

ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

УДК 621.315.2

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.2.1/04>

Бурик М.П.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Лободзинський В.Ю.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Бурик І.П.

Конотопський інститут Сумського державного університету

Гричановська Т.М.

Конотопський інститут Сумського державного університету

Бібік В.В.

Конотопський інститут Сумського державного університету

МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ ДВОЖИЛЬНОГО КАБЕЛЮ ЗА ДОПОМОГОЮ СИСТЕМИ ЧОТИРЬОХ ЗАРЯДЖЕНИХ ОСЕЙ

Представлено дослідження плоскопаралельного поля однорідної за довжиною кабельної лінії передачі методом комп'ютерного моделювання в математичному середовищі Mathcad для фіксованого моменту часу. Наведено результати дослідження розподілу ліній однакового потенціалу та силових ліній електричного поля двожильного кабелю для різних діаметрів жил. Розроблено математичну модель картини електричного поля кабелю в комплексних координатах на основі системи чотирьох заряджених осей. Для розрахунку електричного поля кабелю у циліндричній системі координат використано теорему Гаусса, що є одним з основних законів електричного поля.

Математична модель дозволяє змінювати діаметри жил кабелю, відстань між жилами, радіус оболонки кабелю, використовувати різні ізоляційні матеріали за рахунок задання відповідного значення відносної діелектричної проникності.

Збільшення діаметру жили кабелю у 2.5 рази привело до зменшення напруженості для вказаної координати $x=75$ в 425 разів при відносній діелектричній проникності ізоляції в середні кабелю $\epsilon_r=1$. Цим досягнуто максимальну електричну міцність кабелю.

Отримані результати досліджень дозволяють визначати області з високими значеннями напруженості електричного поля в середині кабелю, які порівнюють з допустимими значеннями.

Картина електричного поля двожильного кабелю показує, що в діелектрику електричне поле має потенціальний характер, тобто є безвихровим, як і електростатичне поле для двох протилежних за знаком точкових зарядів. Лінії рівного потенціалу є окружностями, а поверхні рівного потенціалу являються коловими циліндрами. Одна з поверхонь перетворюється на площину з нульовим значенням потенціалу. Лінії напруженості являють собою дуги окружностей, які починаються з жили кабелю, що має позитивний заряд та закінчуються на жилі, що має негативний заряд.

Ключові слова: двожильний кабель, картина електричного поля, скалярний потенціал, напруженість електричного поля, комплексний потенціал.

Постановка проблеми. Для передачі та розподілу електричної енергії від джерела до споживача використовують кабель, який представляє собою одну або більше ізольованих жил, що зна-

ходяться як правило в металевій або неметалевій оболонці, зверху якої в залежності від умови прокладки та експлуатації може бути відповідне захисне покриття, в яку може входити броня [1].

Кабелі використовують як у силових колах так і для мережі зв'язку для передачі інформації на відстань [2].

Струмопровідні мідні чи алюмінієві жили застосовують для проходження електричного струму. Форма жил може бути круглою або фасонною. Виготовляють струмопровідні жили однодротовими чи багатодрововими. Ізоляція кабелю забезпечує необхідну електричну міцність струмопровідних жил відносно одна одної та до заземленої оболонки. В якості матеріалів для ізоляції використовують різні діелектрики, а саме: просочені маслоканіфольним складом папери марок МП-3 та МП-5, поліетилен, полівінілхлорид, етиленпропілен та інші.

Ізоляції кабелів повинна мати високу електричну міцність. Підвищення електричної міцності ізоляційного матеріалу кабелів, приводить до зменшення товщини ізоляції, що відповідно покращує відвід тепла від струмопровідних жил, та дозволяє збільшувати електричний струм, зменшує витрату діелектричних матеріалів на виготовлення кабелю, а також підвищує його механічні властивості (гнучкість) [2].

Зважаючи на це, актуальним є дослідження розподілу напруженості електричного поля ізоляції для визначення ділянок у кабелі з максимальними значеннями методом комп'ютерного моделювання. Картина електричного поля кабелю дозволить знаходити місця пробою ізоляції або погіршення ізоляційних властивостей ще на етапі проектування електротехнічного пристрою.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Основні властивості та методи аналізу електромагнітного поля припускають якісне та кількісне дослідження електромагнітних полів, які зустрічаються у електротехнічних пристроях (кабелях). Для цього найбільш придатні рівняння електродинаміки в інтегральній та диференціальній формах.

Дослідження складних електромагнітних процесів у електротехнічних установках проводяться за допомогою аналітичних, графічних та чисельних методів на основі відомих сучасних програмних комплексів (Mathcad, Matlab, COMSOL Multiphysics, Ansys та інших).

Пакет Mathcad є середовищем візуального програмування та використовує звичайні математичні позначення. Математичний пакет Matlab є своєрідною мовою програмування високого рівня. Ці математичні пакети використовуються для моделювання складних систем [4-9]. Наприклад, ідентифікація несправностей системи заземлення екранів високовольтних кабелів на основі аналізу

струмів короткого замикання реалізована шляхом математичного моделювання каскадної схеми із застосуванням програмного продукту Matlab в пакеті прикладних програм Simulink за допомогою бібліотечного блоку SimPowerSystems [10].

При аналізі плоскопаралельного електричного поля кабелю також використовують програмні пакети мультифізичного моделювання Comsol Multiphysics та Ansys для підвищення ступеня візуалізації результатів. Програмне забезпечення Comsol Multiphysics застосовують для дослідження методом скінчених елементів, імітації різних фізичних та інженерних додатків [11]. Ansys є професійним кінцево-елементним розрахунковим комплексом, який вирішує завдання електромагнетизму, теплообміну та інше [12].

Але останні три програмні пакети мають недолік, а саме високу вартість.

Постановка завдання. Розробити математичну модель для побудови картини електричного поля в комплексних координатах в середовищі Mathcad. Дослідити електричне поле двожильного кабелю для фіксованого моменту часу та отримати практичні навички використання сучасних методів розрахунку та моделювання електромагнітних полів. Також проаналізувати вплив зміни діаметру перерізу жили кабелю на картину плоскопаралельного поля.

Виклад основного матеріалу дослідження. Під час дослідження кабелів в першу чергу визначають максимальну напруженість електричного поля ізоляції та порівнюють з допустимим значенням. Геометрія кабелів рахується заданою.

Теоретичний розрахунок кабелю допускає деякі спрощення, які не порушують принципи дії пристрою, при зображенні (рис. 1):

- 1) для кабелю зображуються тільки жили та концентрична оболонка;
- 2) простір між ними заповнено ізоляцією з діелектричною проникністю ϵ_1 ;
- 3) пристрій для підключення до джерела напруги не показано;
- 4) не наведено деталі, що фіксують жили.

Для розрахунку поля кабелю у циліндричній системі координат застосовують теорему Гаусса, яка є одним з основних законів електричного поля

$$\oint_S \bar{D} d\bar{s} = \oint_S \epsilon_0 \bar{E} d\bar{s} = \epsilon_0 \oint_S \bar{E} d\bar{s} = q, \quad (1)$$

$$\oint_S \bar{E} d\bar{s} = \frac{q}{\epsilon_0},$$

де \bar{D} – вектор електричного зміщення (електричної індукції), $\frac{К}{м^2}$;

S – деяка замкнута поверхня, m^2 ;
 $\epsilon_0 = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot 9 \cdot 10^9}$ – електрична стала, $\frac{\Phi}{M}$;
 \vec{E} – вектор напруженості електричного поля, $\frac{B}{M}$;
 q – електричний заряд, K .

Електричне поле кабелю буде плоскопаралельне і напруженість E поля буде залежати тільки від радіуса циліндра R . У будь-якій точці, яка буде лежати на поверхні циліндра радіуса R , вектор \vec{D} має єдину радіальну складову D_R , яка стала у всіх точках цієї поверхні. Потік вектора \vec{D} через поверхню цього циліндра з зарядом τl в середині нього знаходиться як:

$$\oint_S \vec{D} d\vec{s} = \oint_S D_R ds = D_R \oint_S ds = D_R 2\pi R l = \epsilon_r \epsilon_0 E_R 2\pi R l = \tau l, \quad (2)$$

$$E = E_R = \frac{\tau l}{2\pi R l \epsilon_r \epsilon_0} = \frac{\tau}{2\pi R \epsilon_r \epsilon_0},$$

де l – довжина циліндра, m ;
 R – радіус основи циліндра, m ;
 ϵ_r – відносна діелектрична проникність, $\frac{\Phi}{\frac{K}{M}}$;
 τ – заряд на одиницю довжини кабелю, $\frac{K}{M}$.

Потік вектора \vec{D} через торцеві частини (основи) циліндра дорівнює нулю.

Скалярний потенціал зарядженої осі ϕ дорівнює

$$E = -\frac{d\phi}{dR},$$

$$\phi = -\int E_R dR = -\int \frac{\tau}{2\pi R \epsilon_r \epsilon_0} dR = -\frac{\tau}{2\pi R \epsilon_r \epsilon_0} \ln R + C. \quad (3)$$

Геометричні розміри: $R = 10$ (мм); $l = 10$ (мм);
 діаметр жили $d = 1.5$ (мм); $\epsilon_r = 1$. Між жилами кабелю прикладено напругу $U = 100$ (В).

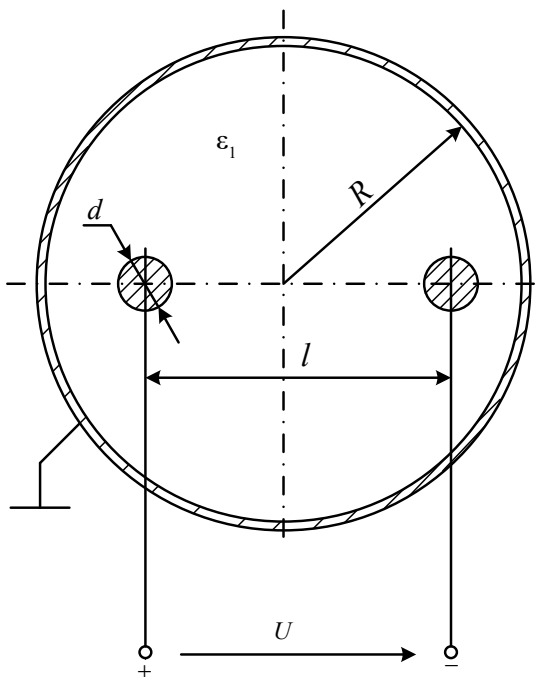


Рис. 1. Поперечний переріз двожильного кабелю та його геометрія

Замінімо кабель системою чотирьох заряджених осей, так щоб оболонка кабелю залишилася екіпотенціальною поверхнею (рис. 2). Для цього повинні виконуватися співвідношення [13]:

$$s - a = \frac{l}{2} \text{ та } s^2 = a^2 + R^2,$$

тоді $a = \frac{R^2}{l} - \frac{l}{4} = \frac{10^2}{10} - \frac{10}{4} = 7.5$ (мм);

$$s = \frac{R^2}{l} + \frac{l}{4} = \frac{10^2}{10} + \frac{10}{4} = 12.5$$
 (мм);

$$s + a = \frac{2 \cdot R^2}{l} = \frac{2 \cdot 10^2}{10} = 20$$
 (мм).

Потенціал будь-якої точки A з координатами x, y , що задовольняє умові $x^2 + y^2 \leq R^2$ за методом накладання для двох двопровідних ліній (1 – 2 та 1' – 2').

Прийmemo $\phi = 0$ при $x = 0$

$$\phi(x, y) = \frac{\tau}{2\pi \epsilon_r \epsilon_0} \left(\ln \left(\frac{r_2(x, y)}{r_1(x, y)} \right) + \ln \left(\frac{r_1'(x, y)}{r_2'(x, y)} \right) \right) \quad (4)$$

де x та y вимірюються в мм.

$$r_1(x, y) = \sqrt{\left(\frac{l}{2} + x\right)^2 + y^2};$$

$$r_2(x, y) = \sqrt{\left(\frac{l}{2} - x\right)^2 + y^2};$$

$$r_1'(x, y) = \sqrt{\left(2a + \frac{l}{2} + x\right)^2 + y^2};$$

$$r_2'(x, y) = \sqrt{\left(2a + \frac{l}{2} - x\right)^2 + y^2}.$$

Координати точок на поверхні жил кабелю x_1, x_2 та y_1, y_2

$$x_1 = -\left(\frac{l}{2} + \frac{d}{2}\right) = -\left(\frac{10}{2} + \frac{1.5}{2}\right) = -5.75; \quad y_1 = 0;$$

$$x_2 = \left(\frac{l}{2} + \frac{d}{2}\right) = \left(\frac{10}{2} + \frac{1.5}{2}\right) = 5.75; \quad y_2 = 0.$$

Потенціал на поверхні проводів ϕ_1 та ϕ_2 в указаних точках:

$$\phi_1(x_1, y_1) = \frac{\tau}{2\pi \epsilon_r \epsilon_0} \left(\ln \left(\frac{2l}{d} \right) + \ln \left(\frac{2a}{2a+l} \right) \right); \quad (5)$$

$$\phi_2(x_2, y_2) = \frac{\tau}{2\pi \epsilon_r \epsilon_0} \left(\ln \left(\frac{2l}{d} \right) + \ln \left(\frac{2a+l}{2a} \right) \right).$$

Напруга між жилами кабелю (за умовою завдання $U = 100$ (В))

$$U = \phi_1 - \phi_2 = \frac{\tau}{2\pi \epsilon_r \epsilon_0} \left(\ln \left(\frac{2l}{d} \right) + \ln \left(\frac{2a}{2a+l} \right) \right) = \frac{\tau}{2\pi \epsilon_r \epsilon_0} \left(\ln \left(\frac{2l}{d} \right) + \ln \left(\frac{2a}{2a+l} \right) \right) = 100$$
 (В). (6)

Лінійний поверхневий заряд на жилах кабелю

$$\tau = \frac{U \pi \epsilon_r \epsilon_0}{\left(\ln \left(\frac{2l}{d} \right) + \ln \left(\frac{2a}{2a+l} \right) \right)} = \frac{100 \cdot \pi \cdot 1 \cdot \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot 9 \cdot 10^9}}{\left(\ln \left(\frac{2 \cdot 10}{1.5} \right) + \ln \left(\frac{2 \cdot 7.5}{2 \cdot 7.5 + 10} \right) \right)} = 1.337 \cdot 10^{-9} \left(\frac{Kл}{M} \right) \quad (7)$$

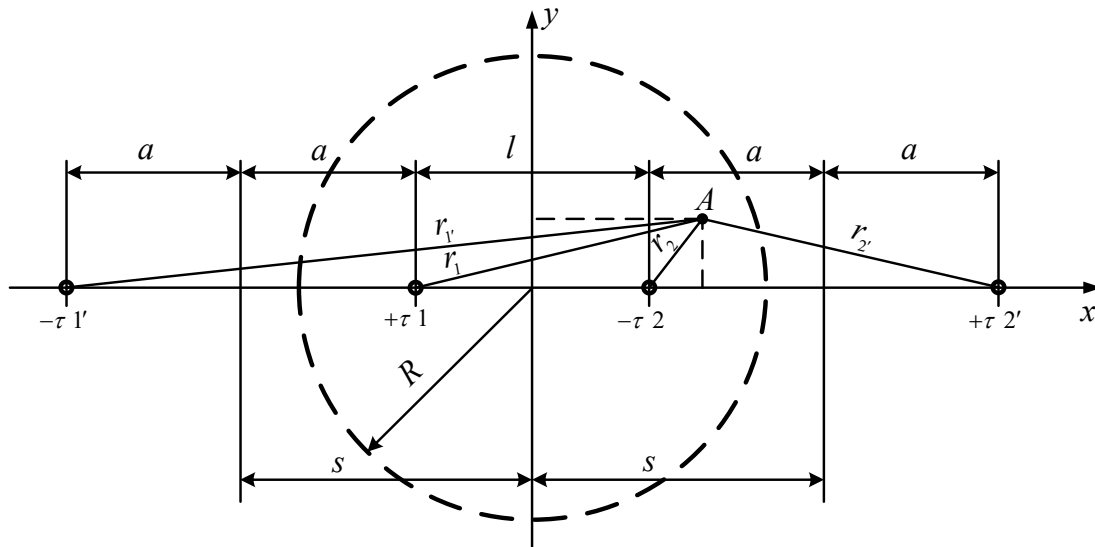


Рис. 2. Система чотирьох заряджених осей

Погона ємність на одиницю довжини кабелю дорівнює

$$C_0 = \frac{\tau}{U} = \frac{1.337 \cdot 10^{-9}}{100} = 1.337 \cdot 10^{-11} \left(\frac{\Phi}{\text{М}} \right). \quad (8)$$

Для створення картини електричного поля двожильного кабелю в комплексних координатах необхідно використати комплексний потенціал [13]. Лінії однакового потенціалу задаються функцією $U(x, y)$, а лінії струму функцією $V(x, y)$. Для зручності координати (x, y) на площині задаються комплексною координатою $z(x, y) = x + (-1)^{0.5} \cdot y$.

Обидві функції $U(x, y)$ та $V(x, y)$ є частинами комплексного потенціалу

$$W(x, y) = U(x, y) + (-1)^{0.5} \cdot V(x, y). \quad (9)$$

Реальна $U(x, y)$ і уявна $V(x, y)$ складові комплексного потенціалу зв'язані умовою Коші-Рімана [14]:

$$\frac{\partial U(x, y)}{\partial x} = \frac{\partial V(x, y)}{\partial y}; \quad \frac{\partial U(x, y)}{\partial y} = -\frac{\partial V(x, y)}{\partial x}. \quad (10)$$

Зв'язок між функцією потенціалу $U(x, y)$ та функцією потоку $V(x, y)$ дозволяє при наявності однієї функції, наприклад, потенціалу $U(x, y)$ визначити іншу – функцію потоку $V(x, y)$. Для цього використовують умову Коші-Рімана. З першого рівняння (9) отримаємо

$$\frac{\partial U(x, y)}{\partial x} = \frac{\partial V(x, y)}{\partial y}; \quad (11)$$

$$V(x, y) = \int \frac{\partial U(x, y)}{\partial x} dy + f(x).$$

Для визначення невідомої функції $f(x)$ використаємо друге рівняння Коші-Рімана

$$\frac{\partial U(x, y)}{\partial y} = -\frac{\partial V(x, y)}{\partial x} = -\left(\int \frac{\partial^2 U(x, y)}{\partial x^2} dy + \frac{df(x)}{dx} \right); \quad (12)$$

$$f(x) = -\int \frac{\partial U(x, y)}{\partial y} dx + \int dx \left[\frac{\partial^2 U(x, y)}{\partial x^2} dy + C \right].$$

Для відображення картини електричного поля кабелю, побудуємо сітку (масив) з $N \times N$ комірок ($N=250$), до якого занесемо комплексні потенціали точок площини 25×25 мм. На 1 мм площини приходиться 10 точок, для яких визначаються напруженість $E(x, y) = U(x, y)$ та потенціал $\varphi(x, y) = U(x, y)$

$$W(x, y) = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} \left(\ln \left(\frac{z(0.5 \cdot l - x, -y)}{z(0.5 \cdot l + x, y)} \right) + \ln \left(\frac{z(-0.5 \cdot l - 2 \cdot a - x, -y)}{z(-0.5 \cdot l - 2 \cdot a + x, y)} \right) \right) \quad (13)$$

$W(x, y)$ -комплексний потенціал;
 $U(x, y)$ -потенціальна функція;
 $V(x, y)$ -силова функція.

Розподіл потенціалу у просторі та всередині оболонки кабелю відповідає умовам:

$$x_i^2 + y_j^2 \leq R^2; \quad (14)$$

$$(0.5 \cdot l + x_i)^2 + y_j^2 < (0.5 \cdot d)^2;$$

$$(-0.5 \cdot l + x_i)^2 + y_j^2 < (0.5 \cdot d)^2,$$

де $i=0,1,2..N$ – точки по горизонтальній осі;
 $j=0,1,2..N$ – точки по вертикальній осі.

Об'єднаємо область визначення функції з дискретною сіткою (масивом):

$$x_i = -s + \frac{2 \cdot s}{N} \cdot i; \quad y_j = -s + \frac{2 \cdot s}{N} \cdot j, \quad (15)$$

де x_i – дискретизація за віссю x ; y_j – дискретизація за віссю y ; $\frac{2 \cdot s}{N}$ – крок дискретизації.

Підставляємо масив дискретних значень функцій до вузлів сітки $W_{i,j} = f(x_i, y_j)$ та отримаємо картину електричного поля двожильного кабелю, яка наведена на рис. 3. Червоним кольором показані силові лінії, а синім кольором наведені лінії однакового потенціалу.

На (рис. 4, а) представлені оцифровані силові лінії, як силові функції $V(x, y) = \text{Im}(W(x, y))$, а оцифровані лінії однакового електричного

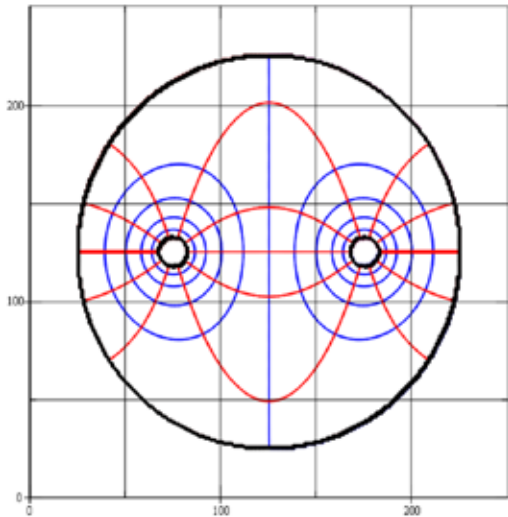


Рис. 3. Картина електричного поля двожильного кабелю

потенціалу показані на (рис.4, б), як потенціальні функції $U(x, y) = \text{Re}(W(x, y))$.

Графіки розподілу електричного потенціалу $\varphi = U(\text{В})$ уздовж осі x при вказаній координаті y у наведені на рис. 5. Графіки розподілу електричного потенціалу $U(\text{В})$ уздовж осі y при вказаній координаті x представлені на рис. 6.

Графіки розподілу напруженості $E(\text{В/мм})$ уздовж осі x при вказаній координаті y у показані на рис. 7 та (рис. 9, а).

Графіки розподілу напруженості $E(\text{В/мм})$ уздовж осі y при вказаній координаті x , представлені на рис. 8 та (рис. 9, б).

Проведемо дослідження впливу розміру поперечного перерізу жили на картину електричного поля кабелю (рис. 10) для досягнення максимальної електричної міцності кабелю. Збільшив в 2.45 рази

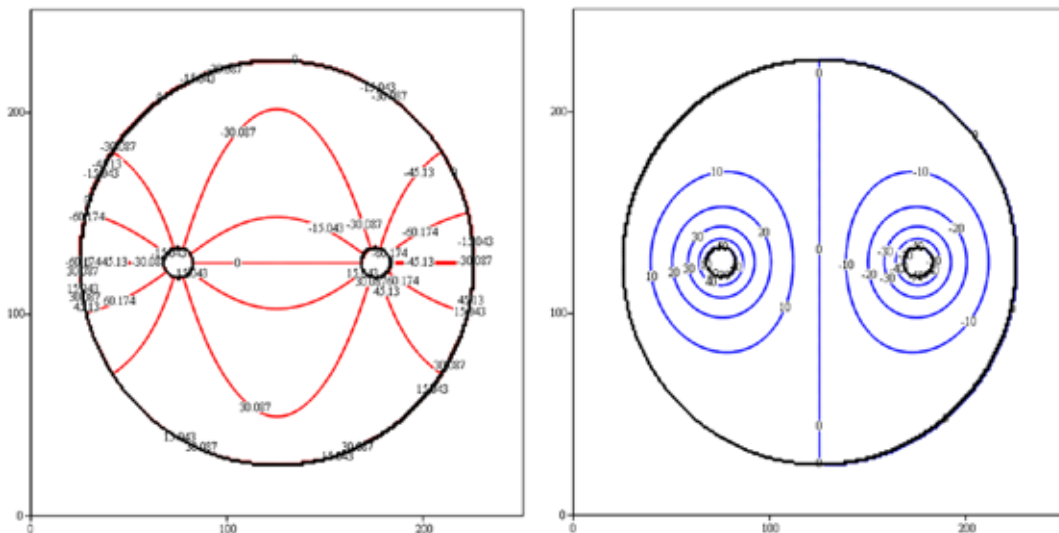


Рис. 4. Графіки оцифрованих силових ліній (а) та ліній однакового електричного потенціалу (б) двожильного кабелю

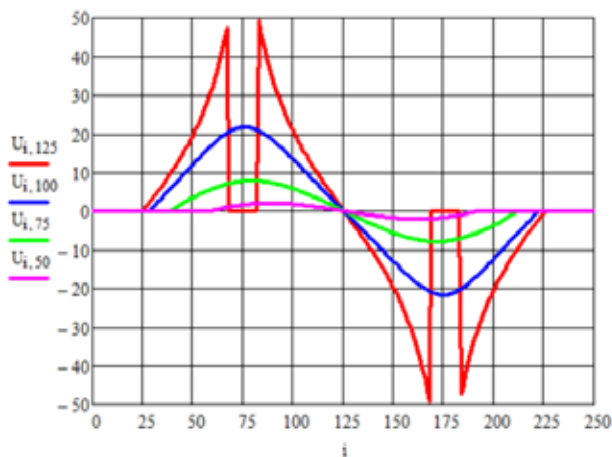


Рис. 5. Графіки розподілу електричного потенціалу $U(\text{В})$ уздовж осі x при вказаній координаті y

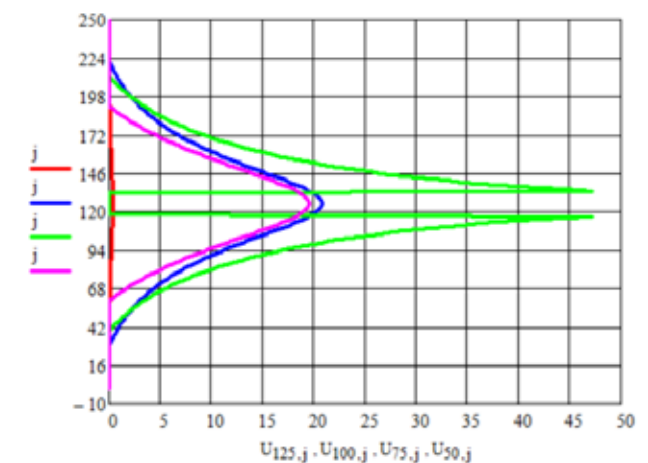


Рис. 6. Графіки розподілу електричного потенціалу $U(\text{В})$ уздовж осі y при вказаній координаті x

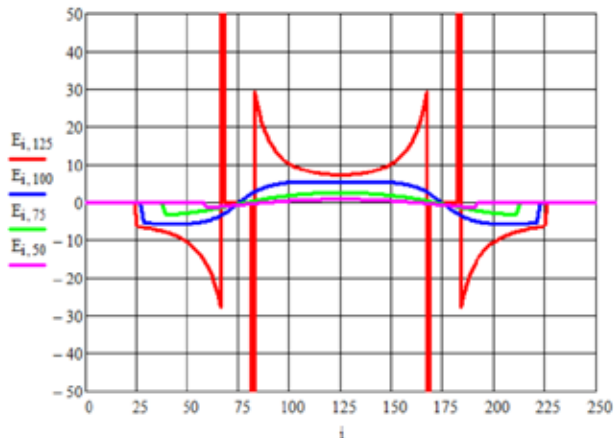


Рис. 7. Графіки розподілу напруженості E (В/мм) уздовж осі x при вказаній координаті y

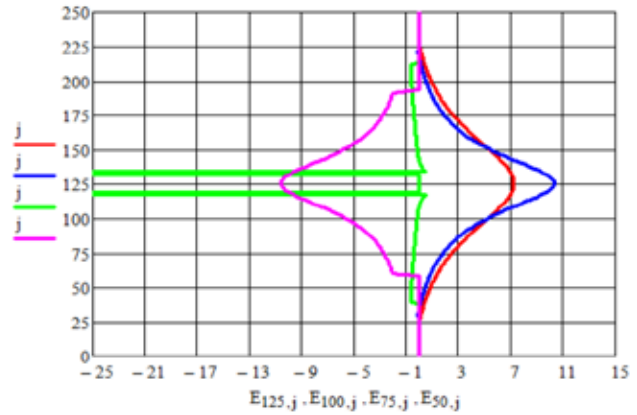


Рис. 8. Графіки розподілу напруженості E (В/мм) уздовж осі y при вказаній координаті x

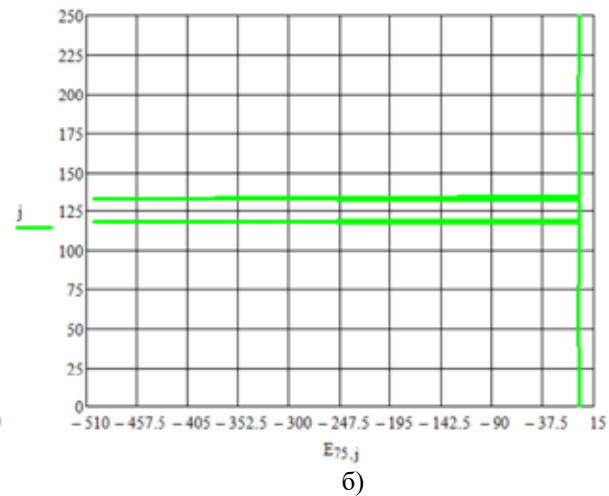
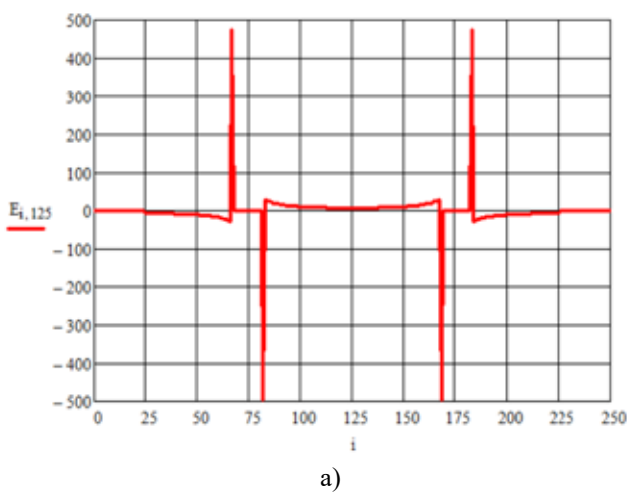


Рис. 9. Графіки розподілу напруженості E (В/мм) уздовж осі x при вказаній координаті $y=125$ (а) та уздовж осі y при вказаній координаті $x=75$ (б) для діаметра жили кабелю $d = 1.5$ (мм)

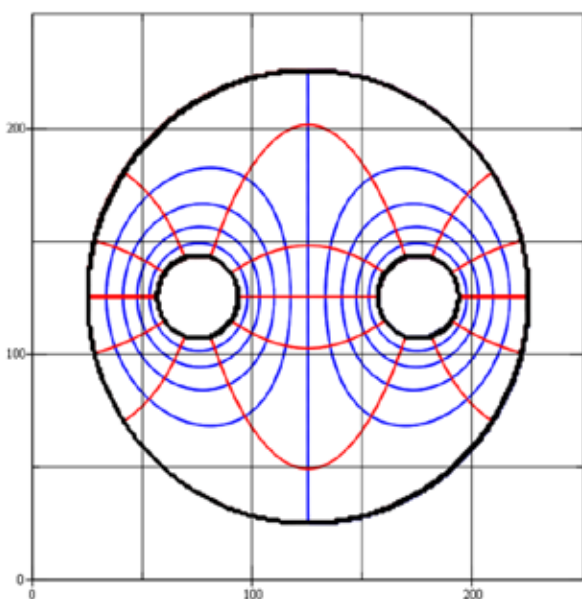


Рис. 10. Картина електричного поля двожильного кабелю при збільшеному діаметрі жили кабелю в 2.453 разів

переріз жили порівняно з заданим значенням ($d = 1.5$ (мм)) та виведемо розподіл напруженості для вказаних координат (рис. 11).

Максимальне значення напруженості електричного поля для вказаної координати $y=125$ не змінилась під час розподілу уздовж осі x і $E = 480$ (В/мм) при збільшенні діаметру жили кабелю, а для вказаної координати $x=75$ при розподілу уздовж осі y значення напруженості зменшилось з 510(В/мм) до 1.2(В/мм).

Висновок. Розроблена математична модель електричного поля двожильного кабелю дозволяє аналізувати розподіл вектора напруженості \vec{E} та скалярного потенціалу електричного поля ϕ вздовж осей x та y . Також математична модель дозволяє змінювати діаметр жил кабелю d , відстань між жилами l , радіус оболонки кабелю R , використовувати різні ізоляційні матеріали за рахунок задання відповідного значення відносної діелектричної проникності ϵ_r .

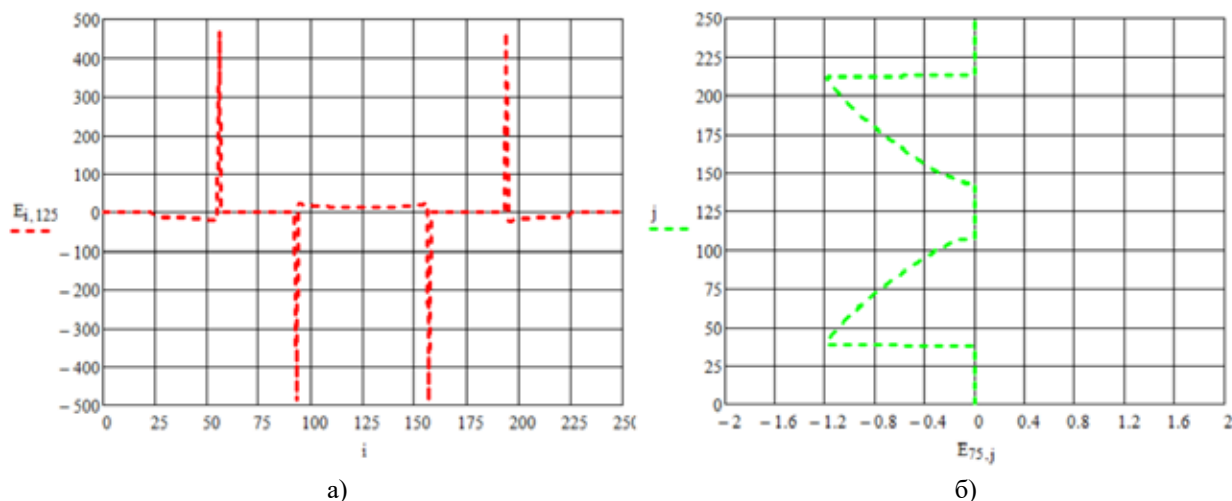


Рис. 11. Графіки розподілу напруженості E (В/мм) уздовж осі x при вказаній координаті $y=125$ (а) та уздовж осі y при вказаній координаті $x=75$ (б) для діаметра жили кабелю $d = 3.7$ (мм)

Збільшення діаметру жили кабелю у 2.5 рази привело до зменшення напруженості для вказаної координати $x=75$ в 425 разів при відносній діелектричній проникності ізоляції в середні кабелю $\epsilon_r = 1$. Це обумовлено тим, що при виконанні співвідношення $\ln \frac{R}{0.5 \cdot d} = 1$ або $\frac{R}{0.5 \cdot d} = e \approx 2.7$ напруженість \bar{E}_{\max} становиться мінімальною та досягається максимальна електрична міцність кабелю.

Отримані результати досліджень дозволяють визначати області з високими значеннями напру-

женості електричного поля в середині кабелю, які порівнюють з допустимими значеннями. А це дозволяє знаходити місця пробою ізоляції або ділянки з погіршеною ізоляційною властивістю.

Електричне поле в середні металевих жил кабелю відсутнє, але на поверхні воно значно зростає. Картина електричного поля двожильного кабелю показує, що в діелектрику, у якому розташовані жили кабелю зі струмом (поперечний переріз жили має форму кола), електричне поле має потенціальний характер, як і електростатичне поле.

Список літератури:

1. Бачелис Д.С., Саакян А.Е. Электрические кабели, провода и шнуры: справочник / под общ. ред. Н. И. Белоруссов. М, 1971. Изд. 3. 704 с.
2. Вакуленко О.В., Голь В.Д., Ірха М.С., Хахлюк О.А. Лінії передачі: підручник. Київ: ІСЗЗІ КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 218 с.
3. Дьяков Є.Д. Силові кабелі. Тексти лекцій з курсу “Кабельні й повітряні лінії електропередачі”. Харків: ХНАМГ, 2007. 64 с.
4. Міліх В. І. Електромагнітні поля, параметри та процеси в електротехнічних пристроях: підручник. Харків, 2020. 396 с.
5. Бойко В.С., Бойко В.В., Видолоб Ю.Ф., Курило І.А., Шеховцов В.І. та Шидловська Н.А. Теоретичні основи електротехніки: підручник / за заг. ред. І.М. Чиженка, В.С. Бойка. Київ, 2013. Т. 3. 244 с.
6. Задачин В. М., Конюшенко І.Г. Чисельні методи: навчальний посібник. Харків: ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2014. 180 с.
7. Пакети прикладних програм для моделювання електромагнітних полів електричних машин “Використання комп’ютерних систем математичних розрахунків MATLAB та FEMM для аналізу електричних машин” Київ, 2022. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/49103> (дата звернення: 17.03.2023)
8. Бельцевич Г.Н. Сборник специализированных задач по курсу Теоретические основы электротехники для специальностей «Электроизоляционная и кабельная техника и полупроводники и диэлектрики». М: МЭИ, 1985. 50 с.
9. Андреев Г.П., Баранов И.И. Сборник задач и упражнений по теоретическим основам электротехники: Учеб. пособие для вузов / под ред. П.А. Ионкина. М.: Энергоиздат, 1982. 768 с.
10. Лободзинський В.Ю., Бурик М.П., Спінул Л.Ю., Чибеліс В.І., Ілліна О.О. Ідентифікація несправностей системи заземлення екранів високовольтних кабелів на основі аналізу струмів короткого замикання. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. Том 33 (72), №2, 2022. с. 19-23. DOI: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.2/04>

11. Bhatti A., Peng X., Yang B. and Xie C., Effect of Void on Temperature Distribution in XLPE Power Cables by COMSOL Multiphysics Simulation, *2021 IEEE 4th International Electrical and Energy Conference (CIEEC)*, 2021, pp. 1-4. DOI: 10.1109/CIEEC50170.2021.9510219.
12. Fetisov S., Zubko V., Zanegin S., Nosov A. and Vysotsky V. Numerical Simulation and Cold Test of a Compact 2G HTS Power Cable, *in IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2018. Vol. 28, no. 4, pp. 1-5. DOI: 10.1109/TASC.2018.2821708.
13. Ионкин П.А., Даревский А.И., Кухаркин Е.С. Теоретические основы электротехники «Нелинейные цепи и основы теории электромагнитного поля»: Учебник для электротехн. вузов. Изд. 2-е, перераб. и доп. / под ред. П.А. Ионкина. М.: Высшая школа, 1976. Т.2. 383 с.
14. Методи електродинаміки в електротехніці та електромеханіці. Київ, 2021. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/45612> (дата звернення: 17.03.2023).

Buryk M.P., Lobodzynskyi V.Yu., Buryk I.P., Grychanovs'ka T.M., Bibyk V.V. SIMULATION OF THE ELECTRIC FIELD OF A TWO-WIRE CABLE USING A SYSTEM OF FOUR CHARGED AXES

The study of the plane-parallel field of a uniform length transmission cable line by computer modeling in the Mathcad mathematical environment for a fixed moment of time is presented. The results of the study of the distribution of lines of the same potential and lines of force of the electric field of a two-wire cable for different diameters of the wires are presented. A mathematical model of the picture of the electric field of the cable in complex coordinates based on the system of four charged axes has been developed. To calculate the electric field of the cable in the cylindrical coordinate system, the Gauss theorem is used, which is one of the basic laws of the electric field.

The mathematical model allows you to change the diameters of the cable cores, the distance between the cores and the radius of the cable sheath, to use different insulating materials by setting the appropriate value of the relative dielectric constant.

An increase in the diameter of the cable core by 2.5 times led to a decrease in tension for the specified coordinate $x=75$ by 425 times at the relative dielectric permeability of the insulation in the middle of the cable $\epsilon_r=1$. This achieves the maximum electrical strength of the cable.

The obtained research results allow determining areas with high values of electric field intensity in the middle of the cable, which are compared with permissible values.

The picture of the electric field of a two-wire cable shows that in a dielectric the electric field has a potential character; that is, it is vortex-free, as is the electrostatic field for two point charges of opposite sign. Lines of equal potential are circles, and surfaces of equal potential are circular cylinders. One of the surfaces turns into a plane with zero potential. Lines of tension are arcs of circles that start at the cable core that has a positive charge and end at the core that has a negative charge.

Key words: *two-wire cable, electric field pattern, scalar potential, electric field intensity, complex potential.*