

*І. О. КОСТЮКОВ, Б. І. КУБРИК, С. А. ЛИТВИНЕНКО, О. В. ЛАВРІНЕНКО, Є. В. СИЗОВ*

### ДОСЛІДЖЕННЯ КОРЕЛЯЦІЇ МІЖ ПАРАМЕТРАМИ ДІЕЛЕКТРИЧНОЇ АБСОРБЦІЇ ПРИ ОБСТЕЖЕННІ ІЗОЛЯЦІЇ ТРЬОХЖИЛЬНИХ СИЛОВИХ КАБЕЛІВ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ СУКУПНИХ ВИМІРЮВАНЬ

Стаття присвячена дослідженню кореляційних зв'язків між результатами вимірювань сукупних значень електричної ємності та тангенса кута діелектричних втрат ізоляції трьохжильних силових кабелів з паперовою імпрегнованою ізоляцією в спільній металевій оболонці. За результатами проведених розрахунків показано, що при оцінюванні невизначеностей вимірювань параметрів діелектричної абсорбції із застосуванням сукупних вимірювань кореляційні зв'язки між сукупними значеннями електричної ємності та тангенса кута діелектричних втрат можна не враховувати.

**Ключові слова:** паперова імпрегнована ізоляція, часткові ємності, тангенс кута діелектричних втрат, невизначеність вимірювань, поляризація.

*I. KOSTIUKOV, B. KUBRYK, S. LYTVYNYENKO, O. LAVRINENKO, E. SIZOV*

### STUDY OF CORRELATION BETWEEN THE PARAMETERS OF DIELECTRIC ABSORPTION WHEN DIAGNOSTICS OF INSULATION OF THREE-CORE POWER CABLES BY APPLYING AGGREGATE MEASUREMENTS

Three-core power cables with paper-impregnated insulation in a common metal sheath contain several layers of dielectric formed by phase and belt insulation between the cores and the sheath. When diagnosing the technical condition of the insulation of such cables according to the parameters of electrical capacity and  $\operatorname{tg} \delta$ , the problem of experimental determination of individual parameters for each of the insulation layers of the power cable arises. When evaluating the individual values of the dielectric absorption parameters of each of the insulating layers in three-wire power cables by applying aggregate measurements, the formation of a system of equations can be carried out in two different ways. In the first case, the unknown values of the capacitance and  $\operatorname{tg} \delta$  of each of the 6 insulating layers (of which 3 are formed by the insulation layers between the cores of the power cable and 3 dielectric layers between each of the cores and the sheath) are directly determined by solving a system of 6 linear algebraic equations. In the second case, the individual parameters of the dielectric are determined by minimizing the root-mean-square error of solving the redefined system of equations using the method of least squares. According to the results of the calculations, it is shown that when evaluating the uncertainties of dielectric absorption parameters using aggregate measurements, the correlations between the aggregate values can be disregarded.

**Keywords:** paper impregnated insulation, partial capacitances, dielectric dissipation factor, uncertainty of measurements, polarization.

**Вступ.** Значення електричної ємності та відповідні рівні тангенса кута діелектричної втрат ( $\operatorname{tg} \delta$ ) ізоляції досить часто використовуються в практиці визначення технічного стану силових кабелів та іншого електротехнічного обладнання після тривалої експлуатації під дією різноманітних руйнуючих факторів [1-4]. Обидва параметри є чутливими до ступеню зволоження ізоляції та рівня часткових розрядів. При цьому параметр  $\operatorname{tg} \delta$  також демонструє суттєву кореляцію з механічними характеристиками паперової ізоляції силових кабелів [5]. Трьохжильні силові кабелі з паперовою імпрегнованою ізоляцією в спільній металевій оболонці містять декілька шарів діелектрика, що утворені фазною та поясною ізоляцією між жилами та оболонкою. При діагностиці технічного стану ізоляції таких кабелів за параметрами електричної ємності та  $\operatorname{tg} \delta$  виникає задача експериментального визначення індивідуальних параметрів для кожного з шарів ізоляції силового кабелю [6]. Зазначена задача може бути вирішена шляхом використання вимірювачів імпедансу із двома, або трьома клемми. Застосування вимірювачів імпедансу із трьома клемми дозволяє усунути негативний вплив паразитних ємностей досліджуваного шару ізоляції та проводити прямі вимірювання параметрів діелектрика. В той же час, при використанні вимірювачів імпедансу із двома клемми невідомі значення електричної ємності та  $\operatorname{tg} \delta$  визначаються шляхом застосування сукупних вимірювань. Таким чином, заснований на застосуванні сукупних вимірювань підхід до визначення індивідуальних значень кожного з

шарів ізоляції в трьохжильних силових кабелях дозволяє застосовувати дещо спрощені засоби вимірювання, проте характеризується збільшеною трудомісткістю, оскільки вимагає декількох вимірювань сукупних значень електричної ємності та  $\operatorname{tg} \delta$ , що виконуються із застосуванням різних способів з'єднання жил та оболонки силового кабелю.

При оцінюванні індивідуальних значень параметрів діелектричної абсорбції кожного з ізоляційних прошарків в трьохжильних силових кабелях шляхом застосування сукупних вимірювань формування системи рівнянь можна проводити двома різними способами. В першому випадку невідомі значення ємності та  $\operatorname{tg} \delta$  кожного з 6 ізоляційних прошарків (з яких 3 утворено шарами ізоляції між жилами силового кабелю та 3 шарами діелектрика між кожною з жил та оболонкою) безпосередньо визначаються шляхом вирішення системи з 6 лінійних алгебраїчних рівнянь. В другому випадку індивідуальні параметри діелектрика визначаються шляхом мінімізації середньоквадратичної похибки вирішення перерозв'язаної системи рівнянь за методом найменших квадратів. Безпосереднє визначення параметрів діелектричної абсорбції шляхом прямого вирішення системи лінійних алгебраїчних рівнянь вимагає проведення меншої кількості вимірювань і, таким чином, спрощує обстеження ізоляції кабелів. Недоліком такого методу контролю технічного стану ізоляції є можливий негативний вплив похибок вимірювання сукупних значень електричної ємності та  $\operatorname{tg} \delta$  на точність визначення

індивідуальних параметрів діелектричної абсорбції шарів ізоляції в трьохжильних кабелях. Зазначена обставина зумовлює необхідність коректного розрахунку невизначеностей при оцінюванні параметрів ізоляції на основі застосування сукупних вимірювань. У випадку прямого вирішення системи рівнянь, без застосування методу найменших квадратів, оцінювання невизначеностей сукупних вимірювань проводять у відповідності із методами, що застосовуються в практиці обробки результатів непрямих вимірювань. В той же час, вибір методу розрахунку невизначеностей непрямих вимірювань залежить від існування кореляційних зв'язків між параметрами, що визначають результат вимірювання фізичної величини [7]. Зазначена обставина зумовлює актуальність дослідження кореляційних зв'язків між результатами вимірювань сукупних значень електричної ємності та  $\text{tg}\delta$ , за допомогою яких проводять визначення індивідуальних параметрів діелектричної абсорбції шарів ізоляції в трьохжильних силових кабелях з паперовою імпрегрованою ізоляцією.

**Мета статті** полягає в дослідженні існування кореляційних зв'язків між результатами вимірювань сукупних значень електричної ємності та  $\text{tg}\delta$  при різних способах з'єднання струмопровідних елементів конструкції трьохжильних силових кабелів з паперовою імпрегрованою ізоляцією, що дає можливість вибору коректного методу розрахунку невизначеностей при оцінюванні індивідуальних параметрів діелектричної абсорбції із застосуванням сукупних вимірювань.

**Результати вимірювань сукупних значень параметрів діелектричної абсорбції та розрахунків їх коефіцієнтів кореляції.** Коефіцієнти кореляції були розраховані по відношенню до сукупних значень ємності та  $\text{tg}\delta$ , які вимірювались із застосуванням схем з'єднання електропровідних елементів конструкції кабелю, що зазвичай використовуються в практиці контролю ізоляції трьохжильних силових кабелів із застосуванням сукупних вимірювань [8]:

- «жила проти двох інших жил та оболонки». За такого способу з'єднання електропровідних елементів конструкції тестова напруга послідовно прикладається між кожною із жил силового кабелю та з'єднаною з двома іншими жилами оболонкою. В подальшому результати вимірювань сукупних значень електричної ємності та  $\text{tg}\delta$  при подачі тестової напруги між жилами  $A$  та з'єднаними з оболонкою жилами  $B$  і  $C$  будуть позначатись  $C_A$  та  $\text{tg}\delta_A$ . Схема з'єднання електропровідних елементів «жила проти двох інших жил та оболонки» загалом дозволяє виміряти сукупні значення ємності  $C_A$ ,  $C_B$ ,  $C_C$  та відповідні сукупні значення  $\text{tg}\delta_A$ ,  $\text{tg}\delta_B$ ,  $\text{tg}\delta_C$ ;

- «дві жили проти жили та оболонки». В цьому випадку тестова напруга послідовно прикладається між двома з'єднаними між собою жилами кабелю та з'єднаною з оболонкою третьою жилою. При подачі тестової напруги між з'єднаними між собою жилами  $A$  і  $B$  та з'єднаною з оболонкою жилою  $C$  силового кабелю результати вимірювань ємності та  $\text{tg}\delta$  будуть позначатись  $C_{A-B}$  та  $\text{tg}\delta_{A-B}$ . Застосування схеми з'єднання: ««дві жили проти третьої жили та оболонки» загалом дозволяє визначити 3 сукупні значення електричної ємності:  $C_{A-B}$ ,  $C_{B-C}$ ,  $C_{A-C}$  а також відповідні 3 сукупні значення  $\text{tg}\delta$ :  $\text{tg}\delta_A$ ,

$\text{tg}\delta_{B-C}$ ,  $\text{tg}\delta_{A-C}$ . При дослідженні кореляційних зв'язків між сукупними результатами вимірювань параметрів діелектричної абсорбції дослідження проводились із використанням відрізка силового кабелю ААШв 6-3×150. На рис. 1 – рис. 4 наведено результати повторних вимірювань сукупних значень електричної ємності та  $\text{tg}\delta$  досліджуваного зразка силового кабелю, що проводились за частоти прикладеної напруги 1 кГц із застосуванням цифрового вимірювача імпедансу DE-5000.

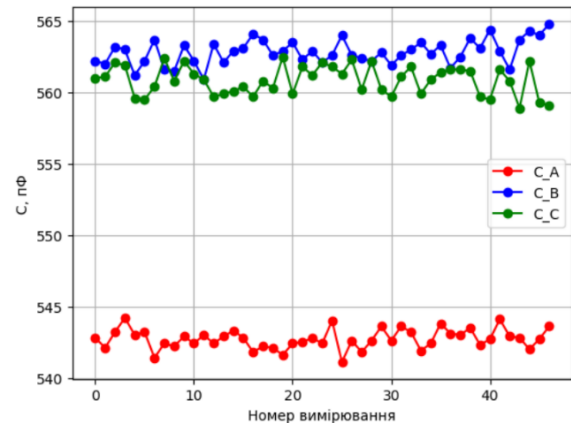


Рис. 1. Результати повторних вимірювань сукупних значень електричної ємності при застосуванні схеми обстеження: «жила проти двох інших жил та оболонки»

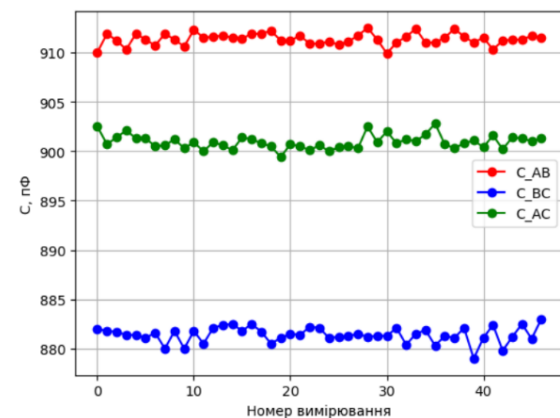


Рис. 2. Результати повторних вимірювань сукупних значень електричної ємності при застосуванні схеми обстеження: «дві жили проти жили та оболонки»

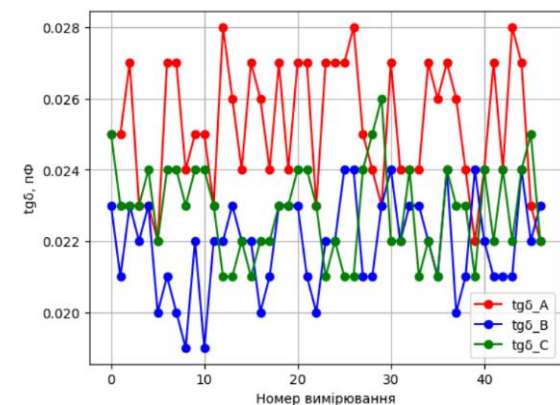


Рис. 3. Результати повторних вимірювань сукупних значень  $\text{tg}\delta$  при застосуванні схеми обстеження: «жила проти двох інших жил та оболонки»

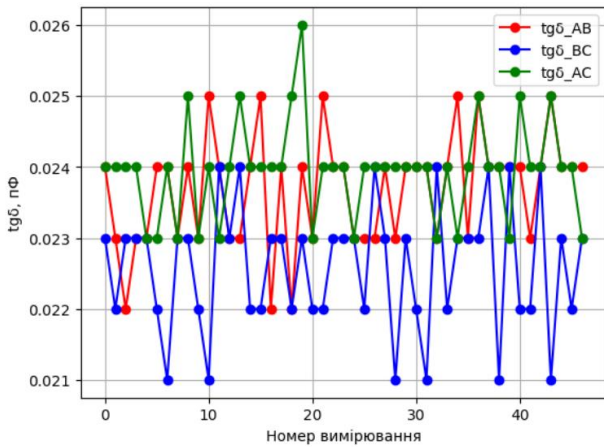


Рис. 4. Результати повторних вимірювань сукупних значень tgδ при застосуванні схеми обстеження: «дві жили проти жили та оболонки»

При визначенні часткових ємностей між жилами А, В і С трьохжильних силових кабелів в спільній металевій оболонці їх невідомі значення розраховуються із використанням виразів:

$$C_{AB} = 0.5C_A + 0.5C_B - 0.5C_{A\_B}, \quad (1)$$

$$C_{BC} = 0.5C_B + 0.5C_C - 0.5C_{B\_C}, \quad (2)$$

$$C_{AC} = 0.5C_A + 0.5C_C - 0.5C_{A\_C}. \quad (3)$$

Приймаючи до уваги вирази (1-3) при дослідженні кореляційних зв'язків були розраховані коефіцієнти кореляції між сукупними значеннями електричної ємності, що визначають часткові ємності  $C_{AB}$ ,  $C_{BC}$  та  $C_{AC}$ . Результати розрахунків зазначених коефіцієнтів кореляції наведено в Табл. 1 – Табл. 3. Крім того, враховуючи, що при застосуванні сукупних вимірювань рівні tgδ визначаються шляхом вирішення системи рівнянь, що містять результати вимірювань сукупних значень tgδ із коефіцієнтами, що залежать від результатів визначення часткових ємностей ізоляції кабелю, також були розраховані коефіцієнти кореляції між сукупними значеннями електричної ємності та tgδ. Результати розрахунків цих коефіцієнтів кореляції наведено в табл. 4.

Таблиця 1 – Результати розрахунків коефіцієнтів кореляції між результатами вимірювань сукупних значень електричної ємності, що дозволяють визначити часткову ємність  $C_{AB}$

	$C_A$	$C_B$	$C_{AB}$
$C_A$	1	-0.1	-0.23
$C_B$	-0.1	1	-0.04
$C_{AB}$	-0.23	-0.04	1

Таблиця 2 – Результати розрахунків коефіцієнтів кореляції між результатами вимірювань сукупних значень електричної ємності, що дозволяють визначити часткову ємність  $C_{BC}$

	$C_B$	$C_C$	$C_{BC}$
$C_B$	1	-0.24	0.25
$C_C$	-0.24	1	-0.11
$C_{BC}$	0.25	-0.11	1

Таблиця 3 – Результати розрахунків коефіцієнтів кореляції між результатами вимірювань сукупних значень електричної ємності, що дозволяють визначити часткову ємність  $C_{AC}$

	$C_A$	$C_C$	$C_{AC}$
$C_A$	-	0.08	0.28
$C_C$	0.08	-	-0.09
$C_{AC}$	0.28	-0.09	-

Таблиця 4 – Результати розрахунків коефіцієнтів кореляції між результатами одночасних вимірювань сукупних значень електричної ємності та tgδ

	tgδ <sub>A</sub>	tgδ <sub>B</sub>	tgδ <sub>C</sub>	tgδ <sub>AB</sub>	tgδ <sub>BC</sub>	tgδ <sub>AC</sub>
$C_A$	-0.24	-	-	-	-	-
$C_B$	-	0.16	-	-	-	-
$C_C$	-	-	0.14	-	-	-
$C_{AB}$	-	-	-	-0.03	-	-
$C_{BC}$	-	-	-	-	-0.23	-
$C_{AC}$	-	-	-	-	-	-0.14

При оцінюванні статистичної значимості наведених в табл. 1 – табл. 4 коефіцієнтів кореляції було використано  $t$  – критерій за рівня значимості  $\alpha = 0.05$ . За прийнятого рівня значимості та об'єму вибірки, що складає  $n = 47$  критичне значення  $t$  – критерію становить:  $t_{кр} = 2.014$ ,

Для наведених в табл. 1 – табл. 4 коефіцієнтів кореляції результати розрахунків емпіричних значень  $t$  – критеріїв наведено в табл. 5 – табл. 8.

Таблиця 5 – Абсолютні емпіричні значення  $t$  – критеріїв для наведених в Таблиці 4 коефіцієнтів кореляції

	tgδ <sub>A</sub>	tgδ <sub>B</sub>	tgδ <sub>C</sub>	tgδ <sub>AB</sub>	tgδ <sub>BC</sub>	tgδ <sub>AC</sub>
$C_A$	1.66	-	-	-	-	-
$C_B$	-	1.08	-	-	-	-
$C_C$	-	-	0.94	-	-	-
$C_{AB}$	-	-	-	0.2	-	-
$C_{BC}$	-	-	-	-	1.58	-
$C_{AC}$	-	-	-	-	-	0.94

Таблиця 6 – Абсолютні емпіричні значення  $t$  – критеріїв для наведених в таблиці 1 коефіцієнтів кореляції

	$C_A$	$C_B$	$C_{AB}$
$C_A$	-	0.67	1.58
$C_B$	0.67	-	0.26
$C_{AB}$	1.58	0.26	-

Таблиця 7 – Абсолютні емпіричні значення  $t$  – критеріїв для наведених в таблиці 2 коефіцієнтів кореляції

	$C_B$	$C_C$	$C_{BC}$
$C_B$	-	1.65	1.73
$C_C$	1.65	-	0.74
$C_{BC}$	1.73	0.74	-

Таблиця 8 – Абсолютні емпіричні значення  $t$  – критеріїв для наведених в Таблиці 3 коефіцієнтів кореляції

	$C_A$	$C_C$	$C_{AC}$
$C_A$	-	0.53	1.96
$C_C$	0.53	-	0.06
$C_{AC}$	1.96	0.6	-

**Обговорення результатів.** Жодне з наведених в табл. 5 – табл. 8 емпіричних значень  $t$  – критеріїв не перевищує його критичний рівень, що складає:  $t_{кр} =$

2.014. Зазначена обставина дозволяє зробити висновок при відсутності статистично значимої кореляції між наведеними результатами вимірювань. Суттєво відзначити, що врахування впливу кореляційних зв'язків на метод розрахунку невизначеності непрямих вимірювань, зазвичай, проводять при одночасному визначенні параметрів, що зумовлюють результат вимірювання фізичної величини. Для наведених на рис. 1 та рис.2 сукупних значень електричної ємності зазначена умова не виконувалась. В той же час, навіть за відсутності статистично значимої кореляції між сукупними значеннями ємності дисперсія результатів визначення часткових ємностей із застосуванням сукупних вимірювань визначається кореляційними зв'язками між сукупними значеннями електричної ємності. В свою чергу, відсутність кореляції між результатами одночасних вимірювань ємності та  $\text{tg}\delta$  свідчить про те, що флуктуації результатів вимірювань не пов'язані з процесами електропровідності чи поляризації в досліджуваному об'єкті контролю та зумовлені процесами у використаному засобі вимірювання.

**Висновки.** Для наведених в статті результатів вимірювань не встановлено статистично значимої кореляції між параметрами діелектричної абсорбції. Зазначену обставину необхідно враховувати для розрахунку невизначеностей вимірювань при прямому вирішенні систем рівнянь для визначення індивідуальних параметрів електричної ємності та  $\text{tg}\delta$  шарів ізоляції в трьохжильних силових кабелях в спільній металевій оболонці.

#### Список літератури

1. Neimanis, R., Saha, T., Eriksson, R. Determination of moisture content in mass impregnated cable insulation using low frequency dielectric spectroscopy. *Proc of 2000 Power Engineering Society Summer Meeting*. Seattle, USA, 2000, pp. 1-6 doi: 10.1109/PCESS.2000.867630
2. Zaengl, W. S. Dielectric spectroscopy in time and frequency domain for HV power equipment, Part 1: Theoretical considerations. *IEEE Electrical insulation magazine*. 2003. Vol. 19 No. 5. P. 5-19. doi: 10.15199/48.2015.08.18
3. 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: 10.20998/2074-272X.2020.2.08

4. Беспрозванных, А.В., Костюков, И.А. Характеристики корпусной электроизоляционной системы асинхронных электрических машин на резонансной частоте. *Технічна електродинаміка*. 2019. № 4. С. 48-55. doi: 10.15407/techned2019.04.048
5. Беспрозванных, А.В., Москвитин, Е.С. Критерии оценки степени старения силовых кабелей с бумажно-пропитанной изоляцией. *Електротехніка і електромеханіка*. 2013. № 4. С. 32 – 36.
6. Москвитин, Е.С. Контроль процессов старения силовых кабелей с бумажно-пропитанной изоляцией по измерению диэлектрических характеристик изоляционных промежутков. *Вісник НТУ «ХПИ»*. 2011. № 3. С. 95 – 106.
7. Захаров И.П., Кукуш В. Д. *Теория неопределенности в измерениях*. Х.: Консум, 2002. – 256 с.
8. Беспрозванных 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.

#### References (transliterated)

1. Neimanis, R., Saha, T., Eriksson, R. Determination of moisture content in mass impregnated cable insulation using low frequency dielectric spectroscopy. *Proc of 2000 Power Engineering Society Summer Meeting*. Seattle, USA, 2000, pp. 1-6 doi: 10.1109/PCESS.2000.867630
2. Zaengl, W. S. Dielectric spectroscopy in time and frequency domain for HV power equipment, Part 1: Theoretical considerations. *IEEE Electrical insulation magazine*. 2003. Vol. 19 No. 5. Pp. 5-19. doi: 10.15199/48.2015.08.18
3. Беспрозванных, А.В., Костюков, И.А. Метод вейвлет анализа временных рядов параметров диэлектрической абсорбции электроизоляционных конструкций. *Електротехніка і електромеханіка*. 2020. No. 2. Pp. 52 – 58. doi: 10.20998/2074-272X.2020.2.08
4. Беспрозванных, А.В., Костюков, И.А. Характеристики корпусной электроизоляционной системы асинхронных электрических машин на резонансной частоте. *Технічна електродинаміка*. 2019. No. 4. Pp. 48 – 55. doi: 10.15407/techned2019.04.048
5. Беспрозванных, А.В., Москвитин, Е.С. Критерии оценки степени старения силовых кабелей с бумажно-пропитанной изоляцией. *Електротехніка і електромеханіка*. 2013. No 4. Pp. 32 – 36.
6. Москвитин, Е.С. Контроль процессов старения силовых кабелей с бумажно-пропитанной изоляцией по измерению диэлектрических характеристик изоляционных промежутков. *Вісник НТУ «ХПИ»*. 2011. No 3. Pp. 95 – 106.
7. Zaharov I. P., Kukush V. D. *Teoriya neopredelennosti v izmereniyah*. X.: Konsum, 2002. 256 p.
8. Беспрозванных 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. No 5. Pp. 63 – 68

Надійшла (received) 17.11.24

#### Відомості про авторів / About the authors

**Костюков Іван Олександрович (Kostjukov Ivan Aleksandrovich)** – доктор технічних наук, завідувач кафедри теоретичних основ електротехніки, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8923-0579>; e-mail: [iakostiukow@gmail.com](mailto:iakostiukow@gmail.com).

**Кубрик Борис Іванович (Kubryk Borys Ivanovych)** – кандидат технічних наук, доцент кафедри теоретичних основ електротехніки, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; e-mail: [borys.kubryk@kphi.edu.ua](mailto:borys.kubryk@kphi.edu.ua).

**Литвиненко Світлана Анатолівна (Lytvynenko Svitlana)** – доктор філософії, доцент кафедри теоретичних основ електротехніки Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0818-2470>, e-mail: [lytvynenko.svitlana@kphi.edu.ua](mailto:lytvynenko.svitlana@kphi.edu.ua).

**Лавріненко Ольга Валеріївна (Lavrinenko Olga)** – кандидат історичних наук, доцент кафедри теоретичних основ електротехніки, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5274-3955>, e-mail: [lavrinenko.olga@kphi.edu.ua](mailto:lavrinenko.olga@kphi.edu.ua).

**Сизов Євгеній Вікторович (Syrov Yevhenii)** – аспірант кафедри теоретичних основ електротехніки, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; e-mail: [yevhenii.syzov@iee.kphi.edu.ua](mailto:yevhenii.syzov@iee.kphi.edu.ua).