резонансних явищ на результати вимірювань. В той же час, збільшення частоти супроводжується зменшенням коефіцієнта підсилення операційного підсилювача, використаного при побудові автокомпенсаційного перетворювача, що зменшує його здатність забезпечувати усунення впливу паразитної ємності на результати контролю.

При визначенні індивідуальних параметрів шарів ізоляції між металевими елементами конструкції в трижильних силових кабелях альтернативою застосуванню прямих вимірювань є сукупні вимірювання [5, 6]. В цьому випадку можливе застосування вимірювачів імітансу із 2 клемми. Невідомі параметри ізоляції визначають шляхом вирішення систем рівнянь з правою частиною, яка містить результати сукупних вимірювань електричної ємності та $\tan\delta$, що визначені за різних способів з'єднання металевих елементів конструкції кабелю. При цьому коефіцієнти системи рівнянь визначають відсутність, чи наявність внеску того чи іншого шару ізоляції в результат сукупного вимірювання ємності та $\tan\delta$. З метою уникнення небажаного впливу можливих похибок вимірювання сукупних величин на результати розрахунку індивідуальних значень ємності та $\tan\delta$ замість безпосереднього вирішення системи рівнянь доцільним є мінімізація похибки вирішення перевизначеної системи із застосуванням методу найменших квадратів. Застосування сукупних вимірювань дозволяє уникнути необхідності врахування впливу частоти прикладеної напруги на ефективність застосування технічних рішень, що дозволяють усунути вплив паразитних ємностей у випадку прямих вимірювань параметрів ізоляції. Крім того, можливість проведення вимірювань із використанням вимірювачів імітансу із 2 клемми,

суттєво спрощує процедуру контролю за рахунок можливості застосування більш розповсюдженого метрологічного забезпечення. В той же час, до недоліків такого підходу необхідно віднести підвищену трудомісткість вимірювань та обробки їх результатів. Зазначений недолік пов'язаний з тим, в цьому випадку процедура контролю передбачає необхідність вимірювань сукупних значень ємності та $\text{tg}\delta$ за різних способів з'єднання металевих елементів конструкції силового кабелю із наступним вирішенням системи рівнянь для розрахунку індивідуальних параметрів діелектриків між металевими елементами конструкції.

Мета статті полягає в аналізі способів формування систем рівнянь при визначенні індивідуальних параметрів діелектричної абсорбції ізоляції трижильних силових кабелів із застосуванням сукупних вимірювань.

Формування систем рівнянь при визначенні часткових ємностей ізоляції трижильних силових кабелів в спільній металевій оболонці. Способи формування систем рівнянь для визначення часткових ємностей та індивідуальних значень $\text{tg}\delta$ шарів ізоляції між металевими елементами конструкції засновані на аналізі властивостей наведеної на рис. 1 схеми заміщення трижильного силового кабелю [7].

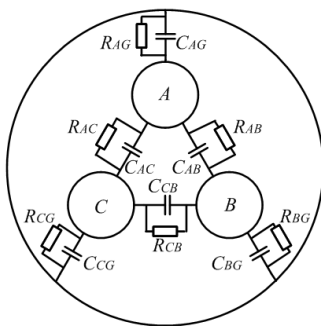


Рисунок 1 – Схема заміщення трижильного силового кабелю, що враховує ємнісні зв'язки між металевими елементами конструкції та діелектричні втрати на електропровідність, поляризацію та часткові розряди у відповідних шарах ізоляції:

C_{AB} , C_{CB} , C_{AC} – невідомі часткові ємності між жилами силового кабелю,

C_{AG} , C_{CG} , C_{BG} – невідомі часткові ємності між жилами та оболонкою кабелю,

R_{AB} , R_{CB} , R_{AC} – електричні опори, що зумовлені діелектричними втратами в шарах ізоляції між жилами кабелю,

R_{AG} , R_{BG} , R_{CG} – електричні опори, що зумовлені діелектричними втратами в шарах ізоляції між жилами та оболонкою кабелю

Оскільки вимірювання параметрів ізоляції проводяться в режимі холостого ходу, наведена на рис. 1 схема заміщення не містить індуктивних параметрів та електричних опорів, що зумовлені втратами в металевих елементах конструкції кабелю. При вимірюваннях на високих частотах, внаслідок роботи досліджуваного зразка в режимі лінії з розподіленими параметрами, можливе виникнення резонансних явищ в досліджуваному об'єкті контролю

та відповідний небажаний вплив індуктивності кабелю на результати вимірювань. Такий вплив полягає у збільшенні електричної ємності із зростанням частоти прикладеної до діелектрика напруги. Оскільки в досить широкому частотному діапазоні таке збільшення електричної ємності не співпадає із частотною залежністю відносної діелектричної проникності паперової ізоляції, вплив паразитної індуктивності призводить до похибок вимірювання сукупних значень ємності та $\text{tg}\delta$ а також до неточних оцінок індивідуальних параметрів діелектрика між металевими елементами конструкції кабелю.

Вимірювання сукупних значень ємності та $\text{tg}\delta$ проводять із застосуванням наступних схем з'єднання металевих елементів конструкції кабелю [8–10]:

- «жила проти двох інших жил та оболонки». При застосуванні цієї схеми з'єднання випробувальна напруга вимірювача імітансу послідовно прикладається до шару ізоляції між однією із жил кабелю та з'єднаними між собою та оболонкою двома іншими жилами. В цьому випадку вимірюються сукупні значення ємності: C_A , C_B , C_C та рівні $\text{tg}\delta$: $\text{tg}\delta_A$, $\text{tg}\delta_B$, $\text{tg}\delta_C$. В таких позначеннях C_A , C_B , C_C та $\text{tg}\delta_A$, $\text{tg}\delta_B$, $\text{tg}\delta_C$ відповідно, позначають сукупні значення ємності та $\text{tg}\delta$, виміряні при подачі тестової напруги між жилою A, та з'єднаними між собою та оболонками жилами B та C, при подачі тестової напруги між жилою B, та з'єднаними між собою та оболонками жилами A та C а також при подачі напруги між жилою C, та з'єднаними між собою жилами A та B;

- «дві жили проти жили та оболонки». В цьому випадку тестова напруга прикладається між з'єднаними між собою двома жилами та з'єднаною з оболонкою третьою жилою. При застосуванні цієї схеми проводять вимірювання сукупних значень: C_{A_B} , C_{B_C} , C_{A_C} , та $\text{tg}\delta_{A_B}$, $\text{tg}\delta_{B_C}$, $\text{tg}\delta_{A_C}$. В таких позначеннях C_{A_B} та $\text{tg}\delta_{A_B}$ – сукупні значення ємності та $\text{tg}\delta$, виміряні при подачі тестової напруги до ізоляції між з'єднаними між собою жилами A і B та з'єднаною з оболонкою жилою C, C_{B_C} та $\text{tg}\delta_{B_C}$ – сукупні значення ємності та $\text{tg}\delta$, що вимірюються у випадку подачі тестової напруги до шару ізоляції між з'єднаними між собою жилами B і C та з'єднаною з оболонкою жилою A, C_{A_C} та $\text{tg}\delta_{A_C}$ – сукупні значення ємності та $\text{tg}\delta$, що вимірюються у випадку подачі тестової напруги до шару ізоляції між з'єднаними між собою жилами A і C та з'єднаною з оболонкою жилою B;

- «три жили проти оболонки». При застосуванні цієї схеми вимірюються параметри C_{ABC_G} та $\text{tg}\delta_{ABC_G}$. В цьому випадку тестова напруга вимірювача імітансу прикладається до шару ізоляції між з'єднаними між собою трьома жилами кабелю та його оболонкою.

Застосування всіх 3 схем з'єднання дозволяє визначити 7 сукупних значень електричної ємності та 7 відповідних значень $\text{tg}\delta$. Враховуючи, що у

відповідності з наведеною на рис. 1 схемою заміщення при контролі виникає необхідність вимірювання індивідуальних параметрів діелектрика для 6 ізоляційних проміжків, в такому випадку визначення часткових ємностей та відповідних рівнів $\text{tg}\delta$ проводять шляхом мінімізації середньоквадратичної похибки вирішення перевизначеної системи рівнянь із застосуванням методу найменших квадратів. При оцінюванні часткових ємностей із застосуванням методу найменших квадратів система рівнянь може бути записана у вигляді:

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

де $\mathbf{b}_1 = [C_A, C_B, C_C, C_{A_B}, C_{B_C}, C_{A_C}, C_{ABC_G}]^T$ – вектор результатів вимірювань сукупних значень електричної ємності;

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

$\mathbf{A}_1$ – матриця, що визначає відсутність, чи наявність внеску того чи іншого ізоляційного проміжку в результат вимірювання сукупного значення електричної ємності. Враховуючи, що при застосуванні описаних схем з'єднання металевих елементів конструкції невідомі часткові ємності, що визначають вектор результатів сукупних вимірювань $\mathbf{b}_1$, з'єднані паралельно, матриця $\mathbf{A}_1$ може бути визначена у відповідності із виразом:

$$\mathbf{A}_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}. \quad (2)$$

При вирішенні системи (1) із використанням методу найменших квадратів замість її прямого вирішення розглядається система рівнянь:

$$\mathbf{Bc} = \mathbf{u}; \quad (3)$$

де $\mathbf{B} = \mathbf{A}_1^T \mathbf{A}_1$, $\mathbf{u} = \mathbf{A}_1^T \mathbf{b}_1$.

Нормальна система рівнянь (3) може бути вирішена із застосуванням будь-якого методу, при цьому її рішення забезпечує мінімізацію середньоквадратичної похибки вирішення системи (1).

Формування систем рівнянь при визначенні індивідуальних значень $\text{tg}\delta$ шарів ізоляції трижильних силових кабелів в спільній металевій оболонці. Визначення часткових ємностей ізоляції трижильних силових кабелів дає можливість розрахунку рівнів $\text{tg}\delta$ для кожного з шарів ізоляції в трижильних кабелях. Таке визначення може бути проведене двома різними способами. Перший спосіб полягає в застосуванні результатів теорії фізики діелектриків, що дозволяють встановити співвідношення для ефективного значення $\text{tg}\delta$

декількох з'єднаних паралельно конденсаторів для випадку, коли відомі значення ємності та $\text{tg}\delta$ кожного з конденсаторів. Так, для двох паралельно з'єднаних конденсаторів з параметрами C_1 , C_2 та $\text{tg}\delta_1$, $\text{tg}\delta_2$ ефективне значення $\text{tg}\delta_e$ може бути розраховане за формулою [11]:

$$\text{tg}\delta_e = \frac{C_1}{C_1 + C_2} \text{tg}\delta_1 + \frac{C_2}{C_1 + C_2} \text{tg}\delta_2. \quad (4)$$

В такому випадку при застосуванні 3 схем обстеження «жила проти двох інших жил та оболонки» та 3 схем обстеження «дві жили проти жили та оболонки» система рівнянь відносно невідомих індивідуальних значень $\text{tg}\delta$ кожного з шарів ізоляції може бути записана у вигляді [8]:

$$\mathbf{T} \cdot \mathbf{d} = \mathbf{t}; \quad (5)$$

де $\mathbf{t} = [\text{tg}\delta_A, \text{tg}\delta_B, \text{tg}\delta_C, \text{tg}\delta_{A_B}, \text{tg}\delta_{B_C}, \text{tg}\delta_{A_C}]^T$ – вектор результатів вимірювань сукупних значень $\text{tg}\delta$;

$\mathbf{d} = [\text{tg}\delta_{AB}, \text{tg}\delta_{BC}, \text{tg}\delta_{AC}, \text{tg}\delta_{AG}, \text{tg}\delta_{BG}, \text{tg}\delta_{CG}]^T$ – вектор, що містить невідомі часткові ємності силового кабелю;

$\mathbf{T}$ – матриця, коефіцієнти якої враховують внесок певного шару ізоляції в результат вимірювання сукупного значення $\text{tg}\delta$, яка визначаються у відповідності з виразом:

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} a_1 & 0 & a_2 & a_3 & 0 & 0 \\ a_4 & a_5 & 0 & 0 & a_6 & 0 \\ 0 & a_7 & a_8 & 0 & 0 & a_9 \\ 0 & a_{10} & a_{11} & a_{12} & a_{13} & 0 \\ a_{14} & 0 & a_{15} & 0 & a_{16} & a_{17} \\ a_{18} & a_{19} & 0 & a_{20} & 0 & a_{21} \end{pmatrix}; \quad (6)$$

де всі коефіцієнти $a_1 \dots a_{21}$, аналогічно до залежних від відношення ємностей параметрів записаного для двох конденсаторів виразу (4), представляють собою вагові коефіцієнти, що враховують внесок певної часткової ємності в сукупне значення $\text{tg}\delta$ та, із використанням векторної форми запису, можуть бути визначені за формулами [8]:

$$\mathbf{a}_{1-3} = \frac{1}{C_{AB} + C_{AC} + C_{AG}} \cdot \mathbf{C}_{1-3}; \quad (7)$$

$$\mathbf{a}_{4-6} = \frac{1}{C_{AB} + C_{BC} + C_{BG}} \cdot \mathbf{C}_{4-6}; \quad (8)$$

$$\mathbf{a}_{7-9} = \frac{1}{C_{BC} + C_{AC} + C_{CG}} \cdot \mathbf{C}_{7-9}, \quad (9)$$

$$\mathbf{a}_{10-13} = \frac{1}{C_{BC} + C_{AC} + C_{AG} + C_{BG}} \cdot \mathbf{C}_{10-13}, \quad (10)$$

$$\mathbf{a}_{14-17} = \frac{1}{C_{AB} + C_{AC} + C_{BG} + C_{CG}} \cdot \mathbf{C}_{14-17}, \quad (11)$$

$$\mathbf{a}_{18-21} = \frac{1}{C_{AB} + C_{BC} + C_{AG} + C_{CG}} \cdot \mathbf{C}_{18-21}, \quad (12)$$

де вектори $\mathbf{a}_{1-3} \dots \mathbf{a}_{18-21}$ визначаються за виразами:

$$\begin{aligned} \mathbf{a}_{1-3} &= [a_1, a_2, a_3], \\ \mathbf{a}_{4-6} &= [a_4, a_5, a_6], \\ \mathbf{a}_{7-9} &= [a_7, a_8, a_9], \\ \mathbf{a}_{10-13} &= [a_{10}, a_{11}, a_{12}, a_{13}], \\ \mathbf{a}_{14-17} &= [a_{14}, a_{15}, a_{16}, a_{17}], \\ \mathbf{a}_{18-21} &= [a_{18}, a_{19}, a_{20}, a_{21}], \end{aligned}$$

а вектори $\mathbf{C}_{1-3} \dots \mathbf{C}_{18-21}$ визначаються у відповідності з виразами:

$$\begin{aligned} \mathbf{C}_{1-3} &= [C_{AB}, C_{AC}, C_{AG}], \\ \mathbf{C}_{4-6} &= [C_{AB}, C_{BC}, C_{BG}], \\ \mathbf{C}_{7-9} &= [C_{BC}, C_{AC}, C_{CG}], \\ \mathbf{C}_{10-13} &= [C_{BC}, C_{AC}, C_{AG}, C_{BG}], \\ \mathbf{C}_{14-17} &= [C_{AB}, C_{AC}, C_{BG}, C_{CG}], \\ \mathbf{C}_{18-21} &= [C_{AB}, C_{BC}, C_{AG}, C_{CG}]. \end{aligned}$$

Вирішення системи рівнянь (5) дозволяє визначити індивідуальні значення $\operatorname{tg} \delta$ для кожного з шарів ізоляції для схеми заміщення на рис. 1.

Альтернативний шлях визначення індивідуальних значень $\operatorname{tg} \delta$ полягає у вимірюванні зумовлених діелектричними втратами опорів $R_{AB}, R_{CB}, R_{AC}, R_{AG}, R_{BG}, R_{CG}$ для наведеної на рис. 1 схеми заміщення силового кабелю. Враховуючи, що зазначені параметри, так само як електрична ємність та $\operatorname{tg} \delta$, можуть бути виміряні із використанням сучасних вимірювачів імітансу а також паралельне з'єднання шарів ізоляції при застосуванні описаних схем з'єднання металевих елементів конструкції, система рівнянь для провідності у випадку застосування 3 схем «жила проти двох інших жил та оболонки» та 3 схем «дві жили проти жили та оболонки» може бути записана у вигляді:

$$\mathbf{G} \cdot \mathbf{g} = \mathbf{p}; \quad (13)$$

де $\mathbf{p} = [R_A^{-1}, R_B^{-1}, R_C^{-1}, R_{A-B}^{-1}, R_{B-C}^{-1}, R_{A-C}^{-1}]^T$ – вектор, що залежить від результатів вимірювань сукупних значень опору ізоляції;

$\mathbf{g} = [G_{AB}, G_{BC}, G_{AC}, G_{AG}, G_{BG}, G_{CG}]^T$ – вектор, що містить невідомі провідності шарів ізоляції силового кабелю;

$\mathbf{G}$ – матриця, коефіцієнти якої визначають наявність, чи відсутність внеску того, чи іншого шару ізоляції в результат сукупного вимірювання складових вектору $\mathbf{p}$, та які визначаються у відповідності з виразом:

$$\mathbf{G} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (14)$$

Вирішення системи рівнянь (13) дозволяє визначити невідомі провідності та опори $R_{AB}, R_{CB}, R_{AC}, R_{AG}, R_{BG}, R_{CG}$ для наведеної на рис. 1 схеми заміщення. Такий розрахунок, після попереднього визначення часткових ємностей силового кабелю, дозволяє розрахувати індивідуальне значення $\operatorname{tg} \delta$ кожного шару ізоляції у відповідності із формулою [12]:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{\omega CR}; \quad (15)$$

де ω – кутова частота прикладеної до діелектрика напруги;

C – часткова ємність певного шару ізоляції, що визначена шляхом вирішення системи рівнянь (1);

R – зумовлений діелектричними втратами електричний опір певного шару ізоляції, що визначається на основі вирішення системи рівнянь (13).

Висновки. В статті розглянуто найбільш поширені способи формування систем рівнянь при визначенні часткових ємностей та індивідуальних значень тангенса кута діелектричних втрат шарів ізоляції в трижильних силових кабелях з паперовою імпрегнованою ізоляцією в спільній металевій оболонці. Запропоновано альтернативний спосіб визначення індивідуальних значень тангенса кута діелектричних втрат, що полягає в розрахунку електропровідності шарів ізоляції після вимірювання сукупних значень її опору змінному струму, що, після попереднього визначення часткових ємностей, дає можливість розрахунку тангенса кута діелектричних втрат шляхом застосування відповідного виразу для неідеального конденсатора з діелектричними втратами.

Список літератури

1. Силові кабелі низької та середньої напруги. Конструювання, технологія, якість / В. П. Карпушенко та ін. Харків: Регіон-інформ, 2020. 376 с.
2. Диагностика кабельных линий энергосистем по тангенсу угла диэлектрических потер и постоянной времени саморазряда бумажно-пропитанной изоляции / Б. Г. Набока та ін. *Електротехніка і електромеханіка*. 2011. № 2. С. 65–70.
3. Безпрозванных Г. В., Москвитин Е. С. Стратегия управления старением кабелей атомных электрических станций. *Энергозбереження. Енергетика. Енергоаудит*. 2023. № 11-12(177-178). С. 21–33. DOI: <https://doi.org/10.20998/2313-8890.2022.11.02>.
4. Безпрозванных А. В. Физическая интерпретация кривых восстановления напряжения на основе схем замещения неоднородного диэлектрика. *Технічна електродинаміка*. 2009. № 6. С. 23–27.
5. Діелектричні параметри фазної та поясної паперової просоченої ізоляції силових кабелів / Г. В. Безпрозванных та ін. *Електротехніка і електромеханіка*. 2025. № 2. С. 69–78. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272x.2025.2.09>.
6. Bezprozvannykh G. V., Moskvitin Ye. S. Physical processes of aging and assessment of the technical condition of power cables with paper-impregnated insulation. *2023 IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine, 2–6 October 2023. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1109/khpiweek61412.2023.10312975>.
7. Москвитин Е. С. Контроль процессов старения силовых кабелей с бумажно-пропитанной изоляцией по измерениям диэлектрических характеристик изоляционных промежутков. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. 2011. № 3. С. 95–106.
8. Kostikov I. Dielectric dissipation factor in three-core power cables. *Measuring Equipment and Metrology*. 2021. Vol. 82, no. 2. P. 50–56. DOI: <https://doi.org/10.23939/istcm2021.02.050>.
9. Безпрозванных А. В., Москвитин Е. С., Кессаев А. Г. Абсорбционные характеристики фазной и поясной бумажно-пропитанной изоляции силовых кабелей на постоянном напряжении. *Електротехніка і електромеханіка*. 2015. № 5. С. 63–68. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272x.2015.5.09>.

10. Костюков І. О. Особливості оцінювання часткових ємностей ізоляції трьохжильних силових кабелів із застосуванням сукупних вимірювань. *Український метрологічний журнал*. 2021. № 1. С. 15–20. DOI: <https://doi.org/10.24027/2306-7039.1.2021.228201>.
11. Беспрозванных А. В., Рудаков С. В., Москвитин Е. С. Предостережение чрезвычайных ситуаций путем контроля состояния изоляции многожильных кабелей по параметрам частичных емкостей и тангенсу угла диэлектрических потерь: монография. Харьков: НУЦЗУ, КП «Міська друк.», 2013. 132 с.
12. Беспрозванных А. В., Набока Б. Г. Математические модели и методы расчета электроизоляционных конструкций. Харьков: НТУ «ХПИ», 2013. 108 с.
6. G. V. Bezprozvannykh and Y. S. Moskvitin, "Physical processes of aging and assessment of the technical condition of power cables with paper-impregnated insulation", in *2023 IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine, Oct. 2–6, 2023. IEEE, 2023, doi: <https://doi.org/10.1109/khpiweek61412.2023.10312975>
7. E. S. Moskvitin, "Kontrol protsessov starenia silovykh kabelei s bumazhno-propitannoi izoliatsiei po izmereniam dielektricheskikh kharakteristik izoliatsionnykh promezhutkov [Control of ageing processes in power cables with paper-impregnated insulation based on measurements of the dielectric characteristics of insulation gaps]", *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Energy: Reliability and Energy Efficiency*, no. 3, pp. 95–106, 2011. (in Russian)
8. I. Kostiukov, "Dielectric dissipation factor in three-core power cables", *Measuring Equipment and Metrology*, vol. 82, no. 2, pp. 50–56, 2021, doi: <https://doi.org/10.23939/istcm2021.02.050>
9. G. V. Bezprozvannykh, E. S. Moskvitin, and A. G. Kyessayev, "The absorption characteristics of the phase and zone paper-impregnated insulation of power cable at direct voltage", *Electrical Engineering & Electromechanics*, no. 5, pp. 63–68, Nov. 2015, doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272x.2015.5.09> (in Russian)
10. I. Kostiukov, "Particular properties of estimation of partial capacitances of insulation of three core power cables by applying aggregate measurements", *Ukrainian Metrological Journal*, no. 1, pp. 15–20, Mar. 2021, doi: <https://doi.org/10.24027/2306-7039.1.2021.228201> (in Ukrainian)
11. A. V. Bezprozvannykh, S. V. Rudakov, and E. S. Moskvitin, *Predostrazhchenie Cherezvychainykh Situatsii Putem Kontrolya Sostoianii Izoliatsii Mnogozhilnykh Kabelei Po Parametram Chastichnykh Emkosti I Tangensu Ugla Dielektricheskikh Poter [Prevention of Emergencies by Monitoring the Insulation Condition of Multi-Core Cables Based on Partial Capacitance and Dielectric Loss Tangent Parameters]*. Kharkiv: NUTsZU, KP «Miska druk.», 2013. (in Russian)
12. A. V. Bezprozvannykh and B. H. Naboka, *Matematicheskie Modeli I Metody Rascheta Elektroizoliatsionnykh Konstruktsii [Mathematical Models and Methods for Calculating Electrical Insulation Structures]*. Kharkiv: NTU «KhPI», 2013. (in Russian)

Надійшла (received) 23.06.2025

UDC 621.315.2

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

FOSHCHII MARIIA – Senior Lecturer of Management Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1555-3110>; e-mail: Mariia.Foshchii@khp.edu.ua.

SYZOV YEVGENIY – Postgraduate Student of the Department of Theoretical Electrical Engineering, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"; Kharkiv, Ukraine; e-mail: sizovevgeniy94@gmail.com.

METHODS OF FORMATION OF SYSTEM OF EQUATIONS FOR DETERMINATION OF DIELECTRIC ABSORPTION PARAMETERS OF INSULATION IN THREE-CORE POWER CABLES BY APPLYING AGGREGATE MEASUREMENTS

The article is devoted to a review of the methods of forming systems of equations when determining partial capacitances and individual values of the dielectric loss tangent of the insulation layers of three-core power cables with paper-impregnated insulation in a common metal sheath. The methods of connecting metal elements of the power cable structure when measuring the total values of capacitance and dielectric loss tangent used in the formation of systems of equations are presented. An analytical review of the most common control methods used in assessing the degree of aging of paper insulation of three-core power cables is presented. A comparative analysis of the main features of the methods of determining individual values of electrical capacitance and dielectric loss tangent using direct and total measurements is carried out. It is shown that, taking into account the need to carry out control in a wide frequency range, the effectiveness of the use of existing methods of eliminating the influence of parasitic capacitances on the measurement results is reduced. When using auto-compensating impedance-to-voltage converters, such a decrease is associated with a decrease in the gain of the operational amplifier, and in the case of using immittance meters with three terminals, with the occurrence of resonant phenomena in the control object due to an increase in its parasitic inductance due to the use of an additional terminal of the immittance meter. A method for evaluating individual values of the dielectric loss angle tangent using cumulative measurements is proposed, which consists in measuring the conductivity of insulating gaps, which, after preliminary determination of the partial capacitances of the insulation, allows determining its dielectric loss angle tangent by applying the corresponding expression for a non-ideal capacitor with dielectric losses.

Keywords: diagnostics of insulation; dielectric power losses; nuclear power plants; impedance measurement; least squares method.