

# Особливості оцінювання часткових ємностей ізоляції трьохжильних силових кабелів із застосуванням сукупних вимірювань

І.О. КОСТЮКОВ

Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", вул. Кирпичова, 2, 61002, Харків, Україна  
iakostiukow@gmail.com

## Анотація

Розглянуто особливості визначення часткових ємностей ізоляційних проміжків трьохжильних силових кабелів з паперовою ізоляцією при різних способах формування та вирішення системи лінійних алгебраїчних рівнянь. Наведено можливі способи обстеження ізоляції трьохжильних кабелів при визначенні значень часткових ємностей із застосуванням сукупних вимірювань, що полягають у різних можливих способах підключення вимірювача імітансу до досліджуваного зразка трьохжильного силового кабеля. Наведено приклади визначення часткових ємностей при безпосередньому вирішенні системи лінійних алгебраїчних рівнянь, при мінімізації середньоквадратичної похибки вирішення перевизначеної системи рівнянь за методом найменших квадратів, а також при пошуку нормального вирішення невизначеної системи рівнянь за методом псевдооберненої матриці. Показано, що мінімізація середньоквадратичної похибки за методом найменших квадратів та безпосереднє пряме вирішення визначеної системи рівнянь показують достатньо близькі результати при оцінюванні часткових ємностей за допомогою сукупних вимірювань, водночас вирішення невизначеної системи рівнянь за методом псевдооберненої матриці дозволяє достатньо точно відтворювати тільки 3 із 6 значень часткових ємностей. Запропоновано використовувати частотну залежність ємнісного опору ізоляційних проміжків як інформативний параметр про технічний стан ізоляційних проміжків між жилами силового кабеля та між його жилами й оболонкою.

**Ключові слова:** середньоквадратична похибка; метод найменших квадратів; діелектричні втрати; діелектрична проникність.

Отримано: 08.12.2020

Відредаговано: 05.02.2021

Схвалено до друку: 11.02.2021

## 1. Вступ

При застосуванні методів електричних вимірювань контроль технічного стану ізоляції проводиться, наприклад, за вимірюванням характеристик часткових розрядів [1], визначенням напруги на кабелі після короткочасного розряду його ємності [2, 3], вимірюванням електричного опору ізоляції та визначенням її абсорбційних характеристик [4]. Особливо важливу роль відіграють вимірювання електричної ємності та тангенса кута діелектричних втрат ізоляції [5]. Для визначення часткових ємностей використовують як прямі, так і сукупні вимірювання. Використання прямих вимірювань ускладнене наявністю паразитних ємностей, що обмежують можливість прямого вимірювання часткових ємностей ізоляційних проміжків лише випадками, коли значення часткової ємності досліджуваного ізоляційного проміжку знаходиться у певному співвідношенні зі значеннями паразитних ємностей у вимірювальному ланцюгу. При сукупних вимірюваннях проводять обстеження ізоляції трьохжильного кабеля при різних схемах підключення вимірювача імітансу до силового ка-

беля, а значення часткових ємностей знаходять шляхом вирішення системи лінійних алгебраїчних рівнянь [6]. Водночас визначення невідомих параметрів шляхом безпосереднього вирішення системи рівнянь при сукупних вимірюваннях може призводити до суттєвих неточностей в оцінці невідомих параметрів внаслідок взаємного впливу похибок при вимірюванні коефіцієнтів правої частини системи рівнянь [7]. У статті розглянуто особливості відтворення результатів сукупних вимірювань часткових ємностей при різних способах формування та розв'язання системи лінійних алгебраїчних рівнянь.

## 2. Схеми обстеження ізоляції трьохжильних силових кабелів при визначенні часткових ємностей із застосуванням сукупних вимірювань

На рис. 1 наведено ємнісну схему заміщення ізоляції трьохжильного силового кабеля з паперовою ізоляцією типу ААШв.

Як можна бачити з рис. 1, за результатами дослідження необхідно визначити 6 невідомих значень електричних ємностей. Із зазначених 6 неві-

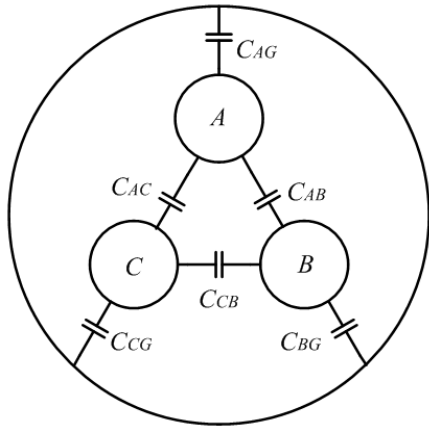


Рис. 1. Часткові ємності ізоляції трьохжильного силового кабелю з паперовою ізоляцією

домих 3 утворені за рахунок ємнісного зв'язку між жилами силового кабелю, а 3 інші – за рахунок ємнісного зв'язку між жилами та оболонкою кабелю. При визначенні часткових ємностей сукупними вимірюваннями формування системи рівнянь проводять на основі результатів вимірювання ємності, отриманих при використанні наведених на рис. 2 схем обстеження.

При проведенні вимірювань за схемою, зображеною на рис. 2а, випробувальна напруга послідовно подається на кожну із жил силового кабелю, при цьому дві інші фази з'єднані з оболонкою. Оскільки у наведеному на рис. 2а випадку потенціали фаз C і B дорівнюють 0, то результати вимірювання електричної ємності будуть визначатись лише паралельно з'єднаними відносно джерела прикладеної напруги електричними ємностями між фазами A і B та A і C, а також значенням електричної ємності фази A відносно землі. При проведенні вимірювань за схемою, зображеною на рис. 2б, випробувальна напруга подається на оболонку силового кабелю, при цьому жили силового кабелю з'єднані між собою. В такому випадку результати вимірювання електричної ємності будуть визначатись лише паралельно з'єднаними відносно джерела прикладеної напруги електричними єм-

ностями між фазами A, B, C та оболонкою. При проведенні вимірювань за схемою, зображеною на рис. 2в, випробувальна напруга послідовно подається на дві з'єднані між собою жили силового кабелю, при цьому третя фаза з'єднана з оболонкою. Оскільки у наведеному на рис. 2в випадку потенціал фази C дорівнює 0, то результати вимірювання електричної ємності будуть визначатись лише паралельно з'єднаними відносно джерела прикладеної напруги електричними ємностями між фазами A і C та B і C, а також значеннями електричної ємності фаз A і B відносно землі. При визначенні часткових ємностей сукупними вимірюваннями для формування системи рівнянь необхідно провести декілька вимірювань за наведеними на рис. 2 схемами. В такому випадку можливі такі варіанти обстеження:

- обстеження передбачає проведення 3 вимірювань за схемою дослідження на рис. 2а, шляхом послідовного прикладання випробувальної напруги до жил фаз A, B і C, проведення 3 вимірювань за схемою проведення дослідів на рис. 2в та проведення 1 вимірювання за схемою на рис. 2б. У такому випадку утворюється система із 7 рівнянь із 6 невідомими, що вирішується із застосуванням методу найменших квадратів;
- обстеження передбачає проведення 3 вимірювань за схемою дослідження на рис. 2а, а також 3 вимірювань за схемою дослідження на рис. 2в;
- обстеження передбачає проведення 1 вимірювання за схемою дослідження на рис. 2б, а також 5 вимірювань за однією із можливих комбінацій застосування схем дослідження, наведених на рис. 2а та рис. 2б;
- обстеження передбачає проведення 5 вимірювань за будь-якими із наведених схем та визначення 6 невідомих часткових ємностей із застосуванням методу псевдооберненої матриці. Таке визначення невідомих часткових ємностей дозволяє знаходити рішення системи рівнянь із мінімальною евклідовою нормою [8].

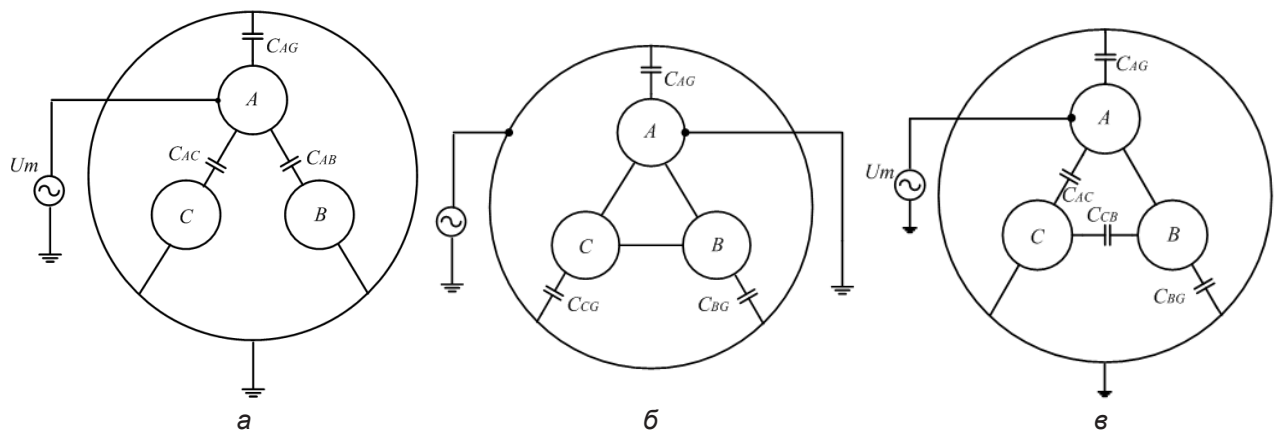


Рис. 2. Схеми обстеження ізоляції трьохжильних силових кабелів: а – при подачі випробувальної напруги на одну із жил кабелю ( $C_A, C_B, C_C$ ); б – при подачі випробувальної напруги на оболонку кабелю ( $C_{ABC,G}$ ); в – при подачі випробувальної напруги на дві з'єднані між собою жили кабелю ( $C_{A,B}, C_{A,C}, C_{B,C}$ )

### 3. Формування системи рівнянь для визначення часткових ємностей

З усіх перелічених варіантів найбільш повним можна вважати перший варіант, що передбачає застосування методу найменших квадратів для визначення часткових ємностей із перевизначеної системи рівнянь. У такому випадку часткові ємності визначаються шляхом вирішення системи рівнянь, що у матричному вигляді може бути записана як:

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

де вектор  $\mathbf{c}_1$  містить невідомі значення часткових ємностей силового кабеля,  $\mathbf{c}_1 = [C_{AB} C_{BC} C_{AC} C_{AG} C_{BG} C_{CG}]^T$ , вектор  $\mathbf{b}_1$  містить отримані результати сукупних вимірювань електричної ємності із застосуванням усіх перелічених на рис. 2 схем дослідження,  $\mathbf{b}_1 = [C_A C_B C_C C_{A,B} C_{B,C} C_{A,C} C_{ABC,G}]^T$ , матриця  $\mathbf{A}_1$  визначається відповідно із:

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

Через те, що система рівнянь для визначення часткових ємностей згідно із (1) враховує всі можливі схеми обстеження, матриця  $\mathbf{A}_1$  містить усі коефіцієнти, що відповідають цим схемам. Тому інші можливі способи формування системи рівнянь для визначення часткових ємностей можуть бути отримані, приймаючи за основу (1). Так, у випадку, коли обстеження передбачає проведення 3 вимірювань за схемою дослідження на рис. 2а, а також 3 вимірювань за схемою дослідження на рис. 2в, невідомі часткові ємності визначаються згідно із системою рівнянь (3):

$$\mathbf{A}_2 \mathbf{c}_1 = \mathbf{b}_2, \quad (3)$$

де вектор  $\mathbf{b}_2$  містить отримані результати сукупних вимірювань електричної ємності,  $\mathbf{b}_2 = [C_A C_B C_C C_{A,B} C_{B,C} C_{A,C}]^T$ , а матриця  $\mathbf{A}_2$  містить усі коефіцієнти  $\mathbf{A}_1$ , крім її останнього рядка:

$$\mathbf{A}_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Визначення часткових ємностей із системи рівнянь (3) засноване на застосуванні схем обстеження, наведених на рис. 2а та 2в. Водночас

часткові ємності також можуть бути визначені із застосуванням схеми обстеження, що наведена на рис. 2б, та різних комбінацій зі схем на рис. 2а та 2в. Два із можливих варіантів формування системи рівнянь наведено у виразах (5) та (6):

$$\mathbf{A}_3 \mathbf{c}_1 = \mathbf{b}_3, \quad (5)$$

$$\mathbf{A}_4 \mathbf{c}_1 = \mathbf{b}_4. \quad (6)$$

У виразах (5) та (6)  $\mathbf{b}_3 = [C_A C_B C_{ABC,G} C_{A,B} C_{B,C} C_{A,C}]^T$ ,  $\mathbf{b}_4 = [C_A C_B C_C C_{A,B} C_{B,C} C_{ABC,G}]^T$ , а матриці  $\mathbf{A}_3$  та  $\mathbf{A}_4$  визначаються згідно із:

$$\mathbf{A}_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (7)$$

$$\mathbf{A}_4 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}. \quad (8)$$

При вирішенні невизначеної системи рівнянь за методом псевдооберненої матриці розглядалася система рівнянь (9):

$$\mathbf{A}_5 \mathbf{c}_1 = \mathbf{b}_5, \quad (9)$$

де  $\mathbf{b}_5 = [C_A C_B C_C C_{A,B} C_{B,C}]^T$ , а елементи матриці  $\mathbf{A}_5$  визначаються згідно із:

$$\mathbf{A}_5 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix}. \quad (10)$$

Типові результати вимірювання наведені в табл. 1. Усі вимірювання проводились із використанням вимірювача імітансу E7 – 14 у режимі визначення середнього із 10 результатів вимірювань.

### 4. Результати визначення часткових ємностей ізольованих проміжків

У табл. 2–3 наведено результати визначення часткових ємностей із врахуванням розширеної невизначеності вимірювань, яку для значень часткових ємностей, визначених при вирішенні систем рівнянь (3, 5, 6), було розраховано за величини коефіцієнта охоплення  $k = 2$ , при припущенні про відсутність взаємної кореляції між результатами

Таблиця 1

## Результати обстеження трьохжильного силового кабеля

Схема обстеження	Електрична ємність, пФ		
	0,1 кГц	1 кГц	10 кГц
$C_C$	890,3	881,98	868,21
$C_B$	915	905,3	890,72
$C_A$	930	921,1	906,15
$C_{ABC\_G}$	1734	1717,6	1690
$C_{B\_C}$	1472	1458,3	1434,9
$C_{A\_B}$	1507	1492,6	1468,25
$C_{A\_C}$	1488	1474,1	1450,55

Таблиця 2

## Результати визначення часткових ємностей для даних у таблиці (2) при частоті 10 кГц

Матриця системи рівнянь	$C_{AB}$ , пФ	$C_{BC}$ , пФ	$C_{AC}$ , пФ	$C_{AG}$ , пФ	$C_{BG}$ , пФ	$C_{CG}$ , пФ
$A_1$	164±65	161,7±65	161,6±65	580,3±65	564,8±65	544,7±65
$A_2$	164,3±3,1	162±3	161,9±3,1	579,9±3,7	564,4±3,7	544,3±3,7
$A_3$	164,3±3,1	161,3±5,8	161,2±5,9	580,6±5,9	565,1±6	544,3±3,7
$A_4$	164,3±3,1	162±3	161,2±5,6	580,6±5,9	564,4±5,9	545±3,7
$A_5$	164,3	162	482,7	259,2	564,4	223,5

Таблиця 3

## Результати визначення часткових ємностей для даних у таблиці (2) при частоті 0,1 кГц

Матриця системи рівнянь	$C_{AB}$ , пФ	$C_{BC}$ , пФ	$C_{AC}$ , пФ	$C_{AG}$ , пФ	$C_{BG}$ , пФ	$C_{CG}$ , пФ
$A_1$	168,5±68	166,2±68	165,7±68	595,5±68	580±68	558,2±68
$A_2$	169±3,3	166,7±3,2	166,1±3,3	594,8±3,9	579,3±3,9	557,5±3,9
$A_3$	169±3,3	165,5±6,1	165±6,1	596±6,2	580,5±6,2	557,5±3,9
$A_4$	169±3,3	166,7±3,2	165±5,8	596±6	579,3±6	558,6±3,9
$A_5$	169	166,7	494,9	266,1	579,3	228,8

вимірювання сукупних ємностей із застосуванням наведених на рис. 2 схем обстеження та при врахуванні лише стандартних невизначеностей типу В для компонент векторів  $b_2$ ,  $b_3$  та  $b_4$ . Для даних, визначених при вирішенні системи рівнянь (1), значення розширеної невизначеності вимірювань наведено за рівня довіри  $p = 0,8$ .

При порівнянні даних, наведених у табл. 2–3, можна зробити висновки, що в цьому випадку отримані з використанням методу найменших квадратів для мінімізації середньоквадратичної похибки розв'язання перевизначеної системи рівнянь (матриця  $A_1$ ) та при безпосередньому вирішенні системи рівнянь (матриці  $A_2...A_4$ ) результати відрізняються несуттєво.

Збільшення частоти прикладеної напруги призводить до зменшення визначених значень електричної ємності внаслідок частотної залежності

діелектричної проникності матеріалу ізоляції. Водночас видно, що зменшення електричної ємності відбувається нерівномірно для ізоляційних проміжків між жилами силового кабеля та між його жилами й оболонкою. Збільшення діелектричної проникності зазвичай відбувається за рахунок наявності видів поляризації, що мають достатньо великий час встановлення у порівнянні з видами поляризації, що характерні для неполярних діелектриків. Через порівняно великий час встановлення поляризації для матеріалів з великими значеннями діелектричної проникності та, відповідно, великими значеннями тангенса кута діелектричних втрат частотна залежність діелектричної проникності в таких діелектриках є більш вираженою у порівнянні з матеріалами із меншими значеннями діелектричної проникності. Таким чином, зазначена нерівномірність зменшення електричної ємності

зі зростанням частоти є непрямым свідченням того, що ізоляція ізоляційних проміжків між жилами та оболонкою кабеля характеризується більшими значеннями тангенса кута діелектричних втрат у порівнянні з ізоляцією між жилами силового кабеля, тобто є більш зістареною.

## **5. Висновки**

Результати визначення часткових ємностей, отримані з використанням методу найменших квадратів, узгоджуються із результатами, отриманими при безпосередньому вирішенні системи

рівнянь. Результати визначення часткових ємностей при вирішенні невизначеної системи рівнянь за методом псевдооберненої матриці призводять до суттєвих похибок при їх оцінюванні. Частотну залежність електричної ємності ізоляційних проміжків між жилами силового кабеля та між його жилою й оболонкою може бути використано для порівняння якості електричної ізоляції цих ізоляційних проміжків. Більш виражена частотна залежність електричної ємності ізоляційного проміжку та, відповідно, діелектричної проникності може свідчити про зниження якості ізоляції.

# **Особенности оценивания частичных емкостей изоляции трехжильных силовых кабелей с использованием совокупных измерений**

**И. А. Костюков**

*Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", ул. Кирпичева, 2, 61002, Харьков, Украина  
iakostiukow@gmail.com*

## **Аннотация**

Рассмотрены особенности определения значений частных емкостей изоляционных промежутков трехжильных силовых кабелей с бумажной изоляцией при различных способах формирования и решения системы линейных алгебраических уравнений. Приведены возможные способы обследования изоляции трехжильных кабелей при определении значений частных емкостей с применением совокупных измерений, состоящие в различных возможных способах подключения измерителя иммитанса к исследуемому образцу трехжильного силового кабеля. Рассмотрено определение частичных емкостей при непосредственном решении системы линейных алгебраических уравнений, при минимизации среднеквадратичной погрешности решения переопределенной системы уравнений по методу наименьших квадратов, а также при поиске нормального решения неопределенной системы уравнений.

**Ключевые слова:** среднеквадратичная погрешность; метод наименьших квадратов; диэлектрические потери; диэлектрическая проницаемость.

# **Particular properties of estimation of partial capacitances of insulation of three core power cables by applying aggregate measurements**

**I. Kostiukov**

*National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kyrpychova Str., 2, 61002, Kharkiv, Ukraine  
iakostiukow@gmail.com*

## **Abstract**

This paper presents a description of specific properties of determining the values of partial capacitances of insulation gaps in power cables with paper insulation for various ways of forming and solving the system of linear algebraic equations. Possible ways of inspection the insulation of three core power cables for the estimation of values of partial capacitances by applying aggregate measurements which are based on various ways of connection of emittance meter to tested sample of

power cable are given. Estimation of partial capacitances by the direct solution of a system of linear algebraic equations, by minimizing the root mean square error of solving an overdetermined system of equations by the least squares method, as well as by finding a normal solution of an indefinite system of equations by the pseudo-inverse matrix, is also considered. It is shown that minimization of the root mean square error by the least squares method and the direct solution of system of equations show quite similar results for the case of estimation of partial capacitances by means of aggregate measurements, at the same time the solution of an indefinite system of equations by the method of a pseudo-inverted matrix allows to reproduce rather accurately only 3 out of 6 values of partial capacitances. The uneven effect of frequency on the electrical capacitance of the insulation gaps between the cores of the power cable and between its cores and the sheath is shown. It was proposed to use the frequency dependence of the electrical capacitance of insulation gaps as an informative parameter about the technical state of insulating gaps between the cores of the power cable and between its cores and its sheath.

**Keywords:** root mean square error; least squares method; system of linear algebraic equations; dielectric losses; dielectric permittivity.

### Список літератури

- Xiaoli Zhou, Yong Qian, Muqing Liu. The Application of Partial Discharge Detection for the condition assessment of XLPE Power Cables. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2012, vol. 88, no. 6, pp. 313–316.
- Беспрозванных А.В. Физическая интерпретация кривых восстанавливающегося напряжения на основе схем замещения неоднородного диэлектрика. *Технічна електродинаміка*. 2009. № 6. С. 23–27.
- Zaengl W.S. Dielectric spectroscopy in time and frequency domain for HV power equipment. Part I. Theoretical considerations. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 2003, vol. 19, issue 5, pp. 5–19. doi: 10.1109/MEI.2003.1238713
- Беспрозванных А.В., Москвитин Е.С., Кесаев А.Г. Абсорбционные характеристики фазной и поясной бумажно-пропитанной изоляции силовых кабелей на постоянном напряжении. *Електротехніка і Електромеханіка*. 2015. № 5. С. 63–68.
- Москвитин Е.С. Контроль процессов старения силовых кабелей с бумажно-пропитанной изоляцией по измерениям диэлектрических характеристик изоляционных промежутков. *Вісник НТУ «ХПИ»*. 2011. № 3. С. 95–106.
- Беспрозванных А.В. Диэлектрическое сканирование поперечной структуры многожильных кабелей методом совокупных измерений. *Технічна електродинаміка*. 2008. № 3. С. 30–36.
- Володарський Є.Т., Кухарчук В.В., Поджаренко В.О., Сердюк Г.Б. Метрологічне забезпечення вимірювань і контролю: навчальний посібник. Вінниця: ВДТУ, 2001. 219 с.
- Сизиков В.С. Устойчивые методы обработки результатов измерений. Санкт-Петербург: Специальная Литература, 1999. 240 с.
- Besprozvannykh A.V. Fizicheskaya interpretaciya krivyh vosstanavlivayushhegosya napryazheniya na osnove shem zameshheniya neodnorodnogo dielektrika [Physical interpretation of the recovery voltage curves based on equivalent schemes of a non-uniform dielectric]. *Tekhnichna Elektrodynamika*, 2009, no. 6, pp. 23–27 (in Russian).
- Zaengl W.S. Dielectric spectroscopy in time and frequency domain for HV power equipment. Part I. Theoretical considerations. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 2003, vol. 19, issue 5, pp. 5–19. doi: 10.1109/MEI.2003.1238713
- Besprozvannykh A.V., Moskvitin E.S., Kesaev A.G. Absorbtsionnye harakteristiki faznoj i pojasnoj bumazhno-propitannoj izolyacii silovyh kabelej na postoyannom napryazhenii [The absorption characteristics of the phase and zone paper-impregnated insulation of power cable at direct voltage]. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2015, no. 5, pp. 63–68 (in Russian).
- Moskvitin E.S. Kontrol processov stareniya silovyh kabelej s bumazhno-propitannoj izolyaciej po izmereniyam dielektricheskikh harakteristik izolyacionnyh promezhutkov [Control of processes of power cables with paper impregnated insulation aging by measurements of dielectric properties of insulation layers]. *Bulletin of NTU KhPI*, 2011, no. 3, pp. 95–106 (in Russian).
- Besprozvannykh A.V. Dielektricheskoe skaniruvanie poperechnoj struktury mnogozhilnyh kabelej metodom sovokupnyh izmerenij [Dielectric scanning of the transverse structure of multicore cables using the cumulative measurement method]. *Tekhnichna Elektrodynamika*, 2008, no. 3, pp. 30–36 (in Russian).
- Volodarskyi Ye.T., Kukharchuk V.V., Podzharenko V.O., Serdiuk G.B. Metrolohichne zabezpechennia vymiriuvan i kontroliu: navchalnyi posibnyk [Metrological support of measurements and control: tutorial]. Vinnytsia, VDTU Publ., 2001. 219 p. (in Ukrainian).
- Sizikov V.S. Ustojchivye metody obrabotki rezultatov izmerenij [Robust methods of processing measurement results]. St. Petersburg, Special Literature Publ., 1999. 240 p. (in Russian).

### References

- Xiaoli Zhou, Yong Qian, Muqing Liu. The Application of Partial Discharge Detection for the condition assessment of XLPE Power Cables. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2012, vol. 88, no. 6, pp. 313–316.
- Besprozvannykh A.V. Fizicheskaya interpretaciya krivyh vosstanavlivayushhegosya napryazheniya na osnove shem zameshheniya neodnorodnogo dielektrika [Physical interpretation of the recovery voltage curves based on equivalent schemes of a non-uniform dielectric]. *Tekhnichna Elektrodynamika*, 2009, no. 6, pp. 23–27 (in Russian).
- Zaengl W.S. Dielectric spectroscopy in time and frequency domain for HV power equipment. Part I. Theoretical considerations. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 2003, vol. 19, issue 5, pp. 5–19. doi: 10.1109/MEI.2003.1238713
- Besprozvannykh A.V., Moskvitin E.S., Kesaev A.G. Absorbtsionnye harakteristiki faznoj i pojasnoj bumazhno-propitannoj izolyacii silovyh kabelej na postoyannom napryazhenii [The absorption characteristics of the phase and zone paper-impregnated insulation of power cable at direct voltage]. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2015, no. 5, pp. 63–68 (in Russian).
- Moskvitin E.S. Kontrol processov stareniya silovyh kabelej s bumazhno-propitannoj izolyaciej po izmereniyam dielektricheskikh harakteristik izolyacionnyh promezhutkov [Control of processes of power cables with paper impregnated insulation aging by measurements of dielectric properties of insulation layers]. *Bulletin of NTU KhPI*, 2011, no. 3, pp. 95–106 (in Russian).
- Besprozvannykh A.V. Dielektricheskoe skaniruvanie poperechnoj struktury mnogozhilnyh kabelej metodom sovokupnyh izmerenij [Dielectric scanning of the transverse structure of multicore cables using the cumulative measurement method]. *Tekhnichna Elektrodynamika*, 2008, no. 3, pp. 30–36 (in Russian).
- Volodarskyi Ye.T., Kukharchuk V.V., Podzharenko V.O., Serdiuk G.B. Metrolohichne zabezpechennia vymiriuvan i kontroliu: navchalnyi posibnyk [Metrological support of measurements and control: tutorial]. Vinnytsia, VDTU Publ., 2001. 219 p. (in Ukrainian).
- Sizikov V.S. Ustojchivye metody obrabotki rezultatov izmerenij [Robust methods of processing measurement results]. St. Petersburg, Special Literature Publ., 1999. 240 p. (in Russian).