

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ МОНІТОРИНГУ ТЕПЛОВИХ ПЕРЕВАНТАЖЕНЬ У ПРОВІДНИКАХ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Повітряні лінії електропередавання (ПЛЕП) є основним засобом передавання електроенергії на великі відстані, однак зростання споживання електроенергії призводить до перевантаження існуючих мереж. У таких умовах підвищення допустимого струмового навантаження провідників є одним із ефективних способів забезпечення необхідної пропускної здатності без будівництва нових ліній.

Під час тривалої експлуатації температура проводів може перевищувати допустимі значення, що викликає теплові напруження, збільшення стріли провисання, зменшення габаритів до землі, прискорене старіння та зниження надійності лінії. Додатковий негативний вплив можуть спричиняти атмосферні явища, пожежі, старіння матеріалів та механічні пошкодження. У роботі розглянуто сучасні технології моніторингу теплового стану повітряних ліній, які дають змогу своєчасно виявляти перевантаження та запобігати аварійним ситуаціям.

Ключові слова: *повітряні лінії електропередавання, пропускна здатність, моніторинг стану, стріла провисання.*

Abstract

Overhead transmission lines (OHL) are the main means of transmitting electrical energy over long distances; however, the growth of electricity consumption leads to overloading of existing networks. Under such conditions, increasing the allowable current carrying capacity of conductors is one of the effective ways to ensure the required transmission capability without constructing new lines.

During long-term operation, the conductor temperature may exceed permissible values, causing thermal stress, increased sag, reduced ground clearance, accelerated aging, and decreased reliability of the line. Additional negative effects may be caused by atmospheric conditions, wildfires, material aging, and mechanical damage. This paper considers modern technologies for monitoring the thermal state of overhead transmission lines, which allow timely detection of overloads and prevention of emergency situations.

Keywords: *overhead transmission lines, ampacity, condition monitoring, conductor sag.*

Вступ

Повітряні лінії електропередавання залежно від довжини поділяють на короткі, середні та протяжні, при цьому рівні робочої напруги можуть змінюватися від 33 кВ до понад 500 кВ. Конструкція лінії включає провідники, підвішені на опорах та закріплені за допомогою підвісних і штирьових ізоляторів, які забезпечують надійну роботу як при номінальній напрузі, так і при перенапругах, що виникають під час комутацій або грозових впливів. Найбільш поширеним типом проводу для повітряних ліній є сталеві-алюмінієві провід, що пояснюється його достатньою механічною міцністю, малою масою та відносно низькою вартістю. Вибір типу проводу залежить від умов місцевості, необхідної пропускної здатності та експлуатаційних вимог, тому підвищення електричних і механічних характеристик провідників є важливим напрямом розвитку ПЛЕП [1].

Зростання попиту на електричну енергію безпосередньо пов'язане зі збільшенням чисельності населення світу, що підтверджується статистичними даними за останні десятиліття. Починаючи з середини ХХ століття, споживання енергії постійно зростає, і в подальшому прогнозується його значне збільшення. Це пояснюється поширенням електричних приладів у побуті, розвитком транспорту, зміною способу життя населення та впливом кліматичних факторів.

Суттєве зростання енергоспоживання спостерігається також у промисловому секторі, особливо після 2006 року, що пов'язано з розвитком цифрових технологій і так званою четвертою

промисловою революцією. За прогнозами, подальше збільшення виробництва та використання електроенергії призведе до значного підвищення навантаження на існуючі електричні мережі, що вимагає підвищення їх пропускної здатності та надійності.

Для забезпечення зростаючого попиту на електроенергію повітряні лінії електропередавання повинні передавати більші потужності. Будівництво нових ліній є складним і дорогим процесом, тому більш доцільним є підвищення пропускної здатності існуючих мереж шляхом збільшення допустимого струмового навантаження, застосування динамічного визначення допустимого струму та заміни проводів на більш сучасні [2-3].

Збільшення навантаження призводить до підвищення температури провідників, що може викликати теплові перевантаження, збільшення стріли провисання, зменшення габаритів до землі та прискорене старіння елементів лінії. Гранична температура проводу визначається допустимим провисанням і тепловою стійкістю матеріалу, тому тепловий режим є основним фактором, що обмежує пропускну здатність повітряних ліній.

Перегрів може виникати через перевантаження, несприятливі погодні умови, короткі замикання, старіння матеріалів або зовнішні впливи. Це призводить до погіршення механічних властивостей проводу, пошкодження ізоляторів та зниження надійності роботи лінії.

У зв'язку з цим важливого значення набувають сучасні системи моніторингу, які забезпечують контроль температури провідників, навантаження та метеорологічних параметрів у реальному часі, що дозволяє підвищити надійність роботи мереж та запобігти аварійним ситуаціям.

Тепловий режим та допустиме навантаження ПЛЕП

Тепловий режим повітряних ліній електропередавання визначає їх пропускну здатність, оскільки температура провідника обмежує максимально допустимий струм. Підвищення допустимого теплового навантаження дозволяє використовувати лінію ближче до її граничної пропускної здатності, однак при цьому зростає температура проводу. Максимально допустимий струм визначається з урахуванням допустимого провисання, механічної міцності та нормативних відстаней до землі, встановлених під час проєктування лінії.

Допустиме навантаження лінії не вимірюється безпосередньо, а розраховується з урахуванням погодних умов, сонячного випромінювання, конвективного та радіаційного охолодження, струмового навантаження і фізичних характеристик провідника. Для визначення теплового навантаження використовуються міжнародні стандарти, зокрема IEEE 738 та CIGRÉ [4], які дозволяють розрахувати максимально допустимий струм для сталого та перехідного режимів роботи.

У сталому режимі тепловий баланс визначається рівністю між кількістю тепла, що виділяється у провіднику, та теплом, яке відводиться у навколишнє середовище. У перехідних режимах рівновага порушується через накопичення тепла у провіднику. Значення допустимого навантаження можуть відрізнятися для різних ділянок лінії через зміну погодних умов, навіть при однаковому струмі.

З урахуванням цих факторів застосовується динамічне визначення допустимого навантаження (Dynamic Line Rating), яке базується на використанні даних у реальному часі. Такий підхід дозволяє точніше визначати температуру провідника, прогнозувати допустимий струм і підвищувати ефективність експлуатації повітряних ліній електропередавання.

Пропускна здатність провідників безпосередньо залежить від їх температури. Збільшення струмового навантаження під час нормальної роботи або в аварійних режимах допускається лише за умови, що температура не перевищує встановлених граничних значень. Підвищення температури призводить до погіршення експлуатаційних характеристик проводу, зниження механічної міцності, подовження, повзучості, збільшення стріли провисання та можливого порушення допустимих габаритів до землі.

У зв'язку з цим необхідним є застосування систем моніторингу, які забезпечують контроль теплового стану провідників та дозволяють підтримувати надійну і безпечну роботу ліній протягом тривалого часу. Використання таких систем дає змогу оцінювати теплові режими в різних умовах експлуатації, запобігати виникненню теплових перевантажень і зменшувати ймовірність аварій. Застосування сучасних засобів моніторингу підвищує ефективність роботи повітряних ліній електропередавання та забезпечує їх довготривалу і стабільну експлуатацію [5].

У таблиці 1 наведено порівняння різних пристроїв моніторингу, що застосовуються для контролю стану повітряних ліній електропередавання. Найбільш практичним є використання систем динамічного визначення допустимого навантаження (DTLR), оскільки вони забезпечують

розрахунок пропускної здатності в реальному часі та використовують фактичні дані для конкретної лінії.

Таблиця 1 – Порівняльна характеристика пристроїв моніторингу

Моніторинг	Пристрій	Точність	Місце встановлення	Вартість (закупівля)	Встановлення	Обслуговування	Переваги	Недоліки
Погода	Термоплатина	Н/Д	Паралельно до лінії	Низька	Низька	Низька	Без фізичного контакту з лінією, низькі витрати на обслуговування	Потрібно багато датчиків для зменшення похибки
Погода	Анемометр	$\pm 1-3\%$	Опора (вежа)	Низька	Низька	Низька	Дає актуальні погодні дані для оцінки клімату	Невизначеність параметрів впливає на рейтинг
Погода	Датчик температури повітря	$0.03-1^{\circ}\text{C}$	—	—	—	—	—	—
Погода	Датчик сонячної радіації	$\pm 10.5-3\%$	—	—	—	—	—	—
Температура провідника	SMT (до 250°C)	Н/Д	Безпосередньо на лінії	Висока	Середня	Висока	Саможивлення	Потрібно регулярне обслуговування
Температура провідника	Power donut (до 150°C)	$\pm 1^{\circ}\text{C}$	На лінії	Висока	Середня	Висока	Саможивлення, проста установка	Додаткова вага на провід
Температура провідника	Розподілені датчики (до 300°C)	$\pm 1-10^{\circ}\text{C}$	Біля або на лінії	Висока	Висока	Середня	Визначення гарячих точок, велика дистанція моніторингу	Затримки передачі даних
Температура провідника	SAW (до 125°C)	Н/Д	На лінії	Висока	Висока	Висока	Не чутливий до електромагнітних завад	Потрібна підтримка інших компонентів
Вертикальний габарит і провисання	Лазерне сканування	$\pm 0.20\%$ $\pm 1.5\text{ мм}$	Біля або посередині лінії	Середня	Низька	Низька	Безконтактне вимірювання	Обмежений діапазон
Провисання і температура	Резистивний провід	Н/Д	Нижня частина провідника	Низька	Низька	Низька	Дає середню температуру	Вплив погодних умов
Провисання	GPS	$\pm 19.6\text{ см}$	На лінії	Висока	Висока	Середня	Пряме вимірювання провисання	Вартість і затримки сигналу
Провисання	Ampacimon	$\pm 20\text{ см}$	На лінії	Висока	Висока	Висока	Не потребує калібрування	Висока вартість
Провисання	Sagometer	$\pm 15\text{ м}$	Опора	Висока	Середня	Висока	Простий монтаж	Вплив екстремальної погоди
Натяг	CAT-1	Н/Д	Кінцева опора	Висока	Середня	Висока	Не потребує датчиків	Повільна передача даних

Порівняльний аналіз показує, що найбільш ефективними є системи, які забезпечують отримання даних у реальному часі та дозволяють враховувати вплив погодних умов, навантаження та фізичних параметрів провідника. Використання таких систем дає можливість підвищити точність визначення допустимого струмового навантаження, зменшити ризик теплових перевантажень та підвищити надійність роботи повітряних ліній.

Особливу практичну цінність мають системи динамічного визначення допустимого навантаження, які дозволяють оптимізувати режим роботи лінії без необхідності її реконструкції або заміни провідників. Застосування таких технологій є важливим напрямом підвищення ефективності та безпеки експлуатації електричних мереж в умовах зростання навантаження та обмежених можливостей будівництва нових ліній.

Висновки

Зростання навантаження на електричні мережі потребує підвищення ефективності використання існуючих повітряних ліній електропередавання без значних витрат на будівництво нових. Пропускна здатність ліній обмежується тепловим режимом провідників, тому контроль їх температури є важливою умовою надійної та безпечної експлуатації.

Застосування сучасних систем моніторингу, зокрема технологій динамічного визначення допустимого навантаження, дозволяє отримувати дані в реальному часі, точніше визначати

допустимий струм та запобігати тепловим перевантаженням. Це підвищує надійність роботи повітряних ліній і забезпечує більш ефективне використання їх пропускної здатності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Електричні системи і мережі. Частина 1: навчальний посібник / Ю. В. Малогулко, О. Б. Бурикін, Т. Л. Кацадзе, В. В. Нетребський. – Вінниця: ВНТУ, 2020. – 203 с. [<https://jetiq.vntu.edu.ua/repository/card.php?lang=en&id=3814>]
2. Режим доступу: [https://dtek.com/content/files/plan-rozvitku-sistemi-rozpodilu-kem-2020-2024.pdf?utm_source=chatgpt.com]
3. R. G. Olsen, J. T. Leman. Overhead or Underground Transmission? That is (Still) the Question. T&D World, Feb 24, 2022. [https://base.imgix.net/files/base/ebm/tdworld/document/2022/04/2204TDW_42_47_24_Undergrounding_new.624c5cfc60700.pdf]
4. CIGRÉ. Failure Statistics of High Voltage Underground Cables in Urban Areas; CIGRÉ publications and working groups (2020–2024).
5. Zainuddin N. M., Rahman M. S. A., Kadir Z., Ali N. H. B. N. Review of Thermal Stress and Condition Monitoring Technologies for Overhead Transmission Lines: Issues and Challenges // IEEE Access. — 2020. — Vol. 8. — P. 1–1. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3004578

Малогулко Юлія Володимирівна – к.т.н., доцент, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: Juliya_Malogulko@ukr.net.

Глущенко Ілля Віталійович студент гр. ЕСМ-236, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця; e-mail: ilyaglusenko4@gmail.com

Malohulko Yuliya - PhD, Associate Professor, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Juliya_Malogulko@ukr.net.

Glushchenko Ilya - student, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia; e-mail: ilyaglusenko4@gmail.com.