

І.О. КОСТЮКОВ, Б.І. КУБРИК

МЕТОДИКА ВИМІРЮВАННЯ ЧАСТКОВИХ ЄМНОСТЕЙ ДЛЯ ОБ'ЄКТІВ КОНТРОЛЮ ІЗ ТРЬОМА ЕЛЕКТРОДАМИ

Стаття присвячена розробці методу вимірювання часткових ємностей між електропровідними елементами конструкції ємнісних об'єктів контролю із трьома електродами. Розроблений метод передбачає застосування резистивно-ємнісного заземлення досліджуваного шару ізоляції із наступним поступовим регулюванням величини допоміжного резистору, через який заземлено досліджуваний шар ізоляції, до значення, за якого фазовий зсув між напругою на досліджуваному шарі ізоляції та допоміжній ємності буде дорівнювати 0°. Результати проведених розрахунків показали, що в такому випадку напруга між електродами залежить лише від ємнісних елементів схеми, та не залежить від зумовлених діелектричними втратами електричних опорів. Після вимірювання напруг на елементах схеми заміщення із наступним аналогічним повторним регулюванням величини допоміжного резистору, за іншого значення ємності допоміжного конденсатору, вдається сформувати систему рівнянь, вирішення якої дозволяє визначити невідомі значення часткових ємностей шарів ізоляції. Розроблений метод може використовуватись для визначення кожної часткової ємності об'єкта контролю із трьома електродами та не вимагає застосування вимірювачів імітансу з 3 клемми та використання заснованих на застосуванні сукупних вимірювань методик обстеження.

Ключові слова: діагностика ізоляції, вимірювання напруги, сукупні вимірювання, паразитні ємнісні зв'язки.

I. KOSTIUKOV, B. KUBRIK

METHOD OF MEASUREMENT OF PARTIAL CAPACITANCES FOR TESTED OBJECTS WITH THREE ELECTRODES

The article is devoted to the development of a method of measuring partial capacitances between the electrically conductive structural elements of a capacitive tested object with three electrodes. The developed method involves the applying of resistive-capacitive grounding of the investigated insulation layer with subsequent gradual adjustment of the value of the auxiliary resistor, through which the investigated insulation layer is grounded, to the value at which the phase shift between the voltage on the investigated insulation layer and the auxiliary capacity will be equal to 0°. The results of the calculations showed that in this case the voltage between the electrodes depends only on the capacitive elements of the circuit, and does not depend on the electrical resistance caused by dielectric losses. After measuring the voltages on the elements of the substitution scheme followed by similar readjustment of the value of the auxiliary resistor, for a different value of the capacity of the auxiliary capacitor, it is possible to form a system of equations, the solution of which allows you to determine the unknown values of the partial capacities of the insulation layers. The developed method can be used to determine each partial capacitance of the object of control with three electrodes and does not require the use of 3-terminal immittance meters and the use of application-based cumulative measurement survey techniques.

Keywords: diagnostics of insulation, voltage measurement, aggregate measurements, capacitive coupling.

Вступ. Задача визначення електричної ємності та тангенса кута діелектричних втрат ($\operatorname{tg} \delta$) ємнісних об'єктів контролю з 3 електродами є досить поширеною в практиці контролю технічного стану електричної ізоляції та приладобудуванні. Типовими прикладами таких об'єктів контролю є екрановані кабелі на основі витих пар [1], багатожильні кабелі за певних способів з'єднання між собою електропровідних елементів конструкції [2], ємнісні елементи приладів для дослідження магнітострикції та теплового розширення матеріалів [3].

Для ємнісних об'єктів контролю, що містять декілька електродів, вимірювання параметрів діелектрика ускладнене внаслідок небажаного впливу паразитних ємнісних зв'язків досліджуваного шару ізоляції. При вимірюваннях параметрів діелектрика об'єктів контролю із 3 електродами необхідно приймати до уваги наявність двох паразитних ємностей, кожна з яких утворена ємнісним зв'язком між заземленим, та двома іншими незаземленими електродами. На практиці усунення впливу паразитних ємнісних зв'язків можна проводити із використанням методик, побудованих на застосуванні сукупних вимірювань [1, 4], вимірювачів імітансу з трьома клемми а також шляхом використання спеціалізованих вимірювальних схем на основі операційних підсилювачів [5]. При застосуванні таких схемотехнічних рішень вплив однієї із паразитних ємностей вдається усунути за рахунок її паралельного

підключення по відношенню до джерела тестової напруги. Вплив іншої паразитної ємності усувається за рахунок її підключення до «віртуально заземленого» входу операційного підсилювача.

Недоліком заснованих на застосуванні сукупних вимірювань методик визначення параметрів діелектрика є суттєва трудомісткість вимірювань, а також можливий небажаний вплив похибок вимірювань сукупних значень параметрів ізоляції на розраховані індивідуальні значення часткових ємностей та відповідні значення $\operatorname{tg} \delta$ [6]. Досить розповсюдженим шляхом усунення такого небажаного взаємного впливу похибок вимірювання сукупних значень є розрахунок індивідуальних параметрів ізоляції шляхом вирішення перевищеної системи рівнянь із застосуванням методу найменших квадратів, що, однак, призводить до додаткового ускладнення процедури визначення індивідуальних параметрів кожного з шарів ізоляції між електродами. В той же час, при визначенні параметрів ізоляції силових кабелів, ефективність описаних схемотехнічних рішень, що застосовуються для зменшення небажаного впливу паразитних ємностей, може зменшуватись в залежності від діапазону їх значень [7]. Зазначені складнощі у застосуванні існуючих способів усунення небажаного впливу паразитних ємностей досліджуваного шару ізоляції спонукають до пошуку альтер-

рнативних методів для визначення індивідуальних параметрів діелектрика ємнісних об'єктів контролю з трьома електродами.

Мета статті полягає в розробці заснованої на резистивно-ємнісному заземленні досліджуваного шару ізоляції методики визначення індивідуальних значень часткових ємностей ізоляції для ємнісних об'єктів контролю із трьома електродами.

Схема обстеження ємнісних об'єктів контролю з трьома електродами. На рис. 1 наведено традиційну схему заміщення ємнісних об'єктів контролю з трьома електродами, доповнену зумовленими діелектричними втратами параметрами діелектрика між електропровідними елементами конструкції.

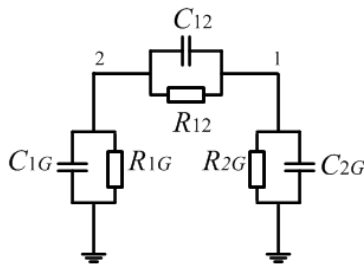


Рис. 1. Схема заміщення ємнісного об'єкта контролю із трьома електродами: C_{12} – ємність між першим та другим електродами, C_{1G} , C_{2G} – ємності між електродами 1, 2 та заземленим електродом конструкції, R_{1G} , R_{2G} , R_{12} – електричні опори, зумовлені діелектричними втратами на поляризацію та електропровідність у відповідних шарах ізоляції

З наведеної на рис. 1 схеми заміщення можна зробити висновок, що при вимірюванні параметрів об'єкта контролю з трьома електродами необхідно визначити 3 невідомих значення електричної ємності, два з яких зумовлені ємнісними зв'язками між заземленим та незаземленими електродами а третє – ємнісним зв'язком між електродами 1 та 2. Розроблена в статті методика визначення часткових ємностей ізоляції заснована на застосуванні представленої на рис. 2 схеми обстеження трьохелектродного об'єкта контролю, та буде проілюстрована на прикладі визначення електричної ємності шару ізоляції між електропровідними елементами 1 та 2 на рис.1.

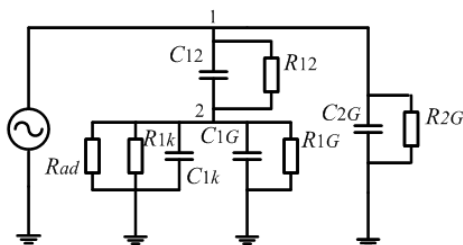


Рис. 2. Схема обстеження ємнісного об'єкта контролю із трьома електродами на основі резистивно-ємнісного заземлення досліджуваного шару ізоляції: C_{1k} – ємність допоміжного конденсатора, R_{1k} – електричний опір, зумовлений діелектричними втратами в допоміжному конденсаторі, R_{ad} – змінний електричний опір допоміжного резистора

Згідно із наведеною на рис. 2 схемою обстеження, тестова напруга прикладається до електроду 1, при

цьому допоміжна ємність C_{1k} та змінний резистор R_{ad} підключені паралельно до електроду 2. При застосуванні наведеної схеми обстеження вважається, що параметри C_{1k} , R_{1k} допоміжного конденсатора є відомими за кожного значення частоти прикладеної до об'єкта контролю напруги.

З наведеної на рис. 2 схеми обстеження ємнісного об'єкта можна зробити висновок, що ємність C_{2G} та відповідний, зумовлений діелектричними втратами опір R_{2G} , підключені паралельно по відношенню до частини схеми, що містить елементи C_{12} , R_{12} , C_{2G} , C_{1G} , R_{1k} , R_{1G} , R_{ad} . В такому випадку, величина струму, що протікає через частину схеми між точками 1 та 2 а також між точкою 2 та землею буде залежати тільки від імпедансу цих частин схеми та величини тестової напруги. Цей струм може бути розрахований за формулою:

$$I_{1G} = \frac{U}{z_{12} + z_{2G}} \quad (1)$$

де U – середньоквадратичне значення прикладеної до об'єкта контролю напруги, Z_{12} – імпеданс частини схеми на рис. 2 між електродами 1 та 2, Z_{2G} – імпеданс частини схеми на рис. 2 між електродом 2 та заземленим електродом об'єкта контролю. Зазначені параметри схеми можуть бути визначені за формулами:

$$z_{12} = \frac{R_{12}}{R_{12}j\omega C_{12} + 1} \quad (2)$$

$$z_{2G} = \frac{R_{2G}eq}{R_{2G}eqj\omega C_{2G1} + 1} \quad (3)$$

де ω – кутова частота прикладеної напруги, а параметри $R_{2G}eq$ та C_{2G1} можуть бути визначені за формулами:

$$C_{2G1} = C_{1k} + C_{1G} \quad (4)$$

$$R_{2G}eq = \frac{R_{ad}R_{1k}R_{1G}}{R_{ad}R_{1G} + R_{1k}R_{1G} + R_{ad}R_{1k}} \quad (5)$$

Адмітанс частини схеми на рис. 2 між електродом 2 та заземленим електродом ємностей C_{1k} та C_{1G} можна визначити за виразом:

$$G = j\omega C_{2G1} + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_{ad}} \quad (6)$$

де параметр R_1 визначається за формулою:

$$R_1 = \frac{R_{1k}R_{1G}}{R_{1k} + R_{1G}} \quad (7)$$

В такому випадку падіння напруги між точками 1 та 2 може бути знайдене із використанням формули:

$$U_{12} = \frac{UR_{12}(R_1 + R_{ad}(jC_{2G1}R_1\omega + 1))}{R_{ad}R_{1G} + R_{1k}R_{1G} + R_{ad}R_{1k}} \quad (8)$$

Фазовий кут напруги U_{12} може бути визначений як відношення її уявної та дійсної складових за формулою:

$$\varphi_{U_{12}} = \frac{\omega R_1 R_{ad} ((-C_{12}R_{12} + C_{2G1}R_1)R_{ad} - C_{12}R_1R_{12})}{(a_1(C_{2G1} + C_{12}) + R_1 + R_{12})R_{ad}^2 + a_2 + a_3} \quad (9)$$

де параметри a_1 , a_2 , a_3 можуть бути визначені за формулами:

$$a_1 = R_{ad}^2 C_{2G1} R_{12} \omega^2 \quad (10)$$

$$a_2 = R_1 R_{ad} (R_1 + 2R_{12}) \quad (11)$$

$$a_3 = R_1^2 R_{12} \quad (12)$$

Безпосередньо перевіркою можна переконатись, що визначений за формулою (9) фазовий кут $\varphi_{U_{12}}$ буде дорівнювати 0° у випадку, коли значення допоміжного опору R_{ad} буде відповідати визначеній за виразом (13) умові:

$$R_{ad} = -\frac{C_{12} R_1 R_{12}}{C_{12} R_{12} - C_{2G1} R_1} \quad (13)$$

Для наведеної на рис. 2 схеми обстеження напруга між електродами 2 та заземленим електродом може бути визначена за формулою:

$$U_{2G} = \frac{UR_{12}(R_1 + R_{ad}(jC_{2G1}R_1\omega + 1))}{R_{ad}R_{1G} + R_{1k}R_{1G} + R_{ad}R_{1k}} \quad (14)$$

Виділяючи дійсну та уявну частину напруги U_{2G} , можна визначити її фазовий кут:

$$\varphi_{U_{2G}} = -\frac{\omega R_{12}(-C_{12}R_{12}(R_1 + R_{ad}) + R_1 R_{ad} C_{2G1})}{R_1 R_{ad} + R_{12}(R_1 + R_{ad}) + a_4} \quad (15)$$

де параметр a_4 може бути визначений за формулою:

$$a_4 = C_{12} R_1 R_{12}^2 R_{ad} \omega^2 (C_{2G1} + C_{12}) \quad (16)$$

Після підстановки розрахованого за формулою (13) значення R_{ad} в формулу (15) можна переконатись, що якщо значення опору допоміжного резистору R_{ad} відповідає умові (13), то це ж саме значення опору одночасно дозволяє забезпечити не тільки виконання рівності: $\varphi_{U_{12}} = 0$, а і рівності: $\varphi_{U_{2G}} = 0$. Таким чином, виконання умови (13) дозволяє гарантувати відсутність фазового зсуву між кривими напруги U_{12} та U_{2G} .

Крім того, після підстановки розрахованого за умовою (13) значення R_{ad} в формулу (8) можна показати, що у випадку коли R_{ad} задовольняє умові (13), значення напруги U_{12} на досліджуваному шарі ізоляції залежить лише від ємнісних параметрів схеми, і не залежить від зумовлених діелектричними втратами значень опорів R_{12} , R_{1k} , R_{1G} . Таким чином, у випадку, коли значення опору резистору R_{ad} відповідає умові (13) напруга між електродами 1 та 2 може бути визначена за формулою:

$$U_{12r1} = \frac{UC_{2G1}}{C_{2G1} + C_{12}} \quad (17)$$

де U_{12r1} – напруги між електродами 1 та 2 для випадку, коли значення опору допоміжного резистора відповідає визначеній за формулою (10) умові.

Після підстановки виразу (13) в формулу (14) можна визначити, що у випадку, коли значення R_{ad} відповідає умові (13) напруга між електродами 2 та заземленим електродом також не залежить від зумовлених діелектричними втратами елементів схеми на рис. 2, та може бути розрахована за формулою:

$$U_{2Gr1} = \frac{UC_{12}}{C_{2G1} + C_{12}} \quad (18)$$

де U_{2Gr1} – напруги між електродом 2 та заземленим електродом для випадку, коли значення опору допоміжного резистора відповідає визначеній за формулою (13) умові.

Формування системи рівнянь для визначення електричної ємності між електродами 1 та 2. Зазначену обставину, що полягає в незалежності напруг між електродами 1 та 2 а також між електродом 2 та заземленим електродом від зумовлених діелектричними втратами елементів схеми, можна використати для визначення часткових ємностей об'єкта контролю. Для цього необхідно провести повторне аналогічне регулювання опору R_{ad} із допоміжним конденсатором, що має інше значення електричної ємності (C_{2k}). Зміна ємності допоміжного конденсатора з величини C_{1k} на C_{2k} зумовлює зміну визначеної за формулою (4) ємності C_{2G1} на C_{2G2} , зміну визначеної за формулою (13) величини опору резистору R_{ad} , за якої буде спостерігатись компенсація фазового зсуву між напругами U_{12} та U_{2G} та відповідну зміну напруг між електродами 1 та 2 а також між електродом 2 та землею. Зазначена зміна параметрів схеми та напруг на її елементах із новим допоміжним конденсатором C_{2k} після повторного регулювання величини R_{ad} дозволяє сформулювати систему рівнянь, з якої можна визначити ємність C_{12} .

Так, визначивши відношення виразів (17) та (18) можна показати, що для випадку, коли опір R_{ad} відповідає визначеній за формулою (13) умові, відношення напруг між електродами 1 та 2 та між електродом 2 та землею за величини ємності допоміжного конденсатора C_{1k} може бути розраховане за формулою:

$$\frac{U_{12r1}}{U_{2Gr1}} = \frac{C_{2G1}}{C_{12}} = \frac{C_{1k} + C_{1G}}{C_{12}} \quad (19)$$

За величини ємності допоміжного конденсатора C_{2k} аналогічне відношення напруг може бути визначене із використанням формули:

$$\frac{U_{12r2}}{U_{2Gr2}} = \frac{C_{2G2}}{C_{12}} = \frac{C_{2k} + C_{1G}}{C_{12}} \quad (20)$$

де U_{12r2} , U_{2Gr2} – значення напруг між електродами 1 та 2 а також між електродом 2 та заземленим електродом, виміряні після заміни допоміжного конденсатора з ємністю C_{1k} на допоміжний конденсатор з ємністю C_{2k} та повторного регулювання величини опору R_{ad} до значення, за якого фазовий зсув між напругами між електродами 1 та 2 та між електродом 2 та заземленим електродом буде складати 0° .

Таким чином, за допомогою повторного регулювання допоміжного опору R_{ad} до значення за якого буде спостерігатись нульовий фазовий зсув для падіння напруги між електродами 1 та 2 а також між електродом 2 та землею, можна сформулювати систему рівнянь (19), (20) для визначення параметрів C_{12} та C_{1G} . Шляхом спільного вирішення виразів (19), (20) невідомі часткові ємності C_{12} та C_{1G} можуть бути розраховані із використанням формул:

$$C_{12} = \frac{U_{2Gr1}(C_{1k} + C_{1G})}{U_{12r1}} \quad (21)$$

$$C_{1G} = \frac{U_{12r2}U_{2Gr1}C_{1k} - U_{12r1}U_{2Gr2}C_{2k}}{U_{12r1}U_{2Gr2} - U_{12r2}U_{2Gr1}} \quad (22)$$

Таким чином, методика визначення електричної ємності між електродами 1 та 2 об'єкту контролю на рис. 1 передбачає виконання наступних процедур:

- резистивно-ємнісне заземлення досліджуваного шару ізоляції за допомогою конденсатору із попередньо відомою електричною ємністю C_{1k} .

- регулювання опору резистору R_{ad} , через який заземлено досліджуваний шар ізоляції, до значення, за якого величина фазового зсуву між напругою між електродами 1 та 2 (U_{12}) та електродом 2 та заземленим електродом (U_{2G}) буде складати 0° .

- вимірювання напруг U_{12r1} , U_{2Gr1} .

- резистивно-ємнісне заземлення досліджуваного шару ізоляції за допомогою конденсатору з ємністю C_{2k} .

- повторне регулювання опору резистору R_{ad} до значення, за якого величина фазового зсуву між напругою між електродами 1 та 2 а також електродом 2 та заземленим електродом знову буде складати 0° .

- вимірювання напруг U_{12r2} , U_{2Gr2} .

- розрахунок ємності C_{1G} за формулою (22)

- розрахунок ємності C_{12} за формулою (21).

Висновки. В статті представлено методику визначення часткових ємностей для ємнісних об'єктів контролю із трьома електродами. Представлена методика передбачає застосування резистивно-ємнісного заземлення досліджуваного шару ізоляції із наступним регулюванням опору заземлюючого резистору до моменту відсутності фазового зсуву між напругами на досліджуваному шарі ізоляції та на заземлюючому резисторі. В такому випадку напруга на досліджуваних шарах ізоляції не залежить від зумовлених діелектричними втратами елементів схеми обстеження, завдяки чому повторне аналогічне регулювання опору заземлюючого резистору, за іншого значення ємності допоміжного конденсатору, дозволяє сформувати систему рівнянь, вирішення якої, в свою чергу, дозволяє визначити часткові ємності досліджуваного об'єкта контролю.

Список літератури

- 1 Набока, Б.Г., Беспрозванных, А.В., Штангей, А.С. Параметры частичных емкостей как индикатор состояния контрольных кабелей АЭС. *Электротехника і електромеханіка*. 2005. № 3. С. 80 – 82.

- 2 Рудаков С.В., Миргород О.В., Грицина І.М. Запобігання надзвичайним ситуаціям шляхом контролю стану ізоляції багатожильних кабелів. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2021. № 3. С. 253 – 266.
- 3 Kundys, B. Bukhantsev, Yu., Vasiliev S., Kundys D., Berkowski, M. Dyakonov V. P. Three terminal capacitance technique for magnetostriction and thermal expansion measurements. *Review of Scientific Instruments*. 2004. Vol. 75, No. 6, P. 2192.
- 4 Беспрозванных А.В. Діелектрическое сканирование поперечной структуры многожильных кабелей методом совокупных измерений. *Технічна Електродинаміка*. 2008. № 3. С. 30 – 36.
- 5 Abu Al Aish aAmir, Rehman Mahfoozur, Abu Hassan aAnwar Hasni, Arshad aMohd Rizal Development of an intelligent capacitive mass sensor based on co-axial cylindrical capacitor. *Sensors & Transducers Journal*, 2009, Vol. 105, No. 6, P. 1-9.
- 6 Набока Б. Г., Беспрозванных, А. В., Рудаков С. В. Анализ устойчивости методики восстановления параметров схемы замещения трехфазного кабеля по результатам косвенных измерений. *Системи обробки інформації*. 2002. № 4. С. 192-197
- 7 Набока Б. Г., Беспрозванных А. В., Штангей А. С., Радченко О. Н. Методика прямих измерений параметров частичных емкостей силовых кабелей. *Вісник НТУ «ХПІ»*. 2005. № 42. С. 80 – 86.

References (transliterated)

- 1 Naboka B.G., Besprozvannyh A.V., Shtangej A.S. Parametry chastichnyh emkostej kak indikator sostojanija kontrol'nyh kabelej AJeS. *Elektrotehnika і elektromehanika*. 2005. No. 3. Pp. 80-82
- 2 Rudakov S.V. Mirgorod O.V., Gricina I.M. Zapobigannja nadzvichajnym situacijam shljahom kontrolju stanu izoljacii bagatozhil'nyh kabelev. *Problemi nadzvichajnyh situacij*. 2021. No. 3. Pp. 253-266.
- 3 Kundys B. Bukhantsev Yu., Vasiliev S., Kundys D., Berkowski M. Dyakonov V. P. Three terminal capacitance technique for magnetostriction and thermal expansion measurements. *Review of Scientific Instruments*. 2004. Vol. 75, No. 6, P. 2192.
- 4 Besprozvannyh A.V. Dijelektricheskoe skanirovanie poperechnoj struktury mnogozhil'nyh kabelej metodom sovokupnyh izmerenij *Tehnichna Elektrodinamika*. 2008. No. 3. Pp. 30-36.
- 5 Abu Al Aish aAmir, Rehman Mahfoozur, Abu Hassan aAnwar Hasni, Arshad aMohd Rizal Development of an intelligent capacitive mass sensor based on co-axial cylindrical capacitor. *Sensors & Transducers Journal*, 2009, Vol. 105, No. 6, Pp. 1-9.
- 6 Naboka B. G., Besprozvannyh, A. V., Rudakov S. V. Analiz ustojchivosti metodiki vosstanovlenija parametrov shemy zameshhenija trehfaznogo kabelea po rezul'tatam kosvennyh izmerenij. *Sistemi obrobki informacii*. 2002. No. 4. Pp. 192-197
- 7 Naboka B. G., Besprozvannyh A. V., Shtangej A. S., Radchnko O. N. Metodika prjamyh izmerenij parametrov chastichnyh emkostej silovyh kabelej. *Visnik NTU «HPI»*. 2005. No. 42. Pp. 80-86.

Надійшла (received) 27.03.23

Відомості про авторів / About the authors

Костюков Іван Олександрович (Kostjukov Ivan Aleksandrovich) – кандидат технічних наук, завідувач кафедри теоретичних основ електротехніки НТУ «ХПІ» м. Харків; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8923-0579>; e-mail: iakostiukow@gmail.com.

Кубрик Борис Іванович (Kubryk Borys Ivanovych) – кандидат технічних наук, доцент кафедри теоретичних основ електротехніки НТУ «ХПІ» м. Харків; e-mail: borys.kubryk@khpi.edu.ua.