УДК 621.311.2(477.87) DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.4.1.40

Т. В. СЕРДЕНКО
кандидат фізико-математичних наук,
старший викладач кафедри інженерії, технологій та професійної освіти
Мукачівський державний університет
ORCID: 0000-0002-1157-6115

О. В. МАКСЮТОВА
PhD, старший викладач кафедри інженерії, технологій
та професійної освіти
Мукачівський державний університет
ORCID: 0000-0001-8400-1382

Р. В. РОСУЛ
кандидат технічних наук,
доцент кафедри інженерії, технологій та професійної освіти
Мукачівський державний університет
ORCID: 0009-0008-6855-4612

Л. А. ПРОЦ
кандидат технічних наук,
доцент кафедри технології машинобудування
Ужгородський національний університет
ORCID: 0000-0001-8162-2108

ОСОБЛИВОСТІ ПРОЄКТУВАННЯ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧ У ЗАКАРПАТСЬКІЙ ОБЛАСТІ

У статті проведено комплексний і поглиблений аналіз сучасного стану та особливостей функціонування ліній електропередач у гірській частині Закарпатської області. Висвітлено специфічні виклики, що виникають під впливом складного рельєфу Українських Карпат, різких перепадів висот, інтенсивних кліматичних та метеорологічних навантажень, а також обмеженої транспортної доступності окремих населених пунктів. Детально проаналізовано структуру регіональних електричних мереж різних класів напруги, виявлено ключові проблеми, серед яких високий рівень фізичного зношення опор і проводів, часті ушкодження, спричинені ожеледдю, сильними вітрами, сніговими навалами, ерозійними та зсувними процесами. Розглянуто технічні аспекти вибору типів опор, проводів і ізоляції, здатних забезпечити стабільну роботу ЛЕП у гірських умовах, а також особливості монтажу та експлуатаційного обслуговування в важкодоступних районах. Окрему увагу приділено впровадженню сучасних систем діагностики та автоматизації, включно з елементами Smart Grid, дистанційним моніторингом стану проводів, опор і навантажень. Проаналізовано вимоги нормативної документації, міжнародний досвід розбудови ЛЕП у гірських регіонах та потенціал інтеграції Закарпаття до європейської енергосистеми ENTSO-E. На основі проведеного дослідження сформульовано рекомендації щодо модернізації мереж, спрямовані на підвищення енергетичної надійності, стійкості та безпеки електропостачання в умовах складного гірського рельєфу.

Ключові слова: *лінії електропередач, Закарпатська область, гірські умови, кліматичні ризики, модернізація, ENTSO-E, енергоефективність, Smart Grid.*

T. V. SERDENKO
Candidate of Physical and Mathematical Sciences,
Senior Lecturer at the Department of Engineering, Technology
and Vocational Education
Mukachevo State University
ORCID: 0000-0002-1157-6115

© Т. В. Серденко, О. В. Максютова, Р. В. Росул, Л. А. Проц, 2025
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

O. V. MAKSYUTOVA
PhD, Senior Lecturer at the Department of Engineering, Technology
and Vocational Education
Mukachevo State University
ORCID: 0000-0001-8400-1382

R.V. ROSUL
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor at the Department of Engineering, Technology
and Vocational Education
Mukachevo State University
ORCID: 0009-0008-6855-4612

L. A. PROTS
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor at the Department of Mechanical Engineering Technology
Uzhhorod National University
ORCID: 0000-0001-8162-2108

DESIGN AND OPERATIONAL ASPECTS OF POWER TRANSMISSION LINES IN THE ZAKARPATTIA REGION

The article presents a comprehensive and in-depth analysis of the current state and operational features of overhead transmission lines in the mountainous part of the Zakarpattia region. The study highlights the specific challenges arising from the complex terrain of the Ukrainian Carpathians, significant elevation differences, intense climatic and meteorological impacts, and limited transport accessibility of remote settlements. The structure of regional electrical networks of various voltage levels is examined in detail, and key technical problems are identified, including the high degree of physical wear of supports and conductors, frequent damage caused by icing, strong winds, heavy snow loads, as well as erosion and landslide processes. Technical aspects of selecting appropriate types of poles, conductors, and insulators capable of ensuring stable operation of transmission lines in mountainous conditions are discussed, along with practical issues related to installation and maintenance in hard-to-reach areas. Particular attention is given to the implementation of modern diagnostic and automation systems, including Smart Grid elements, remote monitoring of conductor and pole conditions, and load control technologies. The analysis also covers regulatory requirements, international experience in designing transmission lines in mountainous regions, and the prospects of integrating Zakarpattia into the ENTSO-E European power system. Based on the conducted research, recommendations are formulated to support the modernization of electrical networks aimed at improving the reliability, resilience, and safety of electricity supply under the challenging conditions of mountainous terrain.

Key words: *transmission lines; Zakarpattia region; mountainous conditions; climatic risks; modernization; ENTSO-E; energy efficiency; Smart Grid.*

Постановка проблеми

Надійне електропостачання є одним із ключових чинників соціально-економічного розвитку гірських територій. Значна частина Закарпатської області розташована в межах Українських Карпат і характеризується мозаїчним рельєфом, значними перепадами висот та підвищеною схильністю до небезпечних погодних явищ [3]. Поєднання складної орографії, високої вологості, інтенсивного снігового покриву та різких добових температурних коливань істотно ускладнює експлуатацію електричних мереж, особливо у високогірних районах Рахівського, Міжгірського та Тячівського районів. Водночас значна частина ЛЕП області була побудована ще у 1970–1980-х роках [5], що призвело до високого рівня їх фізичного зносу. Це супроводжується збільшенням технічних втрат електроенергії, падінням надійності електропостачання та необхідністю системної модернізації мереж.

Ситуацію ускладнює також розвиток туристичної інфраструктури, підвищення сезонних навантажень, будівництво нових приватних об’єктів та розширення мережі закладів рекреації. Поширення децентралізованих джерел генерації, таких як сонячні та малі гідроелектростанції [4], створює нові можливості для енергетичної автономії громад, але водночас потребує адаптації мереж до двосторонніх потоків потужності, що особливо складно в умовах гірського рельєфу. Інтеграція України до європейської енергосистеми ENTSO-E [10] актуалізує питання технічного переоснащення мереж відповідно до європейських стандартів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Проблематика функціонування та модернізації ліній електропередач у гірських регіонах посідає важливе місце у сучасних енергетичних дослідженнях, оскільки поєднує інженерні, природничі та економічні аспекти. Низка наукових праць присвячена питанням дистанційного моніторингу, підвищення надійності конструкцій, вибору оптимальних технічних рішень та управління ризиками, характерними для гірських місцевостей.

Одним із важливих напрямів світових досліджень є розроблення технологій моніторингу стану ЛЕП у реальному часі. У роботі Zeng H. та співавт. [1] висвітлюється використання LPWAN-технологій для контролю параметрів проводів і опор у важкодоступних гірських районах, що суттєво підвищує оперативність реагування на аварії та дозволяє зменшити витрати на огляд ліній. Подібні системи набувають особливої актуальності в умовах Карпат, де традиційні інспекційні методи обмежені через складний рельєф і погодні умови.

Інший блок досліджень стосується підвищення стійкості повітряних ліній до грозових явищ, які є частими у Закарпатті. У роботі Trotsenko Y. та ін. [2] аналізуються ефективність і межі застосування різних засобів блискавкозахисту, що дозволяє оптимізувати конструкції ЛЕП залежно від частоти грозової активності, діелектричних характеристик ізоляції та топографії місцевості.

У контексті розвитку регіону важливими є дослідження соціально-економічних та географічних чинників. Химинець В. В. у своїй роботі [3] акцентує увагу на тому, що сталий розвиток Карпатського регіону пов'язаний із модернізацією інфраструктури, включаючи енергетичні мережі. Автор підкреслює, що гірські території перебувають у зоні підвищеного екологічного ризику та мають значні інфраструктурні обмеження, що потребує системного підходу до енергетичної політики.

Вагомими є дослідження, присвячені розвитку відновлюваної енергетики. Поп С. С. та Шароді І. С. у праці [4] аналізують потенціал сонячної, вітрової та гідроенергетики Закарпаття, доводять економічну та екологічну доцільність інтеграції ВДЕ у локальні мережі, що може істотно підвищити енергетичну незалежність гірських громад. Наявність локальних джерел генерації також зменшує навантаження на традиційні ЛЕП, зменшуючи кількість аварійних ситуацій на віддалених ділянках.

Національні джерела, зокрема звіти АТ «Закарпаттяобленерго» [5], містять важливу інформацію щодо технічного стану мереж, ступеня їх зношеності та основних напрямів інвестицій у регіон. Дані компанії свідчать, що понад 40 % ліній 0,4–10 кВ перебувають у незадовільному стані, що збігається з результатами незалежних досліджень IEA [9].

Міжнародний досвід проєктування та експлуатації ЛЕП у гірських місцевостях також представлений низкою фундаментальних робіт. Зокрема, Malar Kodi P. [6] описує застосування LiDAR-технологій для оптимізації трасування електроліній, що дозволяє прогнозувати ризики ерозії, лавинних зрушень і зсувів. Праця BC Hydro [8] аналізує конструктивні рішення, здатні витримувати лавинні навантаження, і демонструє практичні підходи до вибору типів опор, які можуть бути ефективними і для Карпатського регіону.

Міжнародне енергетичне агентство у звіті «Electricity security in mountainous regions» [9] наголошує на тому, що гірські системи електропередач мають підвищені вимоги щодо матеріалів, систем автоматизації та резервування. Це актуально для Закарпаття, оскільки навіть короткочасні обриви можуть призвести до значних збитків у умовах віддалених населених пунктів.

У документах ENTSO-E, зокрема у TYNDP 2022 [10], визначено стратегічні напрями розвитку європейської енергетичної інфраструктури, включно з інтеграцією периферійних і гірських регіонів. Згідно з цією програмою, модернізація ЛЕП має ґрунтуватися на стандартизованих підходах, високих вимогах до кліматичної стійкості та широкому застосуванні інтелектуальних мереж.

Підсумовуючи проведений аналіз літератури, можна сказати, що сучасні дослідження надають цінні рекомендації щодо підвищення стійкості ЛЕП у складних природних умовах, хоча комплексних робіт, присвячених саме Закарпатській області, обмежена кількість. Це підкреслює актуальність проведення подібних регіональних досліджень і обґрунтовує необхідність системного наукового підходу до модернізації електромереж Карпатського регіону.

Викладення основного матеріалу дослідження

Закарпаття поєднує низинні райони на південному заході області та різко виражений гірський рельєф на більшій частині території. Перепади висот, вузькі ущелини, стрімкі схили, нестабільні ґрунти та високий рівень зволоження створюють значні труднощі при виборі трас для ліній електропередач (ЛЕП). Часто маршрути проходять у зонах річкових долин, де існує підвищений ризик підтоплення територій і підмивання основ опор. Додатковими проблемами є інтенсивні ерозійні процеси, зсуви та обвали порід, що ускладнює довготривалу надійність споруд і потребує ретельного геологічного моніторингу. Вибір оптимальної траси ЛЕП у гірських районах найчастіше зводиться до компромісу між технічною доцільністю, економічною ефективністю та екологічними обмеженнями, притаманними Карпатському регіону.

Монтажні роботи у важкодоступній місцевості потребують застосування спеціалізованої техніки, тривалих підготовчих робіт, а іноді – використання вертольотів, гусеничної техніки або піших бригад. Це суттєво збільшує вартість реалізації проєктів та ускладнює оперативне реагування на аварії. У зимовий період, коли гірські перевали частково або повністю перекриті, виконання відновлювальних робіт може тривати в декілька разів довше, ніж у рівнинних районах.

Кліматичні особливості Закарпаття впливають на експлуатацію мереж не менш суттєво, ніж рельєф. Тривалі періоди ожеледі формують небезпечні крижані нашарування на проводах, які можуть збільшувати їхню масу

в 3–5 разів залежно від діаметра проводу та тривалості обмерзання [9]. Крижаний наліт та мокрий сніг створюють значне крутильне навантаження, що призводить до обривів або перегинання проводів, деформації траверс, тріщин в ізоляторах. У високогір'ї поширені фенові вітри та пориви великої швидкості, які викликають горизонтальні навантаження, небезпечні для будь-яких типів опор. Великі маси вологого снігу є головною причиною руйнування ліній 0,4–10 кВ, які вже мають високий ступінь фізичного зносу [5]. У літній період посилюється ризик грозових перенапруг, що вимагає підвищеної уваги до систем блискавкозахисту [2].

Структура електричних мереж Закарпатської області характеризується значною розгалуженістю та неоднорідністю. Лінії 220 кВ забезпечують транскордонні енергетичні потоки та відіграють ключову роль у взаємодії з європейською системою ENTSO-E [10]. ЛЕП 110 кВ виконують функцію міжрайонного передавання електроенергії та обслуговують основні інфраструктурні вузли. Розподільчі мережі 35 та 10 кВ є основою живлення більшості гірських населених пунктів, а кінцеві споживачі користуються переважно мережами 0,4 кВ. Значна частина останніх експлуатується понад нормативний термін та має високий рівень технічних втрат – у середньому 12–14 % [5], що вдвічі перевищує середні показники країн ЄС.

Проєктування ЛЕП у гірських районах потребує спеціальних технічних рішень. Металеві ґратчасті та трубчасті опори мають збільшену стійкість до вітрових та ожеледних навантажень і характеризуються кращими антикорозійними властивостями порівняно з традиційними залізобетонними конструкціями [8]. У місцевостях зі складною геологічною структурою застосовують фундаментні рішення зі збільшеною площею опори, пальові конструкції та анкерні системи. Врахування вимог ДСТУ EN 50341-1:2018 забезпечує стандартизований підхід до визначення кліренсів, вибору типів ізоляторів та конструктивних параметрів опор.

Вибір проводів та ізоляції відіграє критичну роль у забезпеченні надійності ЛЕП. Сталево-алюмінієві проводи (АС, АСО) мають високу механічну міцність та добре зарекомендували себе в умовах ожеледи. У населених пунктах, де траса ЛЕП проходить поблизу дерев, доцільно застосовувати самонесучі ізольовані проводи (СІП), які знижують ризик коротких замикань і мають нижчу ймовірність механічних ушкоджень [5]. Полімерні ізолятори демонструють підвищену стійкість до морозів, вологи та забруднень, що робить їх переважним варіантом для гірських регіонів [9]. У зонах із підвищеною лавинною активністю, таких як Рахівський район, необхідне встановлення захисних екранів і використання спеціалізованих опор із підвищеною жорсткістю [8].

Монтаж та обслуговування ЛЕП у горах є трудомісткими та затратними процесами. Використання дронів-інспекторів дозволяє оперативно оцінювати стан опор та проводів, особливо у важкодоступних місцях. Дистанційні сенсори моніторингу провисання, системи раннього виявлення ожеледі та LPWAN-технології [1] значно скорочують час реагування на аварії. Такі технології є ключовим елементом переходу до інтелектуальних мереж Smart Grid, які передбачають впровадження автоматизованих реклоузерів, інтелектуальних лічильників та системи SCADA для оперативного керування потоками електроенергії [10].

Важливим напрямом розвитку є інтеграція відновлюваних джерел енергії у локальні мережі. Малі гідроелектростанції (до 1 МВт), поширені у верхів'ях карпатських річок, забезпечують стабільне базове навантаження [7]. Сонячні та вітрові мікроустановки, формуючи локальні мікромережі, зменшують навантаження на магістральні ЛЕП і підвищують енергетичну автономію громад [4]. У перспективі такі рішення можуть значно знизити потребу у довгих повітряних лініях у важкодоступних місцях.

Висновки

Експлуатація ліній електропередач у гірських умовах Закарпатської області супроводжується численними інженерними, природними та організаційними викликами, що суттєво ускладнюють забезпечення надійного та безперебійного електропостачання. Поєднання складного гірського рельєфу, інтенсивних кліматичних навантажень, нестабільних ґрунтів та високої частки зношених мереж створює комплекс ризиків, які потребують системного підходу до управління. Наявні повітряні лінії, переважно збудовані в попередні десятиліття, не відповідають сучасним вимогам навантажувальної здатності та кліматичної стійкості, що призводить до частих пошкоджень, значних технічних втрат та тривалих перерв в електропостачанні, особливо у зимово-весняний період.

Підвищення надійності можливе лише за умови переходу до комплексної модернізації мереж. Застосування сучасних конструкцій опор, сталево-алюмінієвих та ізольованих проводів, полімерних ізоляторів і укріплених фундаментних систем дозволяє суттєво підвищити механічну стійкість ЛЕП у складних природних умовах. Впровадження автоматизованих систем контролю та управління, включно з технологіями Smart Grid, реклоузерами, системами дистанційного моніторингу, є ключовим кроком до оперативного реагування на аварійні ситуації та мінімізації простоїв.

Важливим стратегічним напрямом є інтеграція відновлюваних джерел енергії – малих ГЕС, сонячних та вітрових установок – у локальні мережі, що може знизити залежність гірських громад від довгих повітряних ліній та зробити енергопостачання більш стійким і автономним. Використання міжнародного досвіду з країн, що мають подібні природні умови, сприяє розробці надійних інженерних рішень, адаптованих до лавинних зон, крутих схилів та складних геологічних ділянок.

Інтеграція Закарпаття до ENTSO-E відкриває можливості для залучення інвестицій та технічної допомоги, що дозволить прискорити модернізацію регіональних мереж, забезпечити впровадження сучасних матеріалів та технологій, а також підвищити стійкість електроенергетичної інфраструктури до змін клімату. Врахування нормативних вимог ЄС та імплементація найкращих світових практик є необхідною передумовою підвищення рівня безпеки та надійності електропостачання.

Отже, комплексна модернізація електромереж Закарпаття повинна поєднувати технічні інновації, автоматизацію, розвиток місцевих джерел генерації та глибокий урахування природно-кліматичних особливостей регіону. Лише системний підхід забезпечить довгострокову стійкість, енергонезалежність і високий рівень електробезпеки гірських громад.

Список використаної літератури

1. Zeng, H., Zuo, P., Deng, F., Zhang, P. Monitoring System of Transmission Line in Mountainous Area Based on LPWAN [Електронний ресурс] // *Energies.* – 2020. – Vol. 13, No. 18. – Article 4898.

2. Trotsenko Y., Yandulskyy O., Dixit M., Peretyatko J. Effect of discharge current magnitude on effectiveness of overhead power line protection against direct lightning strokes // *Енергетика: економіка, технології, екологія.* – 2023. – № 2 (72). – С. 26–32.

3. Химинець В. В. Сталий розвиток Карпатського регіону в контексті євроінтеграційної політики України / В. В. Химинець // *Екологія і природокористування.* – 2013. – Вип. 16. – С. 71–80.

4. Поп, С. С., Шароді, І. С. (2022). Освоєння відновлюваних енергетичних ресурсів Закарпатської області в контексті збалансованого розвитку // *Український географічний журнал*, 2022, № 3 (119), с. 36–44.

5. АТ «Закарпаттяобленерго». Звіт про виконання інвестиційної програми та план розвитку електричних мереж 2023–2024 рр.

6. Malar Kodi P. Optimisation of transmission line design in mountain regions using advanced cartographic techniques and LiDAR // *Proceedings of the 17th Mountain Cartography Workshop*. – 2015.

7. Хмара А. Т., Симоненко П. Л. До питання створення та експлуатації річкових берегових гідроелектростанцій без будівництва гребель і накопичувальних водосховищ // *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. – 2023. – № 1 (138). – С. 7–12.

8. Designing overhead transmission lines to withstand snow avalanches (BC Hydro case study) // *Geo-Congress 2018.*

9. International Energy Agency. Electricity security in mountainous regions: challenges and opportunities. – *Paris: IEA*, 2021.

10. ENTSO-E. Ten-Year Network Development Plan (TYNDP) 2022. – Brussels: European Network of Transmission System Operators for Electricity, 2022.

References

1. Zeng, H., Zuo, P., Deng, F., & Zhang, P. (2020). Monitoring system of transmission line in mountainous area based on LPWAN [Електронний ресурс] [Monitoring system of transmission line in mountainous area based on LPWAN]. *Energies*, 13(18), Article 4898.

2. Trotsenko, Y., Yandulskyy, O., Dixit, M., & Peretyatko, J. (2023). Effect of discharge current magnitude on effectiveness of overhead power line protection against direct lightning strokes [Effect of discharge current magnitude on effectiveness of overhead power line protection against direct lightning strokes]. *Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohii, ekolohiia* [Energy: Economics, Technologies, Ecology], 2(72), 26–32. [in Ukrainian].

3. Khyminets, V.V. (2013). Stalyi rozvytok Karpatskoho rehionu v konteksti yevrointehratsiinoi polityky Ukrainy [Sustainable development of the Carpathian region in the context of Ukraine's European integration policy]. *Ekologiia i pryrodokorystuvannia* [Ecology and Nature Management], 16, 71–80. [in Ukrainian].

4. Pop, S.S., & Sharodi, I.S. (2022). Osvoyennia vidnovliuvanykh enerhetychnykh resursiv Zakarpatskoi oblasti v konteksti zbalansovanoho rozvytku [Development of renewable energy resources of the Zakarpattia region in the context of balanced development]. *Ukrainskyi heohrafichnyi zhurnal* [Ukrainian Geographical Journal], 3(119), 36–44. [in Ukrainian].

5. AT "Zakarpattiaoblenerho". (2023). Zvit pro vykonannia investytsiinoi prohramy ta plan rozvytku elektrychnykh merezh 2023–2024 rr. [Report on the implementation of the investment program and development plan of electrical networks 2023–2024]. [in Ukrainian].

6. Malar Kodi, P. (2015). Optimisation of transmission line design in mountain regions using advanced cartographic techniques and LiDAR. In *Proceedings of the 17th Mountain Cartography Workshop*.

7. Khmara, A.T., & Symonenko, P.L. (2023). Do pytannia stvorennia ta ekspluatatsii richkovykh berehovykh hidroelektrostantsii bez budivnytstva hrebel i nakopychuvalnykh vodoskhovyshch [On the creation and operation of riverbank hydroelectric power plants without dam and reservoir construction]. *Visnyk Kremenchutskoho natsionalnoho*

universytetu imeni Mykhaila Ostrohradskoho [Herald of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University], 1(138), 7–12. [in Ukrainian].

8. Designing overhead transmission lines to withstand snow avalanches (BC Hydro case study). (2018). In *Geo-Congress 2018*.

9. International Energy Agency. (2021). *Electricity security in mountainous regions: challenges and opportunities*. Paris: IEA. https://www.iea.org/reports/electricity-security-in-mountainous-regions [in English].

10. ENTSO-E. (2022). *Ten-Year Network Development Plan (TYNDP) 2022*. Brussels: European Network of Transmission System Operators for Electricity.

Дата першого надходження рукопису до видання: 12.11.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 09.12.2025
Дата публікації: 31.12.2025