

УДК 621.315

*А. Г. ГУРИН, Л. А. ЩЕБЕНЮК, О. В. ГОЛИК, О. В. ІЛЬЧЕНКО, Т. А. РОДЯХІНА***ВПЛИВ ПОЛЯРИЗАЦІЇ ІЗОЛЯЦІЇ ЗАХИЩЕНИХ ПРОВІДІВ НА ЕЛЕКТРИЧНЕ ПОЛЕ ЛІНІЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ**

Наведено аналітичне рішення за допомогою подвійного конформного перетворення системи координат для основної електростатичної задачі – знаходження розподілу потенціалу в замкнутій області для дослідження розподілу напруженості електричного поля в ізоляції захищених провідів. Можливість аналітичного рішення і побудови картини неоднорідного електричного поля для захищених провідів ліній електропередачі дає можливість аналізувати вплив будь-яких конструктивних і електрофізичних параметрів, а саме – конструкції провідів та електрофізичних параметрів їх ізоляції. Наведено результати такого аналізу стосовно полярності ізоляційного матеріалу, площі поперечного перерізу провідника, відстані між провідниками, що є основою для прийняття технічних рішень при виготовленні і експлуатації захищених провідів. Їх впровадження є однією з найбільш прогресивних і перспективних тенденцій розвитку вітчизняних електричних розподільних мереж.

**Ключові слова:** захищені проводи, конформне перетворення, напруженість електричного поля, аналітичне рішення, площа поперечного перерізу провідника, відстань між провідниками

*А. Г. ГУРИН, Л. А. ЩЕБЕНЮК, О. В. ГОЛИК, О. В. ІЛЬЧЕНКО, Т. А. РОДЯХІНА***ВЛИЯНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИИ ИЗОЛЯЦИИ ЗАЩИЩЕННЫХ ПРОВОДОВ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ**

Приведено аналитическое решение с помощью двойного конформного превращения системы координат для основной электростатической задачи – нахождения распределения потенциала в замкнутой области для исследования распределения напряженности электрического поля в изоляции защищенных проводов. Возможность аналитического решения и построения наглядной картины неоднородного электрического поля для защищенных проводов линий электропередачи позволяет анализировать влияние конструктивных и электрофизических параметров, а именно – конструкции провода, электрофизических параметров их изоляции. Приведены результаты такого анализа относительно полярности изоляционного материала, площади поперечного сечения проводника, расстояния между проводами, которые являются основой для принятия технических решений при изготовлении и эксплуатации защищенных проводов. Их внедрение является одной из наиболее прогрессивных и перспективных тенденций развития отечественных электрических распределительных сетей.

**Ключевые слова:** защищенные провода, конформное преобразование, напряженность электрического поля, аналитическое решение, площадь поперечного сечения проводника, расстояние между проводами

*A. G. GURIN, L.A. SHCHEBENIUK, O.V. GOLIK, O.V. ILCHENKO, T.A. RODJACHINA***EFFECT OF POLARISATION OF INSULATION OF PROTECTED WIRES ON ELECTRIC FIELD OF POWER TRANSMISSION LINE**

There is presented an analytical solution by means of double conformal transformation in a coordinate system for the main electrostatic task - finding potential distribution in a closed area to study the distribution of electric field intensity in insulation of protected wires. Possibility of analytical solution and construction of visual picture of non-uniform electric field for protected wires of power transmission lines makes it possible to analyze influence of structural and electrophysical parameters, namely - design of wire, electrophysical parameters of their insulation. Results of such analysis regarding polarity of insulating material, cross-sectional area of conductor, distance between wires, which are the basis for making technical decisions in manufacturing and operation of protected wires, are given. Their introduction is one of the most progressive and promising trends in the development of domestic electric distribution networks.

**Keywords:** protected wires, conformal conversion, electric field strength, analytical solution, conductor cross-sectional area, distance between wires

**Актуальність** роботи зумовлена тим, що на сьогоднішній день замість неізольованих провідів повітряних ліній електропередачі все ширше проектується і будуються лінії електропередачі напругою 0,38 - 35 кВ із застосуванням захищених (ізольованих) провідів (ЗП) [1]. Це одна з найбільш прогресивних і перспективних тенденцій розвитку електричних розподільних мереж. Основною особливістю конструкції ЗП порівняно із традиційною є наявність ізоляції на струмопровідних жилах. Основною перевагою застосування ізольованих провідів є значне підвищення надійності розподільних електричних мереж і, як наслідок цього, зменшення експлуатаційних витрат.

Високовольтні самонесучі ізольовані проводи, розраховані на робочу напругу до 35 кВ частотою 50 Гц з різною, зокрема поліетиленовою, ізоляцією, призначені для повітряних ліній електропередачі є інноваційною продукцією вітчизняної кабельної техніки і забезпечують суттєвий економічний і екологічний ефект.

Одночасно виникає ряд проблем, пов'язаних з впливом поляризації матеріалу ізоляції на електричне поле в діелектрику ЗП [2] повітряних ліній електропередачі, яке зумовлює електричну міцність ізоляції в номінальних і аварійних режимах. Процес поляризації діелектрика в електричному полі змінного струму зумовлює перерозподіл електричного поля

© А. Г. Гурін, Л. А. Щепенюк, О. В. Голик, О. В. Ільченко, Т. А. Родяхіна, 2019

повітряних ліній електропередачі, зокрема в разі дії комутаційних чи грозових перенапруг. Тому дослідження впливу поляризації діелектрика на електричне поле повітряної лінії, в якій застосовано ЗП є актуальним.

Аналіз фізичних явищ і створення конкретних програмних засобів побудови **наглядної** картини неоднорідного електричного поля в інноваційних технічних пристроях є важливою складовою профорієнтаційної підготовки учнів старших класів як майбутніх абітурієнтів для навчальних технічних закладів електроенергетики та кабельної техніки.

Особливістю електричного поля між проводом і землею є його неоднорідність. Тобто визначення його параметрів, найперше напруженості поля, виконують за допомогою емпіричних формул або методом сіток, оснований на уявленні про елементарну трубку поля. Ці методи по суті своїй є графоаналітичними.

Ефективність дослідження впливу матеріалів ізоляційного проміжку і їх електрофізичних характеристик суттєво збільшується, якщо є аналітичне рішення, яке дозволяє проаналізувати вплив будь-яких конструктивних і електрофізичних параметрів ізоляції на напруженість поля.

Між провідником ЛЕП і землею, якщо знехтувати впливом сусідніх проводів, напруженість неоднорідного поля можна оцінити розрахунком за відомою [1] моделлю електричного поля між площиною і паралельним їй циліндром радіусом, що дорівнює радіусові провідника, і віддаленим від площини на відстань, яка дорівнює відстані від провідника до землі.

Система координат перерізу вказаної системи електродів площиною  $Z$ , перпендикулярною до осі циліндра за допомогою конформного відображення комплексної площини  $Z$  на комплексну площину  $W$  за допомогою перетворення  $W = 1/Z$  дає у площині  $W$  систему двох коаксіальних циліндрів, для якої розрахунок напруженості поля в будь-якій точці поля відомий [1].

**Мета роботи.** Розроблення алгоритму аналітичного рішення для дослідження розподілу напруженості електричного поля в ізоляції захищених проводів і побудови наглядної картини неоднорідного електричного поля між проводом і землею та між проводами для дослідження впливу будь-яких конструктивних і електрофізичних параметрів захищених проводів, наприклад:

- розміру провідника, товщини і матеріалу ізоляції,
- відстані між провідником і землею,
- відстані між провідниками,
- електрофізичних параметрів матеріалів ізоляційного проміжку, зокрема, їх діелектричної проникності,

що дає змогу аналізувати вплив конструкції і розташування захищеного (ізольованого) проводу на напруженість електричного поля.

**Основні результати.** Виконано аналітичну побудову картини електричного поля між поверхнею провідника і землею та між поверхнями провідників за

допомогою подвійного конформного перетворення системи координат.

Для цього відповідні еквіпотенціали, розташовані в комплексній площині  $Z(x; jy)$  (рис.1), зображені у вигляді концентричних кіл в комплексній площині  $W(u; jv)$  за допомогою конформного перетворення  $W = 1/Z$ :

$$u = x/(x^2 + y^2); v = -y/(x^2 + y^2). \quad (1)$$

При цьому умову Коші-Римана  $\partial u/\partial x = \partial v/\partial y$  і  $\partial u/\partial y = -\partial v/\partial x$  виконано тому:  $dU = -E_w dW = -E_z dZ$ , де модуль лінійного коефіцієнту перетворення  $dZ/dW = x^2 + y^2$ , а  $E_w$  знаходиться за відомими формулами для поля двох концентричних кіл [1].

Для реалізації цього перетворення в поставленій задачі знайти аналітичне рішення для будь-якої точки неоднорідного електричного поля між проводом і землею та між проводами, зокрема для шаруватого діелектрика, який утворюється з ізоляції проводу і оточуючого повітря, розроблено програми подвійного конформного перетворення системи координат.

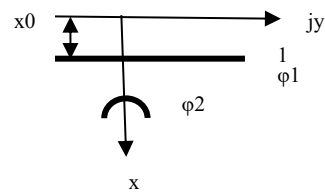


Рисунок 1 – Схема розташування еквіпотенціалів електричного поля між поверхнею провідника ( $\phi_2$ ) і землею ( $\phi_1$ ) в комплексній площині  $Z(x; jy)$

Можливість побудови наглядної картини неоднорідного електричного поля між проводом і землею або між проводами ілюструє рис.2. Приклад розподілу напруженості електричного поля між проводом і землею наведено на рис.3.

Захищені проводи є інноваційною продукцією вітчизняної кабельної техніки. Вони мають бути конкурентними з відповідною імпоротною продукцією і в першу чергу це стосується полімерної ізоляції, технологічні і експлуатаційні властивості якої можуть суттєво відрізнятися.

Наприклад, тривало допустима температура ізоляції із зшитого поліетилену ( $90^\circ\text{C}$ ) суттєво перевищує цю характеристику у аналогічного за хімічним складом термопластичного поліетилену ( $70^\circ\text{C}$ ). При цьому електрофізичні параметри, які впливають на напруженість електричного поля в діелектрику, у цих двох матеріалів однакові.

Інший, широко застосований як ізоляція проводів, полімерний матеріал ізоляційний полівінілхлоридний пластикат відрізняється від двох вищезгаданих саме електрофізичними параметрами, які впливають на напруженість електричного поля в діелектрику. Відносна діелектрична проникність  $\epsilon$  поліетилену дорівнює 2,3, а для полівінілхлоридного пластикату  $\epsilon$  дорівнює 6.

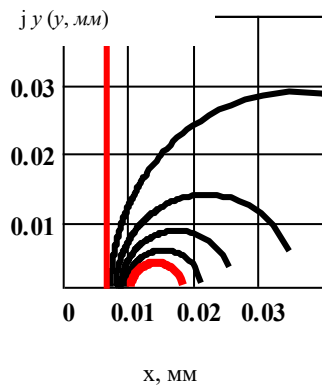


Рисунок 2 – Приклад аналітично побудованих екіпотенціалей неоднорідного електричного поля між площиною і паралельним їй циліндром за допомогою подвійного конформного перетворення системи координат

Розроблення алгоритму аналітичного рішення для дослідження розподілу напруженості електричного поля в ізоляції захищених проводів і побудови наглядної картини неоднорідного електричного поля між проводом і землею та між проводами є важливою складовою для навчального процесу та профорієнтаційної підготовки учнів старших класів як майбутніх абітурієнтів і студентів навчальних технічних закладів електроенергетики, електроізоляційної та кабельної техніки.

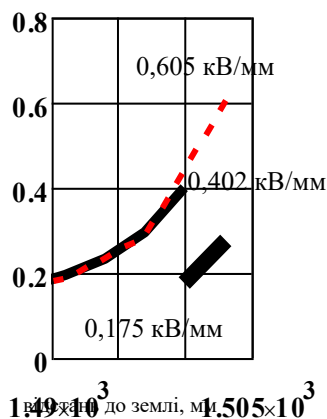


Рисунок 3 –

Приклад розподілу

максимальної напруженості електричного поля між проводом повітряної лінії на 35 кВ, виконаної провідником з площею перерізу  $70 \text{ мм}^2$  і землею: суцільні лінії – захищений провід з ізоляцією з поліетилену; штрихова – не ізолюваний провід

Дані рис. 3 свідчать, що на третину зменшується напруженість ел.поля в повітрі біля проводу, якщо провід ізолюваний.

Максимальна напруженість електричного поля біля поверхні проводу змінюється скачком, оскільки на поверхні ізоляції проводу є заряди в наслідок поляризації діелектрика [2].

Використаний метод розрахунку дозволяє аналітично дослідити залежність максимальної напруженості електричного поля від відстані до землі для різних умов прокладання ЛЕП і різних матеріалів ізоляції.

В змінному електричному полі розподіл напруженості в шаруватому діелектрику обернено пропорційний його діелектричній проникності [3].

Дослідження впливу полярності діелектрика на розподіл електричного поля між захищеними проводами ілюструє рис.4, на якому наведено результати порівняння електричного поля між захищеними проводами (лінійна напруга 35 кВ) при застосуванні двох різних за природою поляризації, але найбільш поширених діелектриків.

Фізична природа впливу поляризації діелектрика на розподіл електричного поля в лінії із захищеними проводами полягає в тому, що в наслідок поляризації діелектрика на його поверхні присутні зв'язані заряди і в більш полярному діелектрику густина цих зарядів більша. Запропонований метод розрахунку дозволить аналітично досліджувати засоби зменшення напруженості електричного поля.

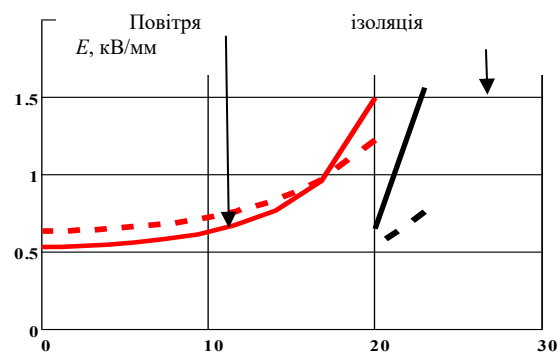


Рисунок 4 – Залежності максимальної напруженості електричного поля від відстані до осі  $E = f(x)$  симетрії між захищеними проводами (лінійна напруга 35 кВ, відстань між проводами 40 мм) при застосуванні двох різних за природою поляризації, але найбільш поширених діелектриків товщиною 3 мм: суцільні лінії – поліетилен ( $\epsilon = 2,3$ ); штрихові лінії – полівінілхлоридний пластикат ( $\epsilon = 6$ )

Поляризація ізоляції проводу зумовлює появу зв'язаних зарядів на поверхні поляризованого діелектрика, густина яких прямопропорційна його відносній діелектричній проникності. Це суттєво змінює розподіл електричного поля між проводами:

- максимальна напруженість електричного поля біля поверхні провідника суттєво зменшується, причому зменшення тим значніше, чим більша відносна діелектрична проникність, що свідчить на користь застосування полярних полімерів для ізоляції проводу;

- максимальна напруженість електричного поля біля поверхні ізолюваного проводу в повітрі помітно більша в разі застосування полярного полімеру як ізоляції проводу, що може бути суттєвим при перенапруженні в лінії, зокрема при грозовому перенапруженні; і це свідчить на користь застосування неполярних полімерів для ізоляції проводу, особливо для відносно малих перерізів провідника ( $10 \text{ мм}^2 \dots 25 \text{ мм}^2$ );

- максимальна напруженість електричного поля біля поверхні ізолюваного проводу змінюється скачком, оскільки на поверхні ізоляції проводу є зарядженою в наслідок поляризації діелектрика; цей

скачок тим більший, чим більша відносна діелектрична проникність, що також може бути суттєвим при перенапруженні в лінії, зокрема при грозовому перенапруженні.

Відомо [3], що застосування ізолюваних проводів впливає на проблеми блискавкозахисту: за грозового перекриття ізоляторів дуга промислової частоти не має можливості переміщуватися вздовж проводу й горить в місці пробою ізоляції до моменту вимкнення лінії, що може призвести до перепалювання ізоляції ЗП, а у випадку великих струмів КЗ й до перепалювання проводу.

Використаний метод розрахунку дозволяє аналітично досліджувати засоби зменшення максимальної напруженості електричного поля при застосуванні ізолюваних проводів в межах частот, за яких електричне поле може бути представлене як квазістаціонарне. Відповідні висновки для високочастотних явищ, якими є комутаційні і грозові перенапруження мають бути досліджені експериментально.

**Висновки:** 1. Вимоги, зумовлені нагальними потребами збільшення пропускної спроможності ліній електропередачі, входять в протиріччя з вимогами захисту довкілля і значного підвищення вимог безпеки в експлуатації (міжнародні стандарти серії ISO). Вирішення протиріччя між вимогами збільшення потужності передачі і названих сучасних вимог полягає в застосуванні ізолюваних (захищених) проводів повітряних ліній електропередачі.

2. Розроблення алгоритму аналітичного рішення для дослідження розподілу напруженості електричного поля в ізоляції захищених проводів і побудови наглядної картини неоднорідного електричного поля між проводом і землею та між проводами.

3. Ізоляцію захищеного проводу можна розглядати як своєрідну градійовану (шарувату) ізоляцію, що складається з полімерного діелектрика і оточуючого повітря. Наявність ізоляції зменшує напруженість електричного поля безпосередньо біля поверхні жили. і це зменшення, зумовлене явищем поляризації діелектрика, залежить саме від діелектричної проникності матеріалу ізоляції.

4. Максимальна напруженість електричного поля біля поверхні ізолюваного проводу змінюється скачком, оскільки на поверхня ізоляції проводу є

зарядженою в наслідок поляризації діелектрика; цей скачок тим більший, чим більша відносна діелектрична проникність, що також може бути суттєвим при перенапруженні в лінії, зокрема при грозовому перенапруженні.

5. Можливість аналітичного рішення і побудови наглядної картини неоднорідного електричного поля для будь-яких конструктивних і електрофізичних параметрів неоднорідного електричного поля між проводом і землею а саме – розміру провідника; – відстані між провідником і землею; – матеріалів ізоляційного проміжку і їх електрофізичних характеристик дає змогу дослідити вплив конструкції і розташування захищеного (ізолюваного) проводу на безпекові і екологічні фактори його експлуатації.

6. Аналіз фізичних явищ і створення конкретних програмних засобів побудови наглядної картини неоднорідного електричного поля в інноваційних технічних пристроях є важливою складовою профорієнтаційної підготовки учнів старших класів як майбутніх абітурієнтів для навчальних технічних закладів електроенергетики та кабельної техніки.

#### Список літератури

1. Силові кабелі низької та середньої напруги. Конструювання, технологія, якість: [підруч. для студ. вузів] / В.П.Карпушенко, Л.А.Щебенюк, Ю.О. Антоненко, О.А. Науменко – Харків.: Region-інформ, 2000. – 376 с.
2. Тареев В. М. Электротехнические материалы / В. М. Тареев, Н. П. Богородицкий, И. В. Пасынков. – Москва.: Мир, 1979. – 360 с.
3. Пешков И. Б. Специальные методы исследований и испытаний электрической изоляции силовых кабелей среднего и высокого напряжения / И. Б. Пешков, В. Л. Овсиенко, М. Ю. Шувалов // Кабели и провода. – 2015. – № 1. – с. 9 – 14.

#### References (transliterated)

1. Karpushenko V.P., Shchebenjuk L.A., Antonets Yu.O., Naumenko O.A. Sylovi kabeli nyz'koyi ta seredn'oyi napruhy. Konstruyuvannya, tekhnolohiya, yakist' [Power cables of low and medium voltage. Designing, technology, quality]. Kharkiv, Region-inform Publ., 2000. 376 p. (Ukr).
2. Tareev V. M. Electrical engineering materials / V. M. Tareev, N. P. Bogorodickij, V. V. Pasyнков. – Moscow.: Mir, 1979. – 360 p.
3. Peshkov I. B., Ovsienko V. L., Shuvalov M. Ju. / Special'nye metody issledovanij i ispytanij jelektricheskoy izoljacii silovyh kabelej srednego i vysokogo naprjazhenija [Special methods of research and testing of electrical insulation of power cables of medium and high voltage]. Kabeli i provoda. 2015, no. 1, pp. 9 – 14.

*Надійшла (received) 18.10.2019*

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Гурин Анатолій Григорович (Гурин Анатолій Григорьевич, Gurin Anatolij)** – доктор технічних наук, професор Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут", м. Харків; тел.: 707-65-44; e-mail: agurin@kpi.kharkov.ua.

**Щебенюк Леся Артемівна (Щебенюк Леся Артемовна, Shchebenjuk Lesia)** – кандидат технічних наук, професор кафедри «Електроізоляційна та кабельна техніка» Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут", м. Харків; тел.: 707-65-44; e-mail: agurin@kpi.kharkov.ua.

**Голік Оксана Вячеславівна (Голік Оксана Вячеславовна, Golik Oksana)** – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Електроізоляційна та кабельна техніка» Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут", м. Харків; тел.: 707-65-44; e-mail: agurin@kpi.kharkov.ua.

**Ільченко Ольга Вячеславівна (Ильченко Ольга Вячеславовна, Ilchenko Olga Vjacheslavovna)** – вчитель КЗ «ХСШ ім. В.Г.Короленка», м. Харків;

**Родяхіна Тетяна Анатоліївна (Родяхина Татьяна Анатольевна, Rodjachina Tatiana)** – заступник директора КЗ «ХСШ ім. В.Г.Короленка»;