

I. В. БАРБАШОВ, Г. В. ОМЕЛЯНЕНКО, В. В. ЧЕРКАШИНА, А. О. ШМАТОВ

ДОСЛІДЖЕННЯ ПИТАНЬ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПЕРЕДАЧІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

Проведено дослідження шляхів модернізації струмопровідної частини повітряних ліній для підвищення ефективності передачі електричної енергії за рахунок застосування інноваційних типів проводів. Проаналізовані техніко-економічні характеристики проводів типу АС, ACCR, AERO-Z. За результатами аналізу виявлено, що подальшому вдосконаленню конструкції АС проводів повинні послужити нові прогресивні розробки, які б задовольняли таким технічним вимогам, як надійність, живучість та довговічність; корозійна стійкість; висока адгезійна здатність; неохильність до вібрації під час експлуатації під дією несприятливих кліматичних факторів; стійкість до температурних впливів навколишнього середовища. В якості інноваційного рішення цього питання в зарубіжних країнах розроблено високотемпературні (ACCR) і спеціальної конструкції (AERO-Z) проводи. Виконано порівняльний аналіз типів проводів, які застосовуються в українських електричних мережах, з інноваційними типами проводів, які застосовуються в електричних мережах зарубіжних країн. За результатами порівняння АС, ACCR та AERO-Z проводів слідує, що фактором, який обмежує сферу застосування ACCR проводу, навіть для прольотів з надзвичайно високими вимогами щодо характеристик передачі електричної енергії, є його вкрай висока вартість. Також під час досліджень виявлено, що найбільш доцільним для впровадження в українські електричні мережі є AERO-Z провід. Це обумовлено тим, що технічні характеристики даного проводу кращі за характеристики АС проводу і він має відносно не високу вартість в порівнянні з ACCR проводом, а його спеціальна конструкція адаптована до несприятливих кліматичних умов, які впливають на характеристики передачі електричної енергії.

Ключові слова: електрична енергія, електрична мережа, повітряна лінія, провід, техніко-економічні показники.

I. V. BARBASHOV, H. V. OMELIANENKO, V. V. CHERKASHYNA, A. O. SHMATOV

RESEARCH ON IMPROVING THE EFFICIENCY OF ELECTRICITY TRANSMISSION

A study of ways to modernize the current-carrying part of overhead lines to improve the efficiency of electricity transmission through the use of innovative types of wires was conducted. The technical and economic characteristics of AC, ACCR, and AERO-Z wires were analyzed. The results of the analysis revealed that further improvement of the design of AC wires should be based on new progressive developments that would meet such technical requirements as reliability, survivability and durability; corrosion resistance; high adhesion ability; resistance to vibration during operation under the influence of adverse climatic factors; resistance to environmental temperature effects. As an innovative solution to this issue, high-temperature (ACCR) and specially designed (AERO-Z) wires have been developed in foreign countries. A comparative analysis of the types of wires used in Ukrainian power grids with innovative types of wires used in power grids of foreign countries was performed. The results of the comparison of AC, ACCR, and AERO-Z wires show that the factor that limits the scope of application of ACCR wire, even for spans with extremely high requirements for power transmission characteristics, is its extremely high cost. This is because the technical characteristics of this wire are better than those of AC wire and it has a relatively low cost compared to ACCR wire, and its special design is adapted to adverse climatic conditions that affect the characteristics of electricity transmission.

Keywords: electric energy, electric network, overhead line, wire, technical and economic indicators.

Постановка проблеми. Українські електричні мережі (ЕМ) функціонують за межею експлуатаційного ресурсу. Для їх технологічного переоснащення і модернізації об'єктів, в тому числі і повітряних ліній електропередачі (ПЛ), необхідно використовувати нові технологічні розробки, які покращать ефективність передачі електричної енергії. До таких розробок відносяться й інноваційні типи проводів ПЛ.

Вищенаведене обумовлює актуальність проблеми, для вирішення якої доцільно дослідити існуючі типи інноваційних проводів, виконати їх порівняльний аналіз й обґрунтувати доцільність застосування в українських ЕМ.

Аналіз публікацій. Питанням підвищення ефективності передачі електричної енергії шляхом вдосконалення струмопровідної частини ПЛ присвячено ряд робіт як зарубіжних, так і українських вчених.

В зарубіжних країнах для покращення передачі електричної енергії за рахунок вдосконалення струмопровідної частини ПЛ розроблено і впроваджено [1–5]:

- сталевалюмінієві проводи зі знизеним опором, тобто з гладкою поверхнею верхнього повиву;
- однорідні проводи, які звито із дротів на основі алюмінієвого сплаву;
- алюмінієві проводи із сердечником з алюмінієвого сплаву;
- високотемпературні проводи із металу алюміній-цирконій;
- проводи спеціальної конструкції, в тому числі і «снігоскидальний» провід, на якому відбувається одностороннє налипання та самообвалення ожеледо-паморозового відкладення за умов збільшення маси та розміру.

В українських ЕМ під час проектування струмопровідна частина ПЛ розраховується відповідно Правил улаштування електроустановок (ПУЕ) [6].

Питання вдосконалення конструкцій ліній електропередачі, в тому числі і їхньої струмопровідної частини, для покращення передачі електричної енергії в українських ЕМ розглядалися в [7, 8]. В даних джерелах акцентовано увагу на технічних характеристиках проводів, але не достатньо обґрунтовано доцільність їх застосування в

українських ЕМ з економічної точки зору модернізації струмопровідної частини ПЛ.

Мета статті. Дослідити і порівняти типи інноваційних проводів повітряних ліній для обґрунтування доцільності їх застосування в українських електричних мережах з метою підвищення ефективності передачі електричної енергії за рахунок модернізації струмопровідної частини ліній.

Основні методи досліджень.

Аналіз сталелегалюмінієвих проводів.

Сталелегалюмінієві (АС) проводи масово застосовуються в ЕМ не тільки України, а і зарубіжних країн. Це пояснюється порівняно невисокою вартістю та хорошими електричними і механічними характеристиками АС проводів [1, 5, 9].

Конструктивно АС проводи складаються із сталевого осердя, навколо якого робиться алюмінієвий повив (рис. 1) [8].



Рисунок 1 – Конструкція АС проводу для ПЛ електропередачі

Сталеве осереддя (рис. 1) збільшує механічну міцність проводу, а зовнішня алюмінієва частина, переріз якої набагато більший, ніж сталевий, має високу електричну провідність і визначає необхідні електричні характеристики проводу в цілому.

Для ПЛ, які експлуатуються у різних кліматичних умовах, АС проводи випускаються з різними перерізами алюмінієвої частини та сталевго осереддя. Такий підхід характеризує їх міцність і дозволяє використання за різних умов роботи. Так, в районах з товщиною стінки ожеледиці до 20 мм застосовують АС проводи зі відношенням перерізів алюмінієвої частини та сталевго осереддя рівним 6–8; при більшій товщині стінки ожеледиці нижня межа цього відношення – 4,3. На узбережжі морів, солоних озер, у промислових районах, де струмопровідна частина ПЛ руйнується від корозії, рекомендується використовувати АС проводи з відношенням перерізів алюмінієвої частини та сталевго осереддя рівним 6,1–6,25 [6].

Конструктивна одноманітність АС проводів для ПЛ зберігається тривалий час, змінювалися лише параметри – діаметри сталевих осередь та алюмінієвих повивів, кількість їх у повиві, співвідношення сталевго та алюмінієвої частин, переріз провідникової частини та ін. Але це не задовольняє потреб ЕМ щодо підвищення ефективності передачі електричної енергії.

Подальшому вдосконаленню конструкції проводів ПЛ повинні послужити нові прогресивні розробки АС проводів, які б задовольняли таким технічним вимогам, як:

- надійність, живучість та довговічність;
- корозійна стійкість;

- висока адгезійна здатність;
- неохильність вібрації під час експлуатації під дією несприятливих кліматичних факторів;
- стійкість до температурних впливів навколишнього середовища;
- встановлення ізолюючих накладок на ділянки проводів тощо.

Аналіз високотемпературних проводів.

Збільшення генеруючих потужностей та споживання електроенергії потребує відповідного збільшення пропускної здатності ПЛ, що потрібно враховувати під час проектування ЕМ. Виникає завдання, яке пов'язане з необхідністю вдосконалення струмоведучої частини ПЛ. В якості інноваційного рішення цього питання в таких країнах як-от Японія, Південна Корея, Італія та США розроблено нові високотемпературні проводи для ПЛ електропередачі на тривало допустиму робочу температуру до 210 °С замість стандартно застосовуваних АС проводів, розрахованих на робочу температуру 70 °С [2, 3]. Підвищення робочої температури та пропускної здатності ПЛ більш ніж у 2 рази вимагало вирішення наступних супутніх проблем:

- зниження стріли провисання проводу за рахунок застосування в його конструкції матеріалів зі знизеним вдвічі коефіцієнтом лінійного розширення;
- підвищення розривних зусиль та знизення маси проводів на одиницю довжини із збереженням високої електропровідності.

Особливо цікаво ці проблеми вирішені у конструкції високотемпературного проводу типу ACCR (Aluminum Conductor Composite Reinforced) – алюмінієвого композитного проводу, розробленого в США (рис. 2) [10].



Рисунок 2 – Конструкція ACCR проводу для ПЛ електропередачі

Провід ACCR (рис. 2) є типовим прикладом застосування нанотехнологій. Осереддя цього проводу, яке виготовлено з композитних сплавів на основі алюмінію високої чистоти (Al_2O_3), має високе розривне зусилля і низький коефіцієнт лінійного розширення та високу електропровідність. Навколо осереддя накладаються повиви дротів із металу алюміній-цирконій. Основні характеристики високотемпературного проводу ACCR наведено в табл. 1 [10].

Таблиця 1 – Властивості високотемпературного проводу ACCR

Властивості композитного осердя	
Межа міцності на розрив, МПа	1380
Жорсткість, ДПа	215
Електропровідність	відповідає алюмінію
Температурний коефіцієнт лінійного розширення, ($10^{-6} / ^\circ\text{C}$)	6
Максимальна температура при короточасних піках навантаження, $^\circ\text{C}$	> 300
Властивості повивів із сплаву алюміній-цирконій	
Межа міцності на розрив, МПа:	
• при діаметрі < 4 мм	162
• при діаметрі > 4 мм	159
Збереження міцності на розрив при нагріванні понад $280^\circ\text{C} / 1\text{год}$	> 90 %
Густина, $\text{г}/\text{см}^3$	2,7
Питомий опір при 20°C , $\text{Ом}\cdot\text{м}$	$< 28,73 \times 10^{-9}$
Максимальна температура при короточасних піках навантаження, $^\circ\text{C}$	240

Але, на ряду з позитивними характеристиками (табл. 1), існують недоліки ACCR проводу. Один із недоліків цього проводу впливає з властивостей самого композиту, який використовують для виготовлення осердя проводу. Це досить крихкий матеріал, властивості якого призводять до того, що з ACCR проводом необхідно працювати більш акуратно як під час транспортування, так і під час монтажу.

Аналіз проводів спеціальної конструкції. Під час проектування важливим фактором, який впливає на кінцеве ухвалення рішення щодо вибору варіанту проектування ЕМ, є кліматичні умови в яких буде експлуатуватися ПЛ електропередачі. Так, за несприятливих кліматичних умов, до яких відносяться сильні вітри, ожеледо-паморозові відкладення, налипання снігу, механічні характеристики проводів спеціальної конструкції можуть стати вирішальною обставиною їх застосування. Підтверджуючим прикладом є застосування AERO-Z проводу [5, 11]. Основна особливість AERO-Z проводу, який розроблено концерном Nexans (Бельгія) – це укладання струмопровідних шарів, переріз яких нагадує букву «Z» (рис. 3) [11].

Аналізуючи рис. 3 слідує, що поверхня повиву AERO-Z проводу гладка і має незначні гвинтові канавки, що виникають між верхніми межами Z-подібних проводів. За рахунок цього конструкція AERO-Z проводу виходить більш компактною порівняно з АС проводом (рис. 1) і при тому ж діаметрі має більший переріз за алюмінієм. Такі особливості сприяють зменшенню механічної напруги на опори і дозволяють збільшити корисний електропровідний переріз, що підвищує режимну та конструктивну надійність електропередачі. Також AERO-Z провід має підвищену крутильну жорсткість і тому краще

протистоїть ожеледо-паморозовим відкладенням на проводах ПЛ.



Рисунок 3 – Конструкція AERO-Z проводу для ПЛ електропередачі

Обґрунтування доцільності застосування інноваційних типів проводів. Обґрунтування типу проводу під час проектування ПЛ являється складним завданням. Оскільки, на сьогодні в Україні у відповідності з ПУЕ під час проектування ЕМ обираються тільки АС проводи [6].

Дослідження доцільності застосування інноваційних типів проводів виконувалося шляхом порівняння типів проводів, які застосовуються в українських ЕМ з інноваційними типами проводів, які застосовуються в електричних мережах зарубіжних країн.

Порівняння АС (Кабельний завод «Енергопром», Україна) [9], ACCR (3М™, США) [10] та AERO-Z (Nexans, Бельгія) [11] проводів виконано для 1 км одноланцюгової ПЛ 110 кВ за умови досягнення максимально допустимого згідно [6] натягування проводу (45% від розривного), але не більше 42,5 кН.

Під час порівняльного аналізу технологічний запас проводів не враховувався, а пред'являлися вимоги по стрілі провисання, масі проводу, максимальному струму, мінімальній вартості. Також не враховувалася вартість однакових конструктивних елементів лінії, тобто опор, зчіпної лінійної арматури, ізоляторів, захисної арматури.

Визначення вартості 1 км ПЛ 110 кВ з врахуванням прийнятих допущень виконувалося за формулою, тис. грн:

$$B = B_1 + B_2 + B_3, \quad (1)$$

де B_1 – вартість 1 км проводу;

B_2 – вартість натяжних і підтримуючих затискачів для 1 км ПЛ 110 кВ;

B_3 – вартість робіт по монтажу для 1 км ПЛ 110 кВ.

Вартість проводів B_1 (1) не прив'язувалася до конкретного обсягу, умов, періоду поставки і залежить від світових цін на алюміній та курсу валют.

Під час розрахунку B_2 (1) використано безпосередньо вартість натяжних і підтримуючих затискачів. Для проводу АС взято вартість традиційних затискачів, а для решти проводів використано вартість затискачів спеціального типу для забезпечення максимальної довговічності проводу.

Розрахунок B_3 (1) проведено без врахування витрат на підготовчі роботи, узгодження, відключення, перевезення матеріалів на об'єкт, аварійного запасу та інших додаткових витрат, які уточнюються на стадії проектно-кошторисної документації.

Техніко-економічні показники, які враховувалися під час порівняльного аналізу [9–11], і результати розрахунку наведено в табл. 2.

Таблиця 2 – Властивості високотемпературного проводу ACCR

Техніко-економічні показники	АС 240/32	ACCR 270-T16	AERO-Z 366-2Z
Тривало допустимий струм проводу, А	605	1331	771
Максимальна температура проводу, °С	70	210	70
Маса проводу, кг/км	1313	967	1014
Стріла провису при $T = \max$, м	10,1	9,9	9,9
Вартість 1 км проводу, тис. грн.	207	1434	432
Вартість затискачів для 1 км ПЛ 110 кВ, тис. грн.	5,2	59,6	18,6
Вартість робіт по монтажу 1 км, тис. грн.	85,8	85,8	85,8
Разом для ПЛ 110 кВ, тис. грн.	298	1579,4	536,4
Порівняння вартості 1 км ПЛ 110 кВ, умовн. од.	1	× 5,3	× 1,8
Примітка: символом «×» позначено збільшення у відповідну кількість разів			

Як слідує з табл. 2, ACCR провід має значне збільшення струмової пропускної здатності за нижчої ваги в порівнянні з АС і АЕРО-Z проводами, але відносно високу ціну в порівнянні з цими проводами, що не уможливило застосування проводу ACCR в українських ЕМ з економічних міркувань.

Аналізуючи можливість застосування проводів ACCR і АЕРО-Z (табл. 2) для прольотів з несприятливими кліматичними умовами, до яких відносяться сильні вітри, ожеледо-паморозові відкладення, налипання снігу, має сенс віддати перевагу АЕРО-Z проводу. Тому, що його допустиме струмове навантаження більше за тривале струмове навантаження АС проводу, а вартість проводу нижче ніж у ACCR проводу. Але вирішальною обставиною щодо прийняття рішення відносно застосування АЕРО-Z проводу безумовно являється його конструкція, яка більш адаптована до несприятливих кліматичних умов, які впливають на характеристики передачі електричної енергії.

Таким чином, незважаючи на кращі, у порівнянні з іншими проводами, технічні показники ACCR проводу, фактором, який обмежує сферу його застосування навіть для прольотів з надзвичайно

високими вимогами щодо характеристик передачі електричної енергії являється його вкрай висока вартість.

Висновок. В статті проаналізовано техніко-економічні характеристики АС, ACCR, АЕРО-Z проводів і виконано порівняльний аналіз, що дозволило обґрунтувати доцільність їх застосування в українських електричних мережах з метою підвищення ефективності передачі електричної енергії за рахунок модернізації струмопровідної частини ліній.

За результатами проведених досліджень слідує, що найбільш доцільним для впровадження в українські електричні мережі являється АЕРО-Z провід. Тому, що технічні характеристики даного проводу кращі за характеристики АС проводу і він має відносно не високу вартість в порівнянні з ACCR проводом, а його спеціальна конструкція адаптована до несприятливих кліматичних умов, які впливають на характеристики передачі електричної енергії.

Список літератури

- Zhao Y. Public participation in decision-making on renewable energy projects: Suggestions for Chinese legal reform drawn from the English experience: PhD thesis. Sydney, 2019. DOI: <https://doi.org/10.26190/unsworks/3790>.
- IEC 62004:2007. Thermal-resistant aluminium alloy wire for overhead line conductor. Effective from 2007-02-16. Official edition. 14 p.
- ASTM B941-16. Standard specification for heat resistant aluminum-zirconium alloy wire for electrical purposes. Official edition. 2016. 4 p. DOI: <https://doi.org/10.1520/B0941-16>.
- 3M. Aluminum conductor composite reinforced technical notebook (795 kcmil family). Conductor and accessory testing. 2003. 22 p. URL: <https://multimedia.3m.com/mws/media/5812680/electrical-markets.pdf>.
- New long stator winding (LSW) cable with Aero-Z conductor for high speed up with short round-trip time / H. Buehe et al. *MAGLEV 2004*, Shanghai, PR China, 25–29 October 2004. P. 776–782. URL: http://www.maglev.ir/eng/documents/papers/conferences/maglev2004/topic7/IMT_CP_M2004_T7_4.pdf.
- Правила улаштування електроустановок. Київ: Міненерговугілля України, 2017. 617 с.
- Говоров П. П., Черкашина В. В. Новітні підходи щодо струмопровідної частини повітряних ліній електропередачі. *Creative approaches in modern scientific and practical activities*: collective monograph. Sherman Oaks, USA, 2023. С. 27–31. DOI: <https://doi.org/10.51587/9798-9866-95990-2023-013-27-31>.
- Бондаренко В. О., Черкашина В. В. Конструкції ліній електропередачі: навчальний посібник для студентів усіх форм навчання електроенергетичних спеціальностей ЗВО України. Харків: «Факт», 2020. 174 с.
- Провід АС, характеристики. *Кабельний завод Енергопром*. URL: <https://energoprom.net.ua/ua/production/catalog/neizolirovannie/ac/>.
- 3M. 3M™ Aluminum Conductor Composite Reinforced (3M ACCR) Installation Guidelines and Maintenance. 2022. 54 p. URL: <https://multimedia.3m.com/mws/media/22562260/3m-aluminum-conductor-composite-reinforced-3m-accr-installation-guidelines-and-maintenance.pdf>.
- Power networks - Land high voltage. *Nexans - Nexans Lebanon - Liban Cables*. URL: <https://www.libancables.com/en/business/High-Voltage---Projects/Power-Networks-Land-High-Voltage.html>.

References

- Y. Zhao, “Public participation in decision-making on renewable energy projects: Suggestions for Chinese legal reform drawn from the English experience”, PhD thesis, Univ. New South Wales, Sydney, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.26190/unsworks/3790>

2. *Thermal-Resistant Aluminium Alloy Wire for Overhead Line Conductor*, IEC 62004:2007, IEC.
3. *Standard Specification for Heat Resistant Aluminum-Zirconium Alloy Wire for Electrical Purposes*, ASTM B941-16, ASTM, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1520/B0941-16>
4. 3M, "Aluminum conductor composite reinforced technical notebook (795 kcmil family). Conductor and accessory testing", Apr. 2003. [Online]. Available: <https://multimedia.3m.com/mws/media/5812680/electrical-markets.pdf>
5. H. Buethel, F. Daugny, H. Fastabend, D. Steinbrink, and P. Zamzow, "New long stator winding (LSW) cable with Aero-Z conductor for high speed up with short round-trip time", in *MAGLEV 2004*, Shanghai, PR China, Oct. 25–29, 2004. pp. 776–782. [Online]. Available: http://www.maglev.ir/eng/documents/papers/conferences/maglev2004/topic7/IMT_CP_M2004_T7_4.pdf
6. *Pravyla ulashtuvannya elektroustanovok [Rules for electrical installations]*. Kyiv: Minist. Energy Coal Ind. Ukr., 2017. (in Ukrainian)
7. P. P. Hovorov and V. V. Cherkashyna, "Novitni pidkhody shchodo strumoprovodnoi chastyny povitrianykh liniy elektroperedachi [The latest approaches to the current-carrying part of overhead power lines]", in *Creative Approaches in Modern Scientific and Practical Activities*. Sherman Oaks, USA: GS Publ. Serv., 2023, pp. 27–31, doi: <https://doi.org/10.51587/9798-9866-95990-2023-013-27-31> (in Ukrainian)
8. V. O. Bondarenko and V. V. Cherkashyna, *Konstruksii liniy elektroperedachi [Power line structures]*. Kharkiv: «Fakt», 2020. (in Ukrainian)
9. "Provid AS, kharakterystyky [AS wires, characteristics]." Cable plant "Energoprom." [Online]. Available: <https://energoprom.net.ua/ua/production/catalog/neizolirovannie/ac/> (in Ukrainian)
10. 3M, "3m™ Aluminum Conductor Composite Reinforced (3M ACCR) Installation Guidelines and Maintenance", Sep. 2022. [Online]. Available: <https://multimedia.3m.com/mws/media/22562260/3m-aluminum-conductor-composite-reinforced-3m-accr-installation-guidelines-and-maintenance.pdf>
11. "Power networks - Land high voltage." Nexans - Nexans Lebanon - Liban Cables. [Online]. Available: <https://www.libancables.com/en/business/High-Voltage---Projects/Power-Networks-Land-High-Voltage.html>

Надійшла (received) 19.03.2024

Відомості про автора (-ів) / About the Author (-s)

Барбашов Ігор Володимирович (Igor Volodymyrovych Barbashov) – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри передачі електричної енергії, Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7074-4115>; e-mail: i.v.barbashov@gmail.com.

Омельяненко Галина Вікторівна (Halyna Viktorivna Omelianenko) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри передачі електричної енергії, гарант освітньої програми 141 «Енергетика», Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3276-5476>; e-mail: omeljanenkagalina@gmail.com.

Черкашина Вероніка Вікторівна (Veronika Viktorivna Cherkashyna) – доктор технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри передачі електричної енергії, Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5639-9722>; e-mail: veronika2473@gmail.com.

Шматов Антон Олексійович (Anton Shmatov) – аспірант кафедри передачі електричної енергії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3786-7834>; e-mail: shalex7573@gmail.com.