

## ЗАХИЩЕНІ ІЗОЛЯЦІЄЮ ПРОВІДИ ДЛЯ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ НА СЕРЕДНЮ НАПРУГУ: ПЕРЕВАГИ, КОМП'ЮТЕРНІ РОЗРАХУНКИ

О.Д. Подольцев\*, докт. техн. наук, І.М. Кучерява, докт. техн. наук  
Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна.  
E-mail: [podol@ied.org.ua](mailto:podol@ied.org.ua)

*У роботі визначено переваги використання захищених ізоляцією проводів для ліній електропередачі на середню напругу (до 35 кВ) у порівнянні з традиційними неізольованими проводами. Розроблено математичну модель та проведено комп'ютерні розрахунки для захищеного проводу 20 кВ, що має жилу сталєво-алюмінієвої конструкції. Для такої конструкції проаналізовано розподіли магнітного поля та густини струму в трьох проводах повітряної лінії, а також визначено їхній опір з урахуванням нелінійних властивостей сталєвого осердя в діапазоні змінення частоти 50–10000 Гц. Це надає можливості розраховувати електричні втрати в провідниках повітряної лінії електропередачі в перехідних режимах та під час виникнення вищих гармонік в енергомережі. Бібл. 8, рис. 4.*

**Ключові слова:** захищені ізоляцією проводи, самоутримні ізольовані проводи (СП), поліетиленова ізоляція, сталєне осердя, повітряні лінії електропередачі, середня напруга, активний опір, густина струму, висока частота, комп'ютерне моделювання.

**Вступ.** В останні роки у світову практику реконструкції та будівництва нових повітряних ліній електропередачі (ПЛ) середнього класу напруги усе ширше впроваджуються проводи, захищені ізоляцією – самоутримні захищені проводи, що належать до групи ізольованих проводів СП. На струмопровідну жилу захищеного проводу накладається екструдована полімерна ізоляція, яка виключає коротке замикання між проводами через їхнє зіткнення (схлестування) та знижує ймовірність замикання на землю, а поверх – оболонка, що уберігає електричну ізоляцію від механічних ушкоджень.

Захищені ізоляцією проводи підвищують надійність розподілу і передачі електроенергії, зменшують кількість збоїв в електропостачанні внаслідок можливих аварій, що важливо для енергоємних галузей промисловості, міст та населених пунктів, де негативно відбиваються зупинки виробничих процесів і відключення ліній, а також необхідною є підвищена безпека в умовах, наприклад, щільної забудови або в зоні лісопосадки з невеликою шириною просіки для ПЛ (для ліній з ізольованими проводами просіка може бути у 6 разів вужча, ніж для традиційних ПЛ з неізольованими проводами, при цьому її ширина може становити лише 3,5–4 м і визначатися тільки можливістю під'їзду техніки для проведення будівельних робіт).

Застосування самоутримних ізольованих і захищених проводів є на сьогоднішній день найбільш прогресивним та перспективним напрямком розвитку електричних мереж. Висока економічна ефективність таких проводів досягається за рахунок значного підвищення надійності електропостачання споживачів та істотного зниження експлуатаційних витрат у порівнянні з неізольованими проводами, і в тому числі внаслідок підвищеної механічної міцності та застосування прогресивної зчеплювальної та відгалужувальної арматури.

Застосування самоутримних ізольованих проводів СП на напругу до 1 кВ та захищених проводів на напругу до 35 кВ дає змогу підвищити надійність, безпеку та економічність ПЛ у порівнянні з традиційними лініями за рахунок [1–4]: виключення можливості прямого контакту зі струмопровідними елементами; зниження спадання напруги і реактивної потужності в ПЛ внаслідок зменшення індуктивності їхніх проводів; виключення обривів проводів через ожеледі, мокрий сніг, сильні вітрові навантаження, падіння дерев і влучення на проводи важких предметів; виключення коротких замикань через схлестування проводів і контактів із заземленими предметами та елементами різних конструкцій; можливості технічного обслуговування та ремонту ПЛ під напругою; спрощення будівництва й обслуговування ПЛ; зменшення часу знаходження лінії у відключеному стані; скорочення кіль-

© Подольцев О.Д., Кучерява І.М., 2022

\*ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9029-9397>

кості перерв в електропостачанні споживачів; зниження ймовірності пожеж; можливості використання опор та ізоляторів діючих ПЛ.

Провідними світовими фірмами з виготовлення ізольованих захищених проводів і арматури для їхнього використання є фінські електротехнічні фірми "Pirelli Cables and Systems" та "Ensto" [5, 6]. В Україні самоутримні ізольовані проводи на напругу 1, 20, 35 кВ випускаються заводом "Південкабель" (м. Харків) [3, 7]. Вітчизняні проводи СПП мають жили з алюмінієвого сплаву або жили сталево-алюмінієвої конструкції. В останньому випадку в центрі проводу розташовується сталеве осердя, а поверх нього – повив з алюмінієвих дротів (рис. 1).



Рис. 1.

Аналіз електромагнітних процесів та еквівалентного опору жили сталево-алюмінієвої конструкції неможливо виконати на основі простих аналітичних виразів через наявність сталевого осердя з нелінійними магнітними властивостями. Внаслідок цього в роботі використано чисельний розрахунок електромагнітного поля і втрат у комбінованій жилі СПП.

Метою роботи є розробка математичної моделі та методики чисельного розрахунку електромагнітного поля та активного опору самоутримного ізольованого проводу типу СПП-3 зі струмопровідною жилою, що містить сталеве осердя, у широкому діапазоні змінення частоти 50–10000 Гц. Такий частотний діапазон дає змогу аналізувати процеси в лінії як у сталому режимі у разі наявності вищих гармонік у мережі, так і в перехідних режимах.

Практичне значення розробленої методики полягає в необхідності уточнення значення опору проводів типу СПП, що випускаються ЗАТ "Завод "Південкабель" (м. Харків).

**Модель для розрахунку опору проводів.** Розглядається трифазна ПЛ 20 кВ, побудована на основі СПП-3 зі сталево-алюмінієвою жилою (перетин проводу – 150 мм<sup>2</sup>). Основні розміри показано на рис. 2 [2]. Припускається, що в трьох провідниках ПЛ протікають однакові за амплітудою та зсуnutí на 120<sup>0</sup> струми, комплексні значення яких відповідно дорівнюють:  $\dot{I}_1 = I_m e^{j0}$ ,  $\dot{I}_2 = I_m e^{j2\pi/3}$ ,  $\dot{I}_3 = I_m e^{j4\pi/3}$  – розглядається симетричний режим роботи лінії. Задача полягає у визначенні розподілу густини струму в перетині жил і на основі цього розрахунку еквівалентних активних опорів провідників, а отже і електричних втрат, що виділяються в них.

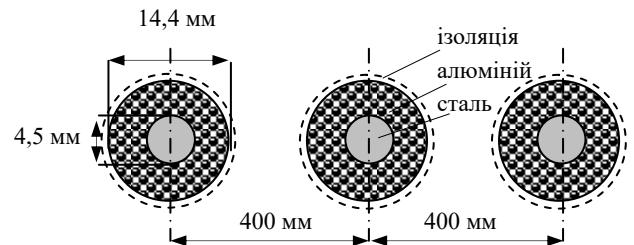


Рис. 2.

Розподіл магнітного потенціалу в розглянутій ПЛ задовольняє наступній системі інтегродиференціальних рівнянь

$$\text{у повітрі:} \quad \nabla \times (\mu_0^{-1} \nabla \times \dot{\mathbf{A}}) = 0; \quad (1)$$

у провідних середовищах (в сталево-алюмінієвих жилах трьох проводів)

$$j\omega\sigma \dot{\mathbf{A}} + \nabla \times ((\mu_0 \mu_r(|\mathbf{B}|))^{-1} \nabla \times \dot{\mathbf{A}}) = \sigma \Delta \dot{U}_k / L_n \quad (2)$$

та інтегральним виразам для струмів у кожному проводі

$$\int_{S_k} (-j\omega\sigma \dot{A}_z + \sigma \Delta \dot{U}_k / L_n) dS = \dot{I}_k, \quad k = 1, \dots, 3. \quad (3)$$

У (1–3) використано такі величини:  $\omega$  – кругова частота змінення струму;  $\sigma$ ,  $\mu_r(\mathbf{B})$  – електропровідність і відносна магнітна проникність середовища відповідно (для сталевого осердя враховується залежність магнітної проникності сталі від магнітної індукції  $\mathbf{B}$ );  $\mu_0$  – діелектрична проник-

ність вакууму;  $\Delta\dot{U}_k$  – спадання напруги на  $k$ -му проводі довжиною  $L_l$ ;  $S_k$  – площа поперечного перерізу проводу.

Величини  $\Delta\dot{U}_k, k=1, \dots, 3$  є невідомими і визначаються за виразами (3).

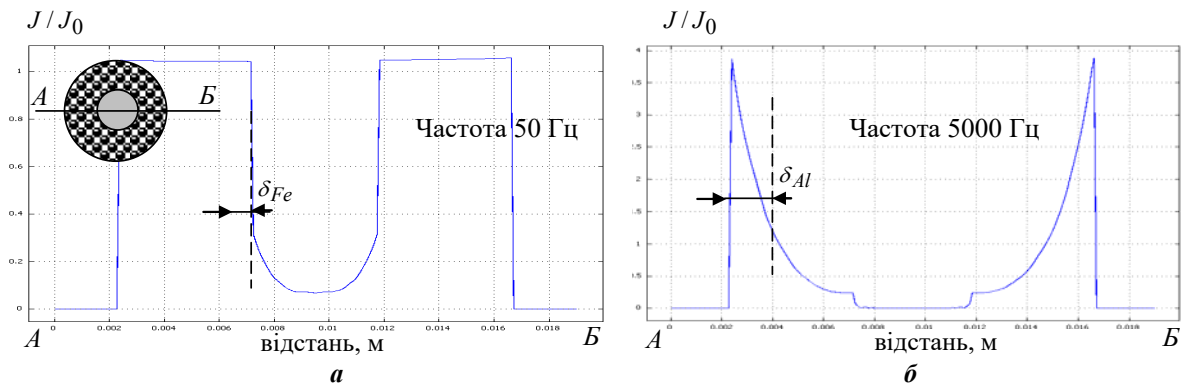


Рис. 3

Гранична умова на зовнішній границі розрахункової області задається у вигляді

$$\dot{A}_z(x, y) = 0.$$

Після визначення розподілу магнітного потенціалу  $\dot{A}_z$  та спадання напруги  $\Delta\dot{U}_k$  для провідників густина струму в їхніх перетинах розраховується за допомогою виразу

$$\dot{J}_z = \sigma(-j\omega\sigma\dot{A}_z + \sigma\Delta\dot{U}_k / L_l).$$

Еквівалентні активні опори одиниці довжини  $k$ -го проводу дорівнюють

$$R_{AC}^{(k)} = \frac{\int |\dot{J}_z|^2 \sigma^{-1} dS}{|\dot{I}_k|^2 S_k}. \quad (4)$$

Розв'язок системи інтегро-диференціальних рівнянь (1–3) відносно невідомих  $\dot{A}_z$  і  $\Delta\dot{U}_k, k=1, \dots, 3$  виконується чисельно методом кінцевих елементів у програмі Comsol [8].

**Результати комп'ютерного моделювання.** Розрахунки проводилися для ПЛІ 20 кВ з проводами, що мають розміри відповідно до рис. 2. Матеріал жили – алюміній з електропровідністю  $\sigma = 33 \cdot 10^6$  См/м. Сталеве осердя характеризується  $\sigma = 10 \cdot 10^6$  См/м та відносною магнітною проникністю  $\mu_r$ , що залежить від магнітного поля  $\mathbf{B}$ :  $\mu_r = 1000 / (1 + 1,4 |\mathbf{B}|)$ . Діюче значення струмів у провідниках приймалося рівним 485 А.

На рис. 3 показано зміння густини струму вздовж перетину середнього провідника за різних значень частоти. Встановлено, що через відносно велику відстань між провідниками вплив ефекту близькості проявляється слабо і розподіл густини струму в усіх трьох провідниках приблизно однаковий.

Оціночне значення глибини проникнення магнітного поля в сталеве осердя за частоти 50 Гц

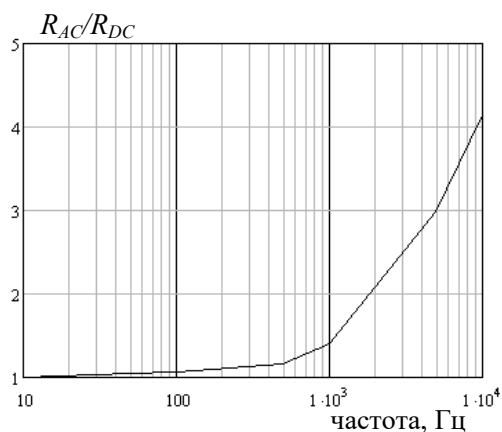


Рис. 4

складає  $\delta_{Fe} = \sqrt{2 / (\omega\mu_0\mu_r\sigma)} = 0,71$  мм (за значенні  $\mu_r = 1000$ ). Тому за 50 Гц в осерді жили має місце скін-ефект, а в алюмінієвих жилах густина струму розподілена рівномірно в їхньому перетині, тобто глибина проникнення поля в алюмінієвий провідник  $\delta_{Al}$  на цій частоті значно більша за його товщину. З підвищенням частоти струм практично повністю витісняється зі сталевго осердя, а в алюмінієвих провідниках починає проявлятися скін-ефект. За частоти 5000 Гц (рис. 3, б) струм протікає вздовж поверхневого шару алюмінієвого провідника товщиною  $\delta_{Al}$ , тобто в жилі проявляється різкий скін-ефект.

Розрахункову залежність від частоти відносного

значення активного опору, визначеному за формулою (4), для середнього провідника наведено на рис. 4. Тут  $R_{DC}$  – опір провідника на постійному струмі. Дані рис. 4 показують, що починаючи з частоти 500 Гц, спостерігається різке збільшення опору проводу. Проведені розрахункові дослідження свідчать також про те, що через велику відстань між проводами, яка визначається з технічних умов їхньої безпечної експлуатації в ПЛ, електромагнітний ефект близькості проявляється слабо і еквівалентні опори всіх трьох проводів у лінії мають практично однакові значення, відрізняючися при цьому не більш, ніж на 3 %.

**Висновки.** На основі наведеної математичної моделі для аналізу електромагнітного поля реалізовано методику розрахунку активного опору ізолюваних проводів з жилою сталеву-алюмінієвою конструкції, призначених для повітряних ліній електропередачі.

Досліджено розподіл густини струму в перетині ізолюваних проводів лінії. Отримано частотну залежність активного опору проводів комбінованої конструкції в діапазоні частоти 50–10000 Гц, що дає змогу аналізувати процеси в лінії як у сталих режимах за наявності вищих гармонік, так і в перехідних режимах.

Практичне значення комп'ютерної методики та результатів роботи полягає в тому, що отримані на її основі уточнені значення активного опору ізолюваних проводів можуть бути використані (і в тому числі на харківському заводі "Південкабель") під час вибору оптимальних параметрів самоутримних ізолюваних проводів на напругу до 1 кВ та самоутримних захищених проводів зі зшитополіетиленовою ізоляцією на напругу до 35 кВ.

*Роботу виконано в рамках держбюджетної програми за темою "Розвинути теорію імпульсних і високочастотних перехідних електромагнітних процесів у енергетичних і технологічних резонансних установках та високовольтних кабельних лініях електропередачі" (Шифр "ЕЛКАБ", номер реєстрації 0117U007713.), КПКВК 6541030.*

## PROTECTED INSULATED WIRES FOR MEDIUM-VOLTAGE OVERHEAD POWER LINES: ADVANTAGES, COMPUTATIONS

O.D. Podoltsev, I.M. Kucheriava

Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,  
pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine.

E-mail: [podol@ied.org.ua](mailto:podol@ied.org.ua)

*The paper presents the advantages of protected insulated wires for medium-voltage (up to 35 kV) overhead power lines compared to the lines with traditional non-insulated wires. The mathematical model is developed and the computer calculations are realized for a 20 kV protected insulated wire with a steel-aluminum core. For such design, the distributions of the magnetic field and current density in three wires of overhead power line are analyzed, their resistance is determined taking into account the nonlinear properties of the steel core within the frequency range of 50–10000 Hz. This makes it possible to compute the electrical losses in the conductors of the power lines under the transient conditions and at high harmonics in the power network. References 8, figures 4.*

**Key words:** protected insulated wires, self-supporting insulated wires, polyethylene insulation, steel core, overhead power lines, medium voltage, resistance, current density, high frequency, computer modeling.

1. Zolotaryov V.M., Shcherba A.A., Karpushenko V.P., Peretyatko Yu.V., Zolotaryov V.V., Oboznyi A.L. The directory for the choice of characteristics, design and application of the self-supporting insulated wires, produced by private joint-stock company Yuzhcable works, for overhead power lines with improved reliability and safety. Kharkov, Maidan, 2008. 62 p. (Ukr)

2. Cables and wires with plastic insulation. Plant Yuzhcable works. Kharkov, Ukraine. *Catalogue*. No 2. 53 p. (Rus)

3. Zolotaryov V.M. Plant Yuzhcable works: milestones of the road (75 years to plant Yuzhcable works). *Elektrotehnika i Elektromekhanika*. 2018. No 5. Pp. 12–16. (Rus) DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2018.5.02>

4. Covered conductor for MV lines. Global standard. Rev. 01 04/2020, 20 p. URL: [https://www.eneldistribuiacao.com.br/rj/documentos/GSCC021%20MV%20aerial%20covered%20conductor\\_rev01%20\(2\).pdf](https://www.eneldistribuiacao.com.br/rj/documentos/GSCC021%20MV%20aerial%20covered%20conductor_rev01%20(2).pdf) (accessed at 29.06.2022).

5. Prysmian Group. Linking the Future. URL: <https://www.prysmiangroup.com/en> (accessed at 29.06.2022).

6. ENSTO. Electricity distribution networks. URL: <https://www.ensto.com/ua/> (accessed at 29.06.2022).

7. Private Joint Stock Company Plant Yuzhkabel. Directory of cable and wire products. URL: <https://www.yuzhcable.info/index.php?CAT=20> (accessed at 29.06.2022).

8. *Comsol* multiphysics modeling and simulation software. URL: <http://www.comsol.com/> (accessed at 29.06.2022).

Надійшла 01.07.2022

Остаточний варіант 11.07.2022