

РОЗПОДІЛЕННЯ ЕЛЕКТРОСТАТИЧНОГО ПОЛЯ У НЕЕКРАНОВАНИХ СИЛОВИХ КАБЕЛЯХ З РІЗНОЮ КОНФІГУРАЦІЄЮ СТРУМОПРОВІДНИХ ЖИЛ

Г.В. Безпрозваних^{1*}, докт. техн. наук, Ю.Г. Гонтар^{1**}, канд. техн. наук, І.А. Пушкар^{2***}¹Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут",
вул. Кирпичова, 2, Харків, 61002, Україна,²Науково-виробниче підприємство «Алай»,
пр. Відрадий, 95 А2, офіс 202, Київ, 03061, Україна.E-mail: Hanna.Bezprozvannukh@khpi.edu.ua; Yuliia.gontar@khpi.edu.ua; ihor.pushkar@icee.khpi.edu.ua.

Вступ. Атомна енергетика є незаперечним компонентом у складі зеленої енергетики і визначає вагомий внесок у досягнення цілей сталого розвитку та підвищення енергетичної безпеки країни. Це надійне та передбачуване прогнозоване джерело електроенергії до 60 років з середньою вартістю виробленої енергії 0,4 євро/кВт·год.

Проблема. Атомні електростанції складаються з різних зон, які відрізняються температурою навколишнього середовища, рівнем радіації, вимогами щодо перевірки стійкості до аварій. Кабелі для атомних електричних станцій знаходяться під постійним впливом складних умов протягом усього терміну експлуатації і повинні забезпечувати надійне енергопостачання, відповідати вимогам екологічної безпеки та економічній ефективності. Впровадження сучасних інноваційних полімерних композицій потребує всебічного аналізу впливу електричної ізоляції на електричні параметри кабелів різного конструктивного виконання на стадії їх проектування та виробництва щодо забезпечення високого рівня експлуатаційної функціональності на АЕС.

Мета роботи полягає в аналізі розподілення електростатичного поля навколо ізольованих струмопровідних жил різної конфігурації з визначенням їх електричної ємності у силових неекраниваних кабелях систем локального живлення турбінного відсіку атомних електричних станцій. **Методика** ґрунтується на визначенні густини електричного заряду методом вторинних джерел на підставі інтегральних рівнянь Фредгольма першого та другого роду в моделях неекраниваних силових кабелів з секторними та круглими струмопровідними жилами. **Наукова новизна.** Визначено розподілення плоско-паралельного електростатичного поля в неекраниваних силових кабелях в залежності від схеми прикладання електричного потенціалу (нульового і ненульового, рівного 1000 В) до струмопровідних жил різної конфігурації. Доведено, що у силовому кабелі з жилами однакової конфігурації за умови створення дипольного розподілення електростатичного поля електричні ємності між жилами мають найбільші значення. Експериментально підтверджено коректність отриманих теоретичних положень, що узгоджується співпадінням розрахункових значень електричної ємності з експериментальними значеннями з різницею у 8,5%. **Практична значимість.** Визначено напруженість електричного поля на поверхні електричної ізоляції жил в залежності від схеми обстеження під час прикладання робочої та підвищеної випробувальної напруги. Задля зменшення напруженості електростатичного поля у 2 рази в повітряних проміжках запропоновано заповнення міжфазного простору діелектричним матеріалом з діелектричною проникністю $\epsilon_1=2,0$ на технологічній стадії виготовлення кабелів. Представлена методологія визначення розподілу електростатичного поля навколо ізольованих струмопровідних жил різної конфігурації може використовуватися для оцінки електричної ємності ізоляційних проміжків як довідкової для контролю кабелів на технологічній стадії виготовлення під час приймальних випробувань і в експлуатаційних умовах. Бібл. 27, рис. 7.

Ключові слова: атомні електричні станції, вимоги до кабелів АЕС, силові неекранивані кабелі турбінного відсіку, секторні струмопровідні жили, електростатичне поле, ізоляційні проміжки, електрична ємність.

Вступ. Вектор використання атомної енергії у сучасних умовах суттєво змінюється. Атомна енергетика є єдиним доступним та безпечним масштабованим базовим навантаженням без викидів, що робить її незаперечним компонентом "зеленої енергії" з прогнозованим видобутком до 60 років з низькою нестабільністю [1–5]. Вартість електроенергії в середньому становить: атомної – 0,4 євроцент/кВт·год. приблизно така ж, як і видобута гідроелектростанціями; теплової: понад 4,0

© Безпрозваних Г.В., Гонтар Ю.Г., Пушкар І.А., 2025

ORCID: * <https://orcid.org/0000-0002-9584-3611>; ** <https://orcid.org/0000-0002-4433-7305>;*** <https://orcid.org/0009-0003-2882-3412>

© Видавець ВД "Академперіодика" НАН України, 2025

Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>

євроцент/кВт·год. у разі згоряння вугілля та (1,3–2,3) євроцент/кВт·год. у разі згоряння газу, вітрової – (0,1–0,2) євроцент/кВт·год. [1–5].

Передбачається, що до 2050 року глобальна світова потужність атомних електростанцій (АЕС) зросте на 40% порівняно з 2023 р. і становитиме 950 ГВт [4, 5]. Будівництво атомних електростанцій триває від 8 до 15 років залежно від термінів затвердження регуляторами та коштує приблизно (2–3) млрд. доларів для одного невеликого модульного реактора [4] і до 15 млрд. доларів для великої установки [5].

З наявною ядерною галуззю Україна потенційно здатна розширювати свої ядерні потужності у виробництві атомної енергії. В середньостроковій перспективі на Хмельницькій АЕС мають бути доопрацьовані два майже готові реактори. Державне фінансування може зіграти значну роль у стабільності, працездатності та розвитку атомної енергетики України.

Задля забезпечення надійного функціонування існуючих та нових АЕС потрібні сучасні безпечні кабелі, розроблені на основі ретельного вивчення електричних характеристик і, зокрема, розподілу електричного поля у разі різного конструктивного виконання струмопровідних жил.

Постановка проблеми. АЕС потребує спеціальних кабелів різного конструктивного виконання, призначених для особливих умов експлуатації. Для атомної електричної станції потужністю 1 ГВт потрібно понад 100 різних типів кабелів загальної довжини до 2 000 км і вартістю до шести млрд. грн. [6, 7].

Так, в системах безпеки та турбінному відсіку АЕС застосовуються сертифіковані [8, 9] вогнестійкі масло стійкі [10, 11] силові 3-х або 4-жильні кабелі на напругу 1 кВ [12] з терміном експлуатації 60 років за температури навколишнього середовища 70°C.

Комплекс вимог до кабелів щодо надійного енергопостачання, екологічної безпеки та економічної ефективності забезпечується сучасними полімерними композиціями в електричній ізоляції кабелів АЕС [13, 14]. Це обумовлює необхідність всебічного аналізу впливу електричної ізоляції на електричні параметри кабелів різного конструктивного виконання на стадії проєктування та виробництва.

В нормативно-технічній документації на силові кабелі, у тому числі і турбінного відсіку, не вказуються електричні параметри, зокрема, електрична ємність [15]. Цей параметр є важливим як на технологічній стадії виготовлення кабелів, так і в експлуатації задля спостереження за станом електричної ізоляції та оцінки технічного стану кабелів [16, 17].

Для силових кабелів одножильного виконання коаксіальної конструкції застосовується аналітична формула задля визначення електричної ємності [18]. Для розрахунку електричної ємності кабелів з довільною конфігурацією струмопровідних жил відсутні аналітичні формули. Наближені формули забезпечують визначення електричної ємності з похибкою до 26,7% [19].

Визначення електричної ємності кабелів у металевій оболонці базується на чисельних методах розрахунку електричного поля [20–24] із застосуванням програмного забезпечення Comsol Multiphysics [20], QuickField [21], на підставі використання методів кінцевих елементів та моментів [19, 20, 22, 23] для ідеалізованих струмопровідних жил, у тому числі і секторної форми з наближенням до еквівалентним круглим провідникам [24].

Метою даної роботи є аналіз розподілення електростатичного поля навколо ізольованих струмопровідних жил різної конфігурації із визначенням їхньої електричної ємності у силових неекранованих кабелях напруги 1000 В для локального живлення турбінного відсіку АЕС.

Моделювання виконується за допомогою програмного забезпечення з відкритим вихідним кодом Lazarus та GNU Octave.

Розподіл електростатичного поля у системі двох зарядів. Двовимірний підхід припускає, що струмопровідні жили нескінченно довгі та паралельні, і тому враховує лише поперечні компоненти електричного поля. Просторове розподілення електростатичного поля залежно від кількості струмопровідних жил, їхньої конфігурації у силовому неекранованому кабелі, прикладеної напруги та оточуючого діелектричного середовища.

Розглянемо спрощену модель розподілення електростатичного поля двох неізольованих струмопровідних жил у вигляді точкових зарядів у разі розташування у вакуумі.

Величина потенціалу для двох тіл, що знаходяться у вакуумі на деякій відстані L одне від одного і мають заряди Q і $-Q$, згідно з принципом суперпозиції для довільної точки простору, віддаленої від заряджених тіл на відстані R , визначається на підставі формули для електростатичного (кулонівського) потенціалу

$$\varphi = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{1}{R} - \frac{1}{R+L} \right] = \frac{QL}{4\pi\epsilon_0 R(R+L)} = (L \ll R) \approx \frac{QL}{4\pi\epsilon_0 R^2}. \quad (1)$$

На рис. 1 показано лінії рівного потенціалу – екіпотенційні лінії (рис. 1, а, в) з позначеннями значень потенціалу φ (В) та проєкції поверхні φ на площину з візуалізацією зміни напрямку вектора напруженості електростатичного поля $\mathbf{E}$, спрямованими стрілками чорного кольору (рис. 1, б, г), двох тіл із зарядами $Q_1=+100$ пКл і $Q_2=-100$ пКл (рис. 1, а, б) та $Q_1=+100$ пКл і $Q_2=-50$ пКл (рис. 1, в, г) за відстані між ними 20 см. Як видно, електричне поле існує за межами зарядів. У разі різних значень заряду тіл (рис. 1, в, г) область, зайнята полем, поширюється: порівняйте рис 1, а та рис. 1, в.

Для чотирьох заряджених тіл у вакуумі величина потенціалу для довільної точки простору визначається як

$$\varphi = \frac{QL^2}{8\pi\epsilon_0 R^3}. \quad (2)$$

Порівняно з дипольним випадком збільшення кількості заряджених тіл різного знака, але однакового значення, призводить до зростання швидкості спадання напруженості електричного поля.

Область, зайнята електростатичним полем (рис. 1), більше ніж у три рази перевищує відстань між двома зарядами. За різних значень зарядів (рис. 1, в, г) спостерігається значна несиметричність розподілу поля.

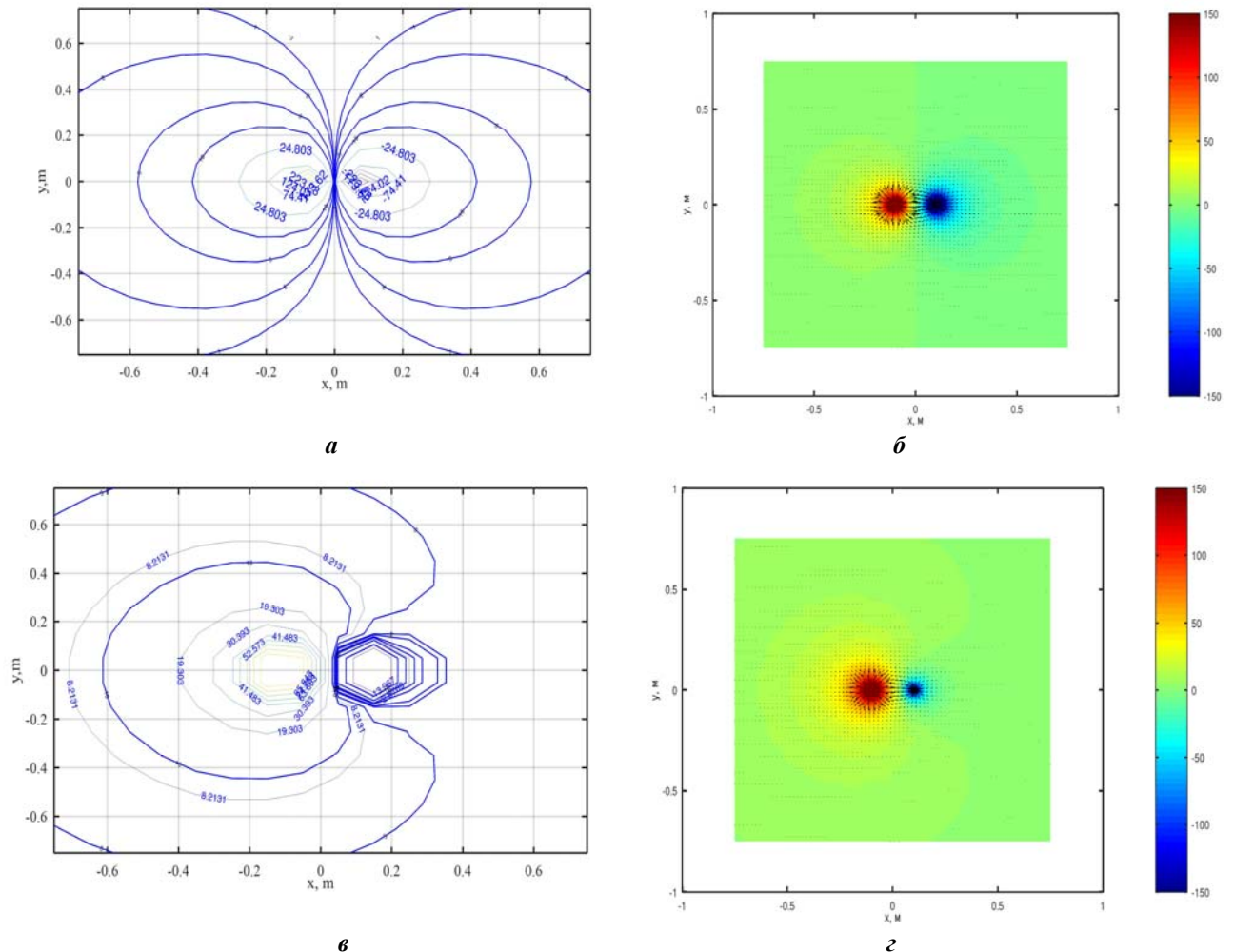


Рис. 1

Більш складна конфігурація електростатичного поля спостерігається безпосередньо у конструкції кабелів, наприклад, неекраниваних 4-х жильних у захисній полімерній оболонці з різною конфігурацією ізолюваних струмопровідних жил. Наявність діелектриків з різними діелектричними проникностями, більша кількість електродів особливо з різною конфігурацією спричинятиме спотворення електричного поля. Розподілення електростатичного поля залежатиме від

різноманітності схем прикладання, у тому числі і дипольного, електричного потенціалу до струмопровідних жил різної конфігурації та надає підстави визначити електричну ємність ізоляційних проміжків у неекраниваних 4-х жильних кабелів.

Моделі неекраниваних силових кабелів для визначення електростатичного поля та його характеристик. Розглянуто дві типові моделі неекраниваного 4-х жильного кабелю у полімерній оболонці (рис. 2). На рис. 2, а, б наведено фізичну модель неекраниваного силового кабелю з трьома секторними жилами однакового перерізу та однією круглою жилою іншого перерізу. На рис. 2, в – з круглими жилами однакового перерізу.

Діелектричні проникності електричної ізоляції жил (ϵ_2), захисної полімерної оболонки (ϵ_3), міжфазного заповнення (ϵ_1) та оточуючого середовища (ϵ_4) у загальному випадку різні (рис. 2, б, в). Товщина ізоляції – Δ_{ins} , товщина полімерної захисної оболонки – Δ_1 . Показано внутрішню J_{in} та зовнішню J_{out} поверхні полімерної захисної оболонки.

Геометрія секторної жили (рис. 2, а, б) – з круговими границями кромek. Основні параметри секторної жили (рис. 2, а): центральний кут β , радіус жили R_g , радіуси закруглення кромek R_1 та R_2 .

Для розрахунку плоско-паралельного електростатичного поля визначено ряд геометричних параметрів щодо задання координат вузлів на межах поділу середовищ у чотирьох-жильних кабелях. Так, для секторних жил (рис. 2, а) половина твірної поверхні жили A (рис. 2, б) представлено чотирма ділянками, на кожній з котрих розміщуються вузли для розрахунку в них поля:

– кругова ділянка центрального закруглення радіусу R_2 з відповідним кутом;

– прямолінійна ділянка від кінця дуги радіусу R_2 до початку дуги радіусу R_1 ;

– кругова ділянка периферійного закруглення радіусу R_1 з відповідним кутом;

– кругова ділянка жили радіусу R_g з центральним кутом.

Координати вузлів другої половини твірної знаходяться симетрично щодо осі симетрії жили A . Координати вузлів наступних двох жил B і C знаходяться шляхом повороту вузлів фази A на кути $-2\pi/3$ і $2\pi/3$ відповідно.

Реальна геометрія кабелів (рис. 2) складна. Розрахунок електричного поля засновано на ряді припущень.

1. Поверхні струмопровідних жил та ізоляції прийняті із закругленнями (рис. 2, а, б) для моделі з секторними жилами та круговими циліндричними для моделі з круглими жилами (рис. 2, в). Геометрія захисної полімерної оболонки – кругової

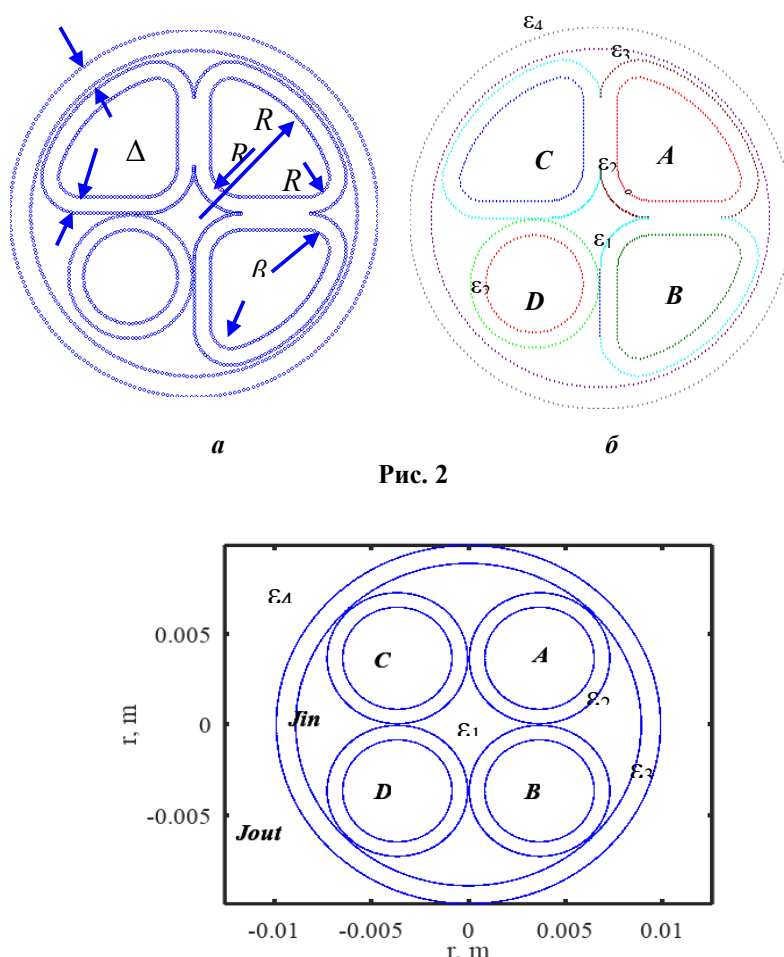


Рис. 2

Рис. 2, в

циліндричної форми.

2. Довжина ділянки з поверхневим зарядом повинна бути меншою відстані до точки спостереження електричного поля. Задля забезпечення цієї умови запроваджено повітряні зазори між ізольованими жилами товщиною 1 мкм, які не впливають на ємності ізоляційних проміжків, але дають змогу уникнути збігу вузлів, через які може різко зростати локальна похибка обчислень.

На кожній смужці з центром у точці M нескінченно малої ширини dl ділянок жил A , B , C , D (електродів) з кусково-однорідною ізоляцією розміщуються вузли для визначення розрахункової

густини електричного заряду $\sigma(M)$ методом вторинних джерел на підставі інтегральних рівнянь Фредгольма першого роду для електродів (3) та другого – для межі поділу діелектричних середовищ (4) відповідно [25, 26]

$$\frac{1}{2\pi\epsilon_0} \int \sigma(M) \cdot \ln \frac{r_o}{r_{QM}} \cdot dl_M = U, \quad (3)$$

$$\frac{\sigma(M)}{2\epsilon_0} - \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_2 + \epsilon_1} \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \int_{S-\Delta S} \frac{\sigma(M) \cdot \cos(\vec{r}_{QM}, \vec{n}_Q) \cdot dl_M}{r_{QM}} = 0, \quad (4)$$

де $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – електрична стала; $U(\varphi)$ – заданий потенціал електродів; r_{QM} – відстань до точки Q (у якій шукають характеристики поля) від точки M ; r_o – відстань, де потенціал дорівнює 0; $\cos(\vec{r}_{QM}, \vec{n}_Q)$ – кут між векторами $\vec{r}_{QM}$ та $\vec{n}_Q$ – вектором нормалі до межі поділу середовищ з діелектричними проникністю ϵ_1 і ϵ_2 у точці Q .

Недоліком (4) є відсутність інформації про потенціал: рівняння (4) немає єдиного рішення. Задля отримання єдиного рішення об'єднують системи лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР), що впливають з (3) та (4). В об'єднаній СЛАР перші N_e рядків рівнянь (вузлів – це точки, в яких знаходяться σ і для яких формуються рівняння в СЛАР) впливають з інтегрального рівняння Фредгольма першого роду (3) для потенціалів на поверхнях струмопровідних жил, а наступні N_d рядків рівнянь (вузлів, в яких знаходяться σ) – з інтегрального рівняння Фредгольма другого роду (4) для стрибків нормальної складової напруженості електростатичного поля на межі поділу діелектричних середовищ. Загальна кількість вузлів $N = N_e + N_d$ визначає порядок об'єднаної СЛАР. У матричній формі така СЛАР записується у вигляді

$$\bar{A} \cdot \bar{\sigma} = \bar{U}, \quad (5)$$

де $\bar{\sigma}$ – матриця-стовпчик шуканих значень густини вторинних зарядів, Кл/м² у вузлах загальної кількості N (порядок СЛАР); $\bar{U}$ – матриця-стовпчик, перші N_e членів якої відбивають задані потенціали вузлів, що знаходяться на струмопровідних жилах, інші $(N - N_e)$ – на межі поділу діелектричних середовищ та дорівнюють нулю; $\bar{A}$ – квадратна матриця коефіцієнтів, елементи якої a_{ij} дорівнюють

$$a_{ij} = \begin{cases} \begin{pmatrix} \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r_{0j}}{r_{ij}} \cdot \Delta l_j & i \neq j \\ \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r_{0j}}{\Delta l_j / (2e)} \cdot \Delta l_j & i = j \end{pmatrix} & i = 1 \div N_e \\ \begin{pmatrix} \frac{1}{2\epsilon_0} & i = j \\ -\beta \cdot \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{\cos(\vec{r}_{ij}, \vec{n}_j)}{r_{ij}} \cdot \Delta l_j & i \neq j \end{pmatrix} & i = N_e + 1 \div N \end{cases}, \quad (6)$$

де i – номер вузла, у якому шукаються характеристики поля; j – номер вузла, у якому розташований заряд; r_{ij} – відстань між ділянками i і j ; r_{0j} – відстань від ділянки j до точки O , потенціал якої можна прийняти рівним нулю; Δl_j – довжина відрізка твірної циліндра з центром у точці з номером j ; e – основа натурального логарифму; β – параметр, пов'язаний з діелектричними проникностями діелектричних середовищ: у разі орієнтації вектора нормалі $\vec{n}_j$ з середовища з діелектричною проникністю ϵ_2 в середовище з ϵ_1 параметр β дорівнює

$$\beta = \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_2 + \epsilon_1}.$$

Чисельний розв'язок СЛАР (5) дає змогу визначити розрахункові значення густини вторинних зарядів σ_i у вакуумі та напруженості E_i електростатичного поля для поверхонь струмопровідних жил за (6) та на межі поділу діелектричних середовищ за (7) відповідно

$$E_i = \frac{\sigma_i}{\varepsilon_0} \quad (6), \quad E_i = \frac{\sigma_i}{2\varepsilon_0} \left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \quad (7)$$

Зауважимо, що в (3)–(7) входить розрахункова густина заряду на поверхнях, розташованих у вакуумі. Фактична густина σ'_i зарядів на поверхнях ізолюваних діелектриком з діелектричною проникністю ε_2 жилах більше у ε_2 разів.

Фактична густина σ'_i зарядів дає можливість визначити загальний заряд Q кожної ізолюваної жили і електричну ємність при заданих потенціалах [25–26].

Дипольне та квадрупольне розподілення електростатичного поля у 4-х жильних неекраниваних силових кабелях. Розрахунок електростатичного поля для представлених моделей неекраниваних силових кабелів з однаковою круглою та різною конфігурацією жил виконано у середовищі Lazarus за складеними програмами, які включають:

- основну програму щодо фізичної моделі відповідного кабелю;
- підпрограму побудови розрахункової моделі з візуальним контролем розташування вузлів для перевірки правильності задання геометрії моделі;
- підпрограму для визначення коефіцієнтів a_{ij} СЛАР;
- підпрограму для розв’язання СЛАР методом Гаусса.

Приклад скріншоту розроблених інтерфейсів з візуалізацією результатів розрахунку електростатичного поля 4-х жильних неекраниваних силових кабелів у полімерній захисній оболонці у програмному середовищі Lazarus наведено на рис. 3. Побудова графіків розподілення електричного поля за чисельними результатами розрахунків з визначенням часткових ємностей – у програмному середовищі GNU Octave (див. далі рис. 5 – рис. 7). Наявність від’ємних значень поля на графіках рис. 3, 5, 6 обумовлена відображенням нормальної компоненти напруженості електричного поля.

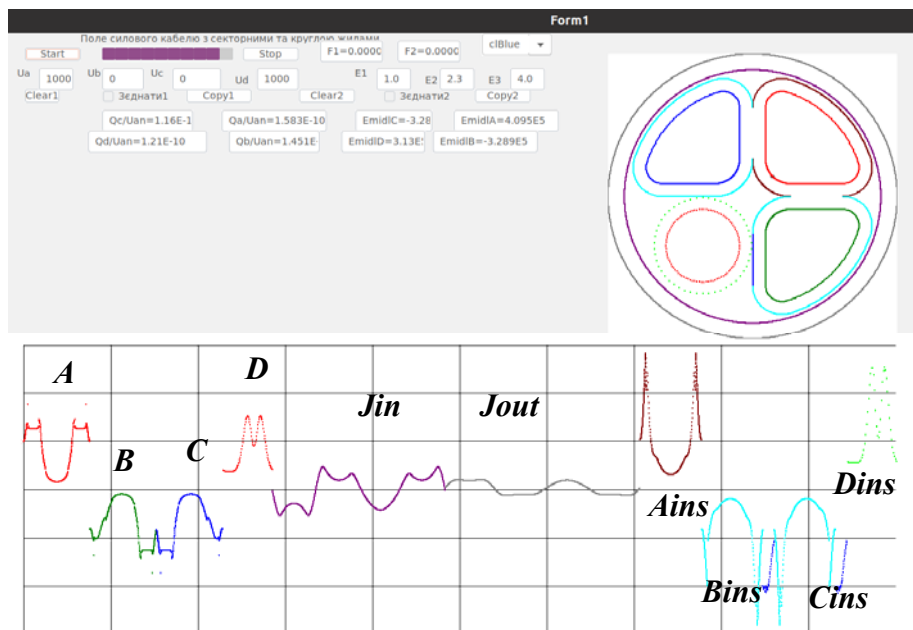


Рис. 3

На рис. 3 представлено: а) вхідні дані: меню для вводу значення потенціалу U в залежності від схеми дослідження та діелектричні проникності міжфазного простору, електричної ізоляції та полімерної захисної оболонки; б) вихідні дані: уточнені значення перерізів секторної та круглої струмопровідних жил; побудована модель неекраниваного силового кабелю з трьома секторними та однією круглою жилами; відношення загального заряду Q кожної ізолюваної жили з урахуванням впливу поруч розташованих жил до прикладеного потенціалу U , тобто сукупна та часткові електричні ємності ізоляційних проміжків за обраної схеми обстеження; розгортка нормальної складової напруженості електростатичного поля на поверхні струмопровідних жил та межі поділу діелектричних середовищ відповідно до позначень, наведених у поясненнях до рис. 5.

Для кабелю з різною конфігурацією жил (рис. 2, а, б): переріз секторних жил становить 25 мм², круглої – 16 мм². Для кабелю з круглою конструкцією жил (рис. 2, в) – переріз жил становить 25 мм². Для розглянутих конструкцій кабелів товщина ізоляції дорівнює $\Delta_{ins}=0,8$ мм; товщина

полімерної захисної оболонки – $\Delta_L=1,0$ мм. Діелектричні проникності електричної ізоляції жил $\epsilon_2=2,3$; захисної полімерної оболонки $\epsilon_3=4,0$; міжфазного заповнення $\epsilon_1=1$ (повітря). Кабелі розташовані у середовищі з діелектричною проникністю $\epsilon_4=1$ (повітря). Прикладена напруга становить 1000 В.

Між 4-ма струмопровідними жилами в кабелі утворюється 6 ізоляційних проміжків: $A-B$, $A-D$, $A-C$, $B-D$, $B-C$, $D-C$ (рис. 2, б, в) відповідно. В залежності від схеми прикладання напруги до струмопровідних жил електростатичне поле зосереджується у різних ділянках ізоляційних проміжків.

На рис. 4 наведено електричне поле нормальної складової напруженості на поверхні струмопровідних жил та межі поділу діелектричних середовищ в залежності від схеми обстеження силового кабелю з круглою конструкцією жил (рис. 2, в). Тангенціальна складова напруженості електричного поля у даній конструкції суттєво менша за нормальну [25]. Тангенціальна складова враховується у багатожильних контрольних кабелях або за наявності тріщин у ізоляції [17].

Під час прикладання потенціалу 1000 В до кожної із жил (наприклад, жили A – рис. 4, а) та знаходженні трьох інших (B, D, C) під нульовим потенціалом електростатичне поле у більшій мірі концентрується в ізоляції між жилами, що безпосередньо стикаються одна з одною (рис. 4, а). У такому випадку розподілення обумовлює сукупну ємність жили A відносно трьох інших та оточуючого середовища, а також часткові ємності між жилою A та жилами B , C та D відповідно.

За умови знаходження трьох жил A, B, D під високим потенціалом 1000 В і жили C під нульовим (інверсна ситуація рис. 4, а) електростатичне поле зосереджується в ізоляційних проміжках між жилами B, D та C . Розподілення обумовлює сукупну ємність жили C та часткові ємності між жилою C та жилами A, B та D відповідно.

За потенціалу 1000 В на жилах A, B, C і нульовому на жилі D електричне поле зосереджується переважно у електроізоляційних проміжках між потенціальними жилами A і B та між потенціальною жилою B та нульовою D (рис. 4, б). Розподілення обумовлює сукупну ємність жили D відносно трьох інших та оточуючого середовища, а також часткові ємності між жилою D та жилами A, B та C відповідно.

У разі високого потенціалу на жилах A, C та знаходженні двох інших D, B під нульовим (рис. 4, в) електростатичне поле в найбільшій мірі зосереджується в ізоляційних проміжках між всіма жилами та міжфазному заповненні. Саме за схемами прикладання напруги відповідно до рис. 4, в та дві потенціальні жили A, B проти двох жил C, D під нульовим потенціалом створюється дипольне розподілення електростатичного поля (рис. 1, а, б).

Квадрупольне – у випадку двох потенціальних жил A, D проти жил C, B під нульовим потенціалом (рис. 4, г). У цьому випадку спостерігається концентрація електричного поля у просторі між ізолюваними жилами $A-C$ та $B-D$. У силовому кабелі з жилами однакою конфігурації більшою мірою змінюються параметри проміжків за умови створення дипольного розподілення електростатичного поля, меншою мірою – проміжків за умови створення квадрупольного. За схемою розподілення електростатичного поля, наведеного для рис. 4, в, ємність між жилами матиме найбільші значення (далі рис. 7, в), що дає змогу контролювати конструктивну однаковість на технологічній стадії виготовлення кабелю та спостерігати за динамікою змінення ємності проміжків в процесі експлуатації.

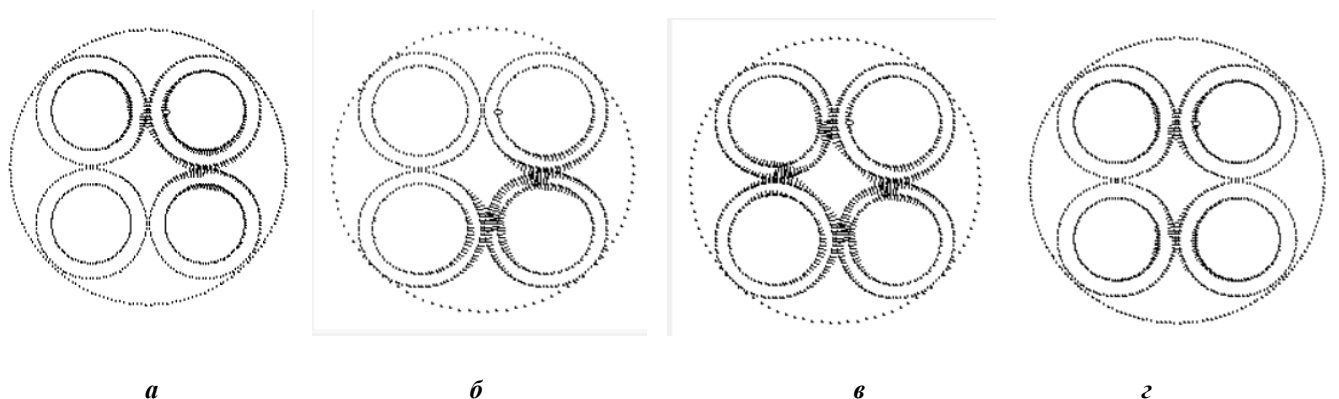
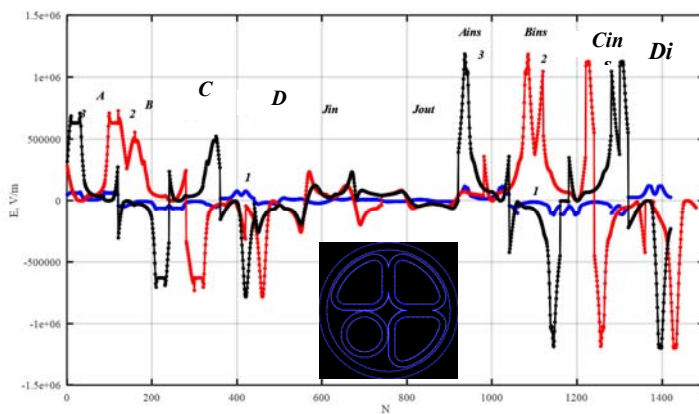


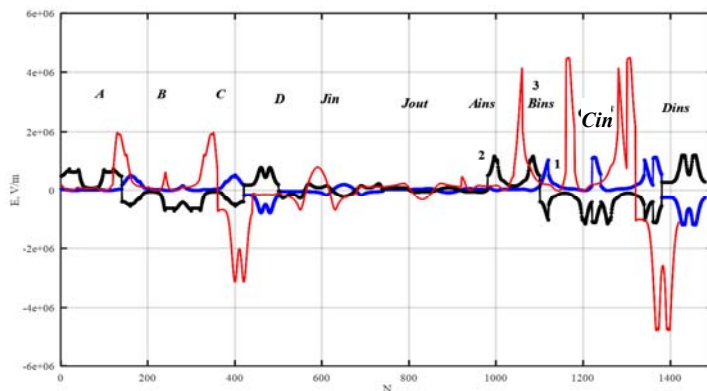
Рис. 4

На рис. 5 та рис. 6 показано результати чисельного моделювання електростатичного поля за різних схем обстеження у вигляді розгортки нормальної компоненти напруженості електростатичного поля по вузлах на поверхнях електродів A, B, D, C , на межі поділу діелектричних середовищ: $Ains, Bins, Dins, Cins$ – електричної ізоляції, $Jin, Jout$ – внутрішньої та зовнішньої поверхні захисної полімерної оболонки для двох конструкцій кабелів (рис. 2, а, б, в). Розподілення електростатичного поля вздовж поверхонь діелектричних середовищ для кабелю з різною конфігурацією жил показано на рис. 5, для кабелю з однаковою конфігурацією жил – на рис. 6 відповідно.

Криві на рис. 5, а відповідають схемам дослідження: крива 1 – жила A під потенціалом 1000 В, жили B, D, C – під нульовим. Криві 2 та 3 – дипольному розподіленню: жили A, B під потенціалом 1000 В проти жил C, D під нульовим та жили A, C під потенціалом 1000 В проти жил D, B під нульовим потенціалом відповідно.



а



б

Рис. 5

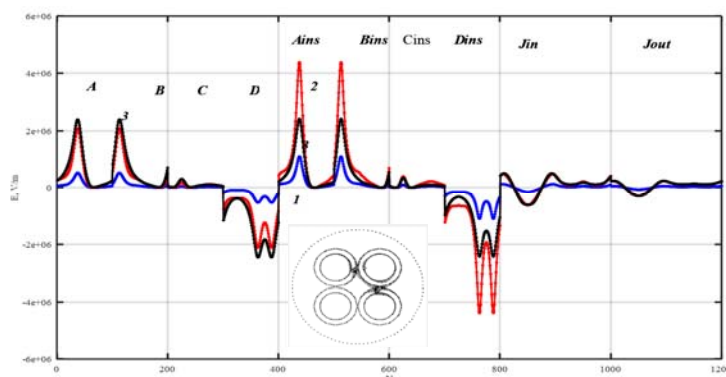


Рис. 6

Криві на рис. 5, б відповідають схемам дослідження: крива 1 – жили A, B, C під потенціалом 1000 В проти жили D під нульовим потенціалом; крива 2 – квадрупольне розподілення електростатичного поля: жили A, D під потенціалом 1000 В проти жил C, B під нульовим потенціалом; крива 3 – жили A, B, C під потенціалом 4000 В проти жили D під нульовим потенціалом.

Для кабелю з різною конфігурацією жил дипольне розподілення електростатичного поля (рис. 5, а, криві 2, 3) обумовлює зростання напруженості порівняно з квадрупольним (рис. 5, б, крива 2) та іншими (рис. 5, а, б криві 1) схемами прикладання високої напруги до електродів.

На рис. 6 для кабелю з однаковою конфігурацією жил показано розподілення електростатичного поля: за схемою дослідження під потенціалом три жили A, B, C разом проти жили D під нульовим потенціалом. Крива 1 – потенціал дорівнює 1000 В, криві 2 та 3 – потенціал дорівнює 4000 В. Крива 2 відповідає конструкції кабелю із заповненням міжфазного простору повітрям з діелектричною проникністю $\epsilon_1=1,0$. Крива 3 – заповненням діелектричним матеріалом з $\epsilon_1=2,0$.

Порівняння розподілення електростатичного поля в залежності від схеми обстеження за напруги 1000 В у струмопровідних жилах доводить, що в розглянутих конструкціях (рис. 5, а, б – криві 1, 2; рис. 6 – крива 1) не створюються умови для виникнення часткових розрядів у повітряних проміжках [17, 27].

В той же час за напруги 4000 В у струмопровідних жилах (рис. 5, б, крива 3; рис. 6, крива 2) на окремих

ділянках поверхні ізоляції жил напруженість електричного поля перевищує у 2 рази критичне значення напруженості початку часткових розрядів $E_{кр}=2,1$ МВ/м у повітряних проміжках [17, 27].

Це обумовлює виникнення між ізольованими жилами у повітряних зазорах ($\epsilon_1=1$ – повітря) часткових розрядів. Заповнення міжфазного простору діелектричним матеріалом з діелектричною проникністю $\epsilon_1=2,0$ зменшує напруженість поля у 2 рази. Випробування силових кабелів напруги від 1 кВ до 30 кВ проводяться відповідно до [15]. Стандарт містить таблиці коефіцієнтів, які використовуються задля порівняння зі стандартними таблицями напруги кабелю задля визначення скоригованої напруги на основі конкретних умов експлуатації. Таблиці створено на основі методології стандарту [15] і являють практичний посібник із розробки кабельної системи. Заповнення міжфазного простору сучасними діелектричними матеріалами замість повітряних проміжків в конструкції кабелів підвищує експлуатаційну надійність силових неекраниваних кабелів турбінного відсіку АЕС.

Для неекраниваних кабелів з неоднорідною та однорідною конфігурацією жил спостерігається просторове розподілення електричного поля на внутрішній та зовнішній поверхнях полімерної оболонки. У разі дипольної схеми обстеження електростатичне поле у більшій мірі виходить за межі неекраниваних кабелів. Напруженість електричного поля на зовнішній поверхні кабельної оболонки менше 0,2 МВ/м. Така напруженість не є небезпечною з точки зору розвитку часткових розрядів. Стан поверхні полімерних оболонок необхідно враховувати під час обстеження характеристик кабелів за умов експлуатації. Зволоження оболонок призводить до збільшення значень електричної ємності внутрішніх ізоляційних проміжків кабелів. Це можна використовувати для індикації вологи на поверхні полімерної оболонки кабелів в експлуатації на АЕС. В той же час проникнення електричного поля за межі захисної оболонки спотворюватиме результати вимірювання електричних характеристик кабелю в експлуатації: забруднення на поверхні оболонки впливатимуть на електричну ємність та діелектричні втрати [17].

Електричні ємності ізоляційних проміжків 4-х жильних неекраниваних кабелів. За будь-якої схеми обстеження (рис. 4) 4-х жильного неекраниваного кабелю електростатичне поле зосереджується як в ізоляційних проміжках, до струмопровідних жил котрих прикладено напругу, так і в поруч розташованих. Визначені за результатами моделювання електричного поля ємності ізоляційних проміжків являють собою сукупні C_S та часткові C_{part} ємності в залежності від схеми обстеження кабелю.

Важливо, що для кабелю з однаковою конфігурацією жил (рис. 1, а; рис. 2, в) часткові ємності 6-ти ізоляційних проміжків $A-B$, $A-D$, $A-C$, $B-D$, $B-C$, $D-C$ визначаються безпосередньо за результатами просторового розподілення електричного поля.

Представлена методологія визначення часткових ємностей базується на побудові розподілення електростатичного поля навколо ізольованих струмопровідних жил однакової конфігурації за 4-мя схемами обстеження неекраниваного кабелю.

1. Прикладання потенціалу 1000 В до жили A (рис. 4, а) та знаходженні трьох інших B , D , C під нульовим потенціалом. За такої схеми обстеження визначаються сукупна часткова ємність жили A (C_{SA}) та часткові ємності 3-х ізоляційних проміжків $A-B$, $A-D$, $A-C$ (C_{A-B} , C_{A-D} , C_{A-C}).

2. Прикладання потенціалу 1000 В до жили B та знаходженні трьох інших A , D , C під нульовим потенціалом. За такої схеми обстеження визначаються сукупна часткова ємність жили B (C_{SB}) та часткові ємності 3-х ізоляційних проміжків $B-A$, $B-D$, $B-C$: C_{B-A} , C_{B-D} , C_{B-C} .

3. Прикладання потенціалу 1000 В до жили C та знаходженні трьох інших A , B , D під нульовим потенціалом. За такої схеми обстеження визначаються сукупна часткова ємність жили C (C_{SC}) та часткові ємності 3-х ізоляційних проміжків $C-A$, $C-B$, $C-D$: C_{C-A} , C_{C-B} , C_{C-D} .

4. Прикладання потенціалу 1000 В до жили D та знаходженні трьох інших A , B , C під нульовим потенціалом. За такої схеми обстеження визначаються сукупна часткова ємність жили D (C_{SD}) та часткові ємності 3-х ізоляційних проміжків $D-A$, $D-B$, $D-C$: C_{D-A} , C_{D-B} , C_{D-C} .

Для кожної схеми обстеження сума часткових ємностей, включених паралельно, повинна дорівнювати сукупній. Результати доводять: найбільша похибка розрахунків становить 0,88%. Часткові ємності ізоляційних проміжків $A-D$ (пункт 1) та $D-A$ (пункт 4) між віддаленими струмопровідними жилами відрізняються на 5,7%.

Представлена методологія визначення часткових ємностей для кабелю з однаковою конфігурацією жил виявляється не працездатною для кабелю з різною конфігурацією жил (рис. 1, б; рис. 2, а, б). Необхідно повний набір 6-ти схем обстеження кабелю. Схеми обстеження включають

зазначені вище чотири у пунктах (1–4) з 2-ма додатковими: 5. три жили, наприклад, A, B, C – проти жили D ; 6. три жили, наприклад, A, B, D – проти жили C . На підставі розподілення електричного поля для 6-ти схем обстеження визначено 6 значень сукупних ємностей: $C_{SA}; C_{SB}; C_{SC}; C_{SD}; C_{SA,B,C-D}; C_{SA,B,D-C}$. У такому випадку 6 значень невідомих часткових ємностей C_{part} визначаються за результатами обстеження за 6-ма схемами прикладання напруги на підставі розв’язку системи лінійних алгебраїчних рівнянь шостого порядку [26]

$$AC * C_{part} = C_s, \quad (8)$$

де AC – матриця коефіцієнтів, яка визначає участь часткової ємності у сукупній для відповідної схеми обстеження; C_{part} – матриця-стовпець невідомих 6-ти часткових ємностей; C_s – матриця-стовпець 6-ти сукупних ємностей.

Прийmemo наступний порядок розташування часткових ємностей у матриці-стовпці невідомих C_{part} : $C_{A-B}; C_{A-D}; C_{A-C}; C_{B-C}; C_{B-D}; C_{C-D}$.

Елементи матриці AC у двійковій системі числення дорівнюють 1 у разі, якщо часткова ємність ізоляційного проміжку приймає участь у сукупній ємності, та дорівнюють 0 – у протилежному випадку.

Так, наприклад, для схеми обстеження за пунктом 1 у правій частині (8) сукупна ємність C_{SA} дорівнює сумі паралельно включених частковим ємностям 3-х ізоляційних проміжків:

$C_{SA} = C_{A-B} + C_{A-D} + C_{A-C} + 0 + 0 + 0$, тобто часткові ємності $C_{B-C}, C_{B-D}, C_{C-D}$ дорівнюють 0. Рядок матриці AC має вигляд: 1 1 1 0 0 0. Відмінні від нуля ті елементи рядка матриці AC , які відповідають частковим ємностям, що приймають участь у відповідній схемі обстеження.

На рис. 7, а, б представлено гістограми для 4-х значень електричної ємності кожної з шести схем обстеження відповідно до рис. 3, а – рис. 3, г силових кабелів двох типів конструктивного виконання. Рис. 7, а – для силового кабелю з різною конфігурацією струмопровідних жил, рис. 7, б – для силового кабелю з однакою конфігурацією струмопровідних жил відповідно. Для такої конструкції відзначаються менші значення ємності порівняно з різною конструкцією жил за умови застосування однакових електроізоляційних матеріалів для ізоляції жил, середовища між жилами і матеріалу оболонки.

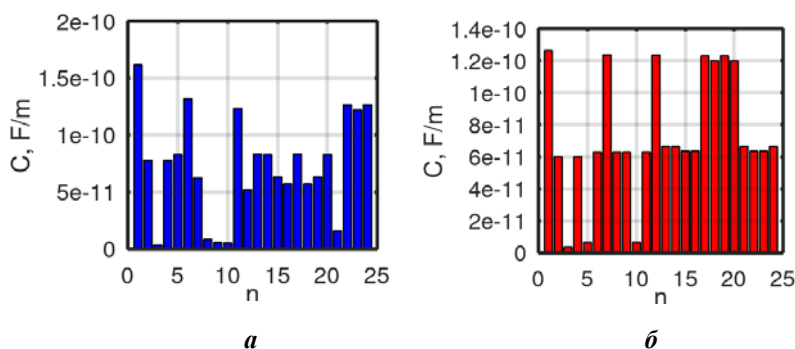


Рис. 7

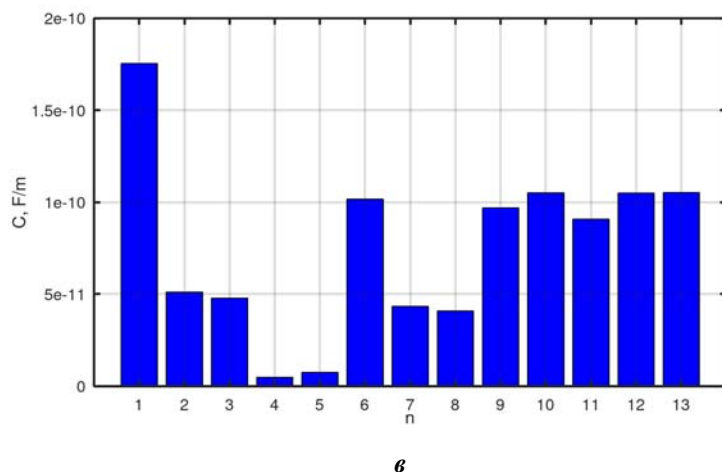


Рис. 7

На рис. 7, в наведено результати вимірювань електричної ємності силового неекранованого кабелю з різною конфігурацією струмопровідних жил: три секторні жили перерізом 25 мм^2 та одна жила перерізом 16 мм^2 круглої форми. Розрахункові значення електричної ємності узгоджуються з експериментальними (порівняйте рис. 7, а з рис. 7, в). Так, найбільші значення розрахункової ємності $C=161,7 \text{ пФ/м}$ ($n=1$, рис. 6, а) та експериментальної $C=175,41 \text{ пФ/м}$ ($n=1$, рис. 7, в) відповідають дипольному розподіленню електростатичного поля за схемою обстеження для рис. 4, в: жили A, C – під високим потенціалом, жили D, B – під нульовим.

Висновки. Представлено методику чисельного розрахунку електростатичного поля методом вторинних джерел в аналітично заданих математичних моделях силових неекранованих кабелів з ізованими секторними та

круглими струмопровідними жилами. Методика надає можливості визначення шести значень часткової ємності у 4-х жильних кабелях з однаковою конфігурацією жил безпосередньо за результатами розрахунків електростатичного поля. У 4-х жильних кабелях з різною конфігурацією жил – на підставі розв’язку системи лінійних алгебраїчних рівнянь 6-о порядку, що відображає результати шести сукупних значень ємностей за різних схем просторового розподілення електростатичного поля.

Визначено вплив схеми прикладання різного електричного потенціалу (нульового і 1000 В) до струмопровідних жил різної конфігурації на розподілення електричного поля в неекраниваних силових кабелях в полімерній захисній оболонці. Встановлено зростання напруженості електричного поля до 4,5 кВ/мм на поверхні електричної ізоляції жил у разі прикладання підвищеної випробувальної напруги, що сприяє виникненню часткових розрядів у повітряних проміжках. Задля зменшення напруженості електричного поля у 2 рази в повітряних проміжках та підвищення експлуатаційної функціональності кабелів рекомендовано заповнення міжфазного простору діелектричним матеріалом з діелектричною проникністю $\varepsilon_1=2,0$.

Доведено, що за умови створення дипольного просторового розподілення електростатичного поля у силовому кабелі електричні ємності між жилами однакової круглої конфігурації мають найбільші значення. Виконано верифікацію розроблених математичної моделі 4-х жильного кабелю з жилами різної конфігурації та методики чисельного розрахунку електростатичного поля шляхом порівняння розрахункових значень електричної ємності ізоляційних проміжків з експериментальними для зразка кабелю систем локального живлення турбінного відсіку АЕС. Розбіжність між розрахунковими та експериментальними значеннями становить 8,5%.

Отримані значення електричної ємності ізоляційних проміжків можна використовувати як довідкові для контролю налаштувань технологічного процесу виготовлення кабелів з сучасними полімерними композиціями під час приймальних випробувань і в експлуатаційних умовах.

Конфлікт інтересів. Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

ELECTROSTATIC FIELD IN UNSHIELDED POWER CABLES WITH DIFFERENT CONFIGURATIONS OF CORE

G.V. Bezprozvannykh¹, Yu.G. Gontar¹, I.A. Pushkar²

¹ National Technical University “Kharkov Polytechnic institute”,
Str. Kirpichova 2, Kharkiv, 61002, Ukraine.

² Enterprise LLC SPE ALAY,
Otradny Ave., 95 A2, office 202, Kyiv, 03061, Ukraine.

E-mail: Hanna.Bezprozvannukh@khpi.edu.ua; Yuliia.gontar@khpi.edu.ua; ihor.pushkar@ieec.khpi.edu.ua.

Introduction. Nuclear energy is an undeniable component of green energy and makes a significant contribution to achieving sustainable development goals and increasing the country's energy security. It is a reliable and predictable source of electricity for up to 60 years with an average cost of energy produced of 0.4 euros/kWh. **Problem.** Nuclear power plants consist of different zones that differ in ambient temperature, radiation level, and requirements for testing resistance to accidents. Cables for nuclear power plants are constantly exposed to difficult conditions throughout their entire service life and must provide reliable power supply, meet environmental safety and economic efficiency requirements. The introduction of modern innovative polymer compositions requires a comprehensive analysis of the influence of electrical insulation on the electrical parameters of cables of various designs at the stage of their design and production to ensure a high level of operational functionality at nuclear power plants. **The purpose** of the work is to analyze the distribution of the electrostatic field around insulated conductive cores of various configurations with the determination of their electrical capacitance in unshielded power cables of local power supply systems of the turbine compartment of nuclear power plants. **The methodology** is based on determining the electric charge density by the secondary source method based on the Fredholm integral equations of the first and second kind in models of unshielded power cables with sector and round conductive cores. **Scientific novelty.** The distribution of the plane-parallel electrostatic field in unshielded power cables has been determined depending on the scheme of applying an electric potential (zero and non-zero, equal to 1000 V) to conductive cores of various configurations. It has been proven that in a power cable with cores of a uniform configuration, under the condition of creating a dipole spatial distribution of the electrostatic field, the electric capacitances between the cores have the largest values. The correctness of the obtained theoretical provisions has been experimentally confirmed, which is confirmed by the coincidence of the calculated values of the electric capacitance with the experimental values with a difference of 8.5%. **Practical significance.** The

electric field strength on the surface of the electrical insulation of the cores has been determined depending on the inspection scheme when applying the working and increased test voltage. It is proposed to fill the interphase space with a dielectric material with a dielectric permittivity $\epsilon_1=2.0$ to reduce the electrostatic field strength by 2 times in the air gaps at the technological stage of cable manufacturing. The presented methodology for determining the spatial distribution of the electrostatic field around insulated conductive cores of various configurations can be used to estimate the values of the electrical capacitance of insulating gaps as reference for controlling cables at the technological stage of manufacturing during acceptance tests and in operational conditions. References 27, figures. 7.

Key words: nuclear power plants, criteria for NPP cables, power unshielded cables of the turbine compartment, sector conductive cores, electrostatic field, insulating gaps, electrical capacitance.

1. Legal frameworks for long-term operation of nuclear power reactors. Nuclear Energy Agency (NEA), 2019. No 7504. 180 p.
2. Tanarro Colodron J., Wastin F., Alvarez-Sarandés Lavandera R., Simola K., Renda G. Long-Term Horizon Scanning for Nuclear Technologies Yearly. Report. Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2024. 24 p. DOI: <https://doi.org/10.2760/292671>. JRC136139.
3. International Atomic Energy Agency. Ageing Management for Nuclear Power Plants: International Generic Ageing Lessons Learned (IGALL). Safety Reports Series. N. 82 (Rev. 1). Vienna: IAEA, 2020. 120 p.
4. Advancing the Robustness of Electrical Power Systems of Nuclear Power Plants. Nuclear Energy Agency. Nuclear energy agency committee on the safety of nuclear installations. NEA/CSNI/R(2020)8. 2023. 38 p.
5. Aszódi A., Biró B., Adorján L., Csaba Dobos A., Illés G., Tóth N.K., Zagyi D., Zsiborás Z.T. The effect of the future of nuclear energy on the decarbonization pathways and continuous supply of electricity in the European Union. *Nuclear Engineering and Design*. 2023. Vol. 415. No 15. P. 112688. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2023.112688>.
6. Bezprozvannykh G.V., Moskvitin Y. S. Strategy for managing the aging of nuclear power plant cables. *Energy saving. Energozbereshennia. Energetyka. Energoauditt*. 2022. No 11-12. Pp. 177-178. DOI: <https://doi.org/10.20998/2313-8890.2022.11.02>. (Ukr)
7. Liu F. Chapter 9. Nuclear Power Station Cables. The Global Cable Industry: Materials, Markets, Products. 2021. Pp. 249-289. DOI: <https://doi.org/10.1002/9783527822263.ch9>.
8. 383-2003, IEEE Standard for Qualifying Class 1E Electric Cables and Field Splices for Nuclear Power Generating Stations. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2004.94567>.
9. UL Standard, UL 2196. Fire Test for Circuit Integrity of Fire-Resistive Power, Instrumentation, Control and Data Cables. 2017.
10. 383-2003, IEEE Standard for Qualifying Class 1E Electric Cables and Field Splices for Nuclear Power Generating Stations. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2004.94567>.
11. Brown J., Bernstein R., Glover S., Neely J., Pena G., Williamson K., Zutavern F., Gelbard F. Submerged Medium Voltage Cable Systems at Nuclear Power Plants: A Review of Research Efforts Relevant to Aging Mechanisms and Condition Monitoring. SANDIA REPORT, 2015. 144 p. DOI: <https://doi.org/10.2172/1177756>.
12. Hongru Zhao, Jiejuan Tong, Jun Zhao, Jing Wu Failure characteristic of class 1E electrical cable used in the nuclear power plant exposed to fire. *Progress in Nuclear Energy*. 2022. Vol. 150. Pp. 104292. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2022.104292>.
13. Bezprozvannykh G.V., Grynishina M.V., Moskvitin Y.S. Requirements for cables as a category of construction products and thermal resistance of power cables. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2024. No 1. Pp. 61-68. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2024.1.08>. (Ukr)
14. Yan Li, Leijie Qi, Yifan Liu, Junjie Qiao, Maotao Wang, Xinyue Liu, Shasha Li Recent Advances in Halogen-Free Flame Retardants for Polyolefin Cable Sheath Materials. *Polymers*. 2022. No 14(14). Pp. 2876. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym14142876>.
15. IEC 60502-1: 2021 Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages from 1 kV ($U_m = 1,2$ kV) up to 30 kV ($U_m = 36$ kV). Part 1: Cables for rated voltages of 1 kV ($U_m = 1,2$ kV) and 3 kV ($U_m = 3,6$ kV). 2021. 55 p.
16. Ramy S. A. Afia, Ehtasham Mustafa, Zoltán Ádám Tamus Aging Mechanisms and Non-Destructive Aging Indicators of XLPE/CSPE Unshielded LV Nuclear Power Cables Subjected to Simultaneous Radiation-Mechanical Aging *Polymers*. 2021. Vol. 13(18). Pp. 3033. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym13183033>.
17. Bezprozvannykh G.V. Dielectric scanning of the transverse structure of stranded cables by the method of cumulative measurements. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2008. No 3. Pp. 30–36. (Rus)
18. Akihiro Ametani, Teruo Ohno, Naoto Nagaoka. Cable System Transients: Theory, Modeling and Simulation Impedance and Admittance Formulas. John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd., 2015. 390 p. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781118702154.ch2>.

19. Shafieipour M., Chen Z., Menshov A., De Silva J., Okhmatovski V. Efficiently computing the electrical parameters of cables with arbitrary cross-sections using the method-of-moments. *Electric Power Systems Research*. 2018. Vol. 162. Pp. 37-49. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2018.04.013>.
20. Gustavsen B.A., Bruaset A., Bremnes J.J., Hassel A. A Finite-Element Approach for Calculating Electrical Parameters of Umbilical Cables. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2009. Vol. 24(4). Pp. 2375-2384. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2009.2028481>.
21. Popa I. Numerical Modeling of Power Cables. *International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies (SIELA)*. 2016. Bourgas, Bulgaria. DOI: <https://doi.org/10.1109/SIELA.2016.7543035>.
22. Antoniou D., Tzimas A., Rowland S. M. Electric fields in LVDC cables. Proceedings of IEEE International Conference on Solid Dielectrics, ICSD.2013. Bologna, Italy. Pp. 484-487. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICSD.2013.6619680>.
23. Murglat M., Ulbig A., Krah S. Impedance modeling of low-voltage cables considering capacitances and parameter uncertainty using finite-element method. *Electric Power Systems Research*. 2024. Vol. 235. P. 110794.
24. Geis-Schroer J., Hubschneider S., Held L., Gielnik F., Armbruster M., Suriyah M., Leibfried T. Modeling of German Low Voltage Cables with Ground Return Path. *Energies*. 2021. Vol. 14(5). P. 1265. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14051265>.
25. Bezprozvannykh G.V., Pushkar O.A. Constructing a model of the influence of structural and technological inhomogeneities on electromagnetic energy losses in cables based on a twisted pair. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. Vol. 3. No 5 (123). Pp. 52-61. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.281013>.
26. Besprozvannykh A.V., Naboka B.G., Moskvitin E.S. Inspection of the insulation of three-phase cables in a metal sheath. *Elektrichestvo*. 2010. No 1. Pp. 48-54. (Rus).
27. Florkowski M. Influence of insulating material properties on partial discharges at DC voltage. *Energies*. 2020. No 13. P. 4305. DOI: <https://doi.org/10.3390/en13174305>.

Надійшла 04.01.2025

Остаточний варіант 10.02.2025