

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

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАРУБІЖНОГО ДОСВІДУ БОРОТЬБИ З ОЖЕЛЕДНО-ПАМОРОЗЕВИМИ ВІДКЛАДЕННЯМИ НА ПРОВОДАХ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЯХ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ

Представлено засоби та технології прогнозування і запобігання ожеледно-паморозевих відкладень на проводах повітряних ліній електропередачі в електричних мережах зарубіжних країн. Акцентовано увагу на таких системах, як «Meteo», динамічний тепловий рейтинг, онлайн моніторинг China Southern Power Grid, Variable resistance cable de-icing system та мобільних установках плавлення ожеледі. Проаналізовано переваги і недоліки цих систем та виявлено, що такі підходи вимагають витрат енергії і є актуальним тільки для відповідного регіону електричних мереж залежно від погодних умов та відстані передачі електричної енергії. Розглянуто механічний, електромеханічний, електротермічний та фізико-хімічний методи запобігання ожеледно-паморозевих відкладень на проводах повітряних ліній електропередачі. Виявлено, що розгляд динамічних процесів є суттєвим і ефективним у дослідженнях електричних мереж в екстремальних погодних умовах, а дані про ожеледно-паморозеві відкладення на проводах повітряних ліній характеризуються високою розмірністю, нелінійністю, мультимодальністю та неоднорідністю, що унеможливило створення точної моделі прогнозування за допомогою традиційних методів оцінювання й прийняття рішень. Для вирішення цього завдання запропоновано використовувати метод аналізу часових рядів та метод Ensemble Empirical Mode Decomposition. В основі цих методів лежить максимізація використання властивих закономірностей, які представлені частотно-часовими характеристиками для ефективного аналізу даних і створення основи для наступних моделей та підвищення точності їх прогнозування. На основі виконаних досліджень запропоновано шляхи адаптації та інтегрування досвіду зарубіжних країн в електричні мережі України. Обґрунтовано необхідність створення комплексних інформаційних систем моніторингу метеопараметрів та режимів роботи електричних мереж з використанням спеціалізованих прогнозних моделей та IT-систем, що дозволить автоматизувати процес оцінювання поточного стану повітряних ліній електропередачі на основі метеорологічних даних з метою своєчасного прийняття рішення щодо аварійних ситуацій в електричних мережах, спровокованих ожеледно-паморозевими відкладеннями.

Ключові слова: повітряна лінія, електрична мережа, ожеледно-паморозеві відкладення, метеорологічні параметри.

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

STUDY OF FOREIGN EXPERIENCE IN DEALING WITH ICE AND FROST DEPOSITS ON THE WIRES OF OVERHEAD POWER LINES

The means and technologies for predicting and preventing frost and ice deposits on the wires of overhead power lines in the power grids of foreign countries are presented. The focus is on such systems as Meteo, dynamic thermal rating, online monitoring of China Southern Power Grid, Variable resistance cable de-icing system and mobile ice melting units. The advantages and disadvantages of these systems are analyzed and it is found that such approaches require energy consumption and are relevant only for the relevant region of the power grid, depending on weather conditions and the distance of electricity transmission. The mechanical, electromechanical, electrothermal, and physicochemical methods of predicting frost and ice deposits on the wires of overhead power lines are considered. It was found that the consideration of dynamic processes is essential and effective in the study of power grids in extreme weather conditions, and the data on frost and ice deposits on overhead line wires are characterized by high dimensionality, nonlinearity, multimodality, and heterogeneity, which makes it impossible to create an accurate forecasting model using traditional methods of evaluation and decision-making. The method of time series analysis and the method of Ensemble Empirical Mode Decomposition are proposed to solve this problem. The basis of these methods is to maximize the use of inherent regularities represented by frequency and time characteristics for effective data analysis and to create the basis for subsequent models and improve their forecasting accuracy. On the basis of the research, the author proposes ways to adapt and integrate the experience of foreign countries into the power grids of Ukraine. The necessity of creating integrated information systems for monitoring meteorological parameters and operating modes of power grids using specialized forecasting models and IT systems is substantiated, which will automate the process of assessing the current state of overhead power lines based on meteorological data in order to timely prevent emergencies in power grids provoked by frost and ice deposits.

Keywords: overhead line, power grid, ice and frost deposition, meteorological parameters.

Постановка проблеми. Незважаючи на великі зусилля енергетиків за багато років аварії від ожеледно-паморозевих відкладень (ОПВ) в електричних мережах (ЕМ) як України, так і багатьох країн спричиняють найбільш тяжкі наслідки. Як результат, енергокомпанії і споживачі несуть великі збитки, а відновлення обірваних проводів – трудомісткий і дорогий процес.

Енергетики розглядають ОПВ на проводах повітряних ліній електропередачі (ПЛ) всіх класів напруги як одну із найбільших проблем. З такими проблемами стикаються й багато північних країн, а також Китай і Японія. Тому в усьому світі велика кількість енергокомпаній та організацій активно ведуть дослідження і розробку нових методів та пристроїв для боротьби з ОПВ на проводах ПЛ.

Також слід звернути увагу, що на сьогодні недостатньо реалізовано можливості відомчої служби оперативного та прогнозного моніторингу метеорологічних параметрів, яка включає впровадження автоматизованої підсистеми оперативного керування в умовах виникнення аварій, спричинених ОПВ. Це, у свою чергу, значно знижує ефективність попереджувальних заходів, включаючи й плавку ожеледі на проводах ПЛ всіх класів напруги.

Вищенаведене й обумовлює актуальність проблеми, для вирішення якої доцільно проаналізувати існуючі в зарубіжних країнах підходи до оцінювання ОПВ на проводах ПЛ та дослідити можливості їх інтегрування їх в ЕМ України.

Аналіз публікацій. Питанням оцінювання ОПВ на проводах ПЛ присвячено ряд робіт як зарубіжних [1–6], так і українських вчених [7, 8].

© Г. В. Омеляненко, В. В. Черкашина, А. О. Шматов, 2023

Наприкінці 90-х в Італії у співпраці EGÚ Brno встановлено перший прототип для вимірювання кількості ОПВ на проводах ПЛ під назвою «Meteo». А пізніше на ці пристрої встановлено нові функції, що дозволило обробляти метеорологічні дані, які впливають на надійність ПЛ електропередачі [3].

Відповідні дослідження також були проведені в Ісландії та Бразилії на основі схем, які об'єднують ймовірності відмови залежних від погоди компонентів. За результатами цих досліджень створено систему динамічного теплового рейтингу (DTR), яку використано для підвищення ефективності роботи ПЛ електропередачі [1].

У Китаї з 2008 року функціонує система онлайн моніторингу China Southern Power Grid для забезпечення надійної та стабільної роботи ПЛ електропередачі. Дана система збирає неструктуровані і структуровані дані відносно стану ПЛ. Неструктуровані дані цієї системи містять дані зображення ПЛ. А структуровані дані містять метеорологічні та механічні дані, як-от температура, вологість, швидкість та напрямок вітру, кількість опадів, інтенсивність світла та максимальна-мінімальна тягова сила, кут вітру під максимально-мінімальною тяговою силою тощо [2].

Під час розгляду питань, пов'язаних з впливом ОПВ, доцільно звернути увагу й на індивідуальні перспективні розробки. Так, професор і підприємець з канадського міста Дартмут Віктор Петренко разом зі своїми колегами по університету і фахівцями американської компанії Ice Engineering LLC (штат Нью-Гемпшир) винайшли відносно дешевий і ефективний спосіб запобігання ОПВ на проводах ПЛ [4].

Таким чином, вже існують розробки, які дозволяють оцінювати ОПВ на проводах ПЛ. Але інтегрування таких систем в ЕМ України потребує детального аналізу й зосередження на моделюванні прогнозних задач щодо ОПВ на проводах ПЛ в ЕМ України.

Мета статті. Проаналізувати існуючі в електричних мережах зарубіжних країн підходи та методи прогнозування і запобігання ожеледно-паморозевих відкладень на проводах повітряних ліній електропередачі для обґрунтування ефективності їх роботи і можливості інтегрування в електричні мережі України.

Аналіз засобів та технологій прогнозування і запобігання ОПВ на проводах ПЛ електропередачі.

Система «Meteo» виготовлена з використанням датчиків, які оцінюють і обробляють інформаційні дані про стан ПЛ, а потім з кількістю попереджувальних повідомлень передають їх до вищої системи GPRS і в систему SCADA. До інформаційних даних, які передаються в систему відносяться дані про немеханічне втручання в моніторингове обладнання, припинення електропостачання та його відновлення, перевищення встановленого значення маси проводу і встановленої крутизни наростання льоду на проводі [3].

За умови відхилення від нормованих показників вище перелічених даних можливі хибні попереджувальні повідомлення для запобігання виходу з ладу системи електропостачання, що свідчить про невелику селективну чутливість даної системи.

Також слід звернути увагу, що основна проблема системи «Meteo» полягає у складності її налаштування для отримання справедливих даних про стан ПЛ.

На відміну від системи «Meteo» **система динамічного теплового рейтингу (DTR)** більш універсальна. До системи динамічного теплового рейтингу (DTR) [1] входять датчики для запису даних про погодні умови в реальному часі. Дана система використовує їх для визначення та прогнозування фактичних характеристик лінії, які можуть підвищити здатність ЕМ протистояти екстремальним погодним умовам, що є важливим фактором, оскільки розгляд динамічних процесів є суттєвим і ефективним у дослідженнях ЕМ в екстремальних погодних умовах. Це обумовлено тим, що тенденція до погіршення екстремальних погодних умов стала фактором, який загрожує безперебійній роботі ЕМ. Згідно зі статистичними даними історичних збоїв сніг, лід і сильний вітер викликали набагато більше збоїв в роботі ЕМ, ніж інші екстремальні погодні явища.

Система DTR реалізується за принципом системи прямого або непрямого вимірювання.

Система прямого вимірювання контролює погодні умови і температуру проводу, які відносяться до вхідних даних. Якщо система прямого вимірювання реалізована на постійній основі, то параметри про стан ліній в реальному часі можуть бути отримані і періодично оновлюватися, як правило, від 5 хвилин до години. Пристрій цієї системи живиться від електромагнітного поля, що випромінюється проводом під напругою. Цей пристрій можна легко встановити затиснувши його на проводі лінії.

У системі непрямого вимірювання параметри, які відображають температуру проводу, його натяг та провисання, вимірюються і використовуються для оцінювання номінальних характеристик лінії. Система контролю натягу одна із найпоширеніших непрямих методів виміру. Ця система працює шляхом послідовного монтажу тензодатчика із ізоляційними гірляндами. Натяг проводів лінії є хорошим показником для вимірювання, оскільки він має прямий зв'язок з провисанням проводу ПЛ, на яке додатково впливає температура проводу через протікання струму. Отже, визначення натягу проводу лінії вказує також і на стан роботи лінії, що робить дану систему доцільною і більш універсальною для оцінювання загального стану ПЛ ЕМ.

Система онлайн моніторингу China Southern Power Grid, яку розроблено в Китаї, адаптована до погодних умов країни й специфіки китайських ЕМ [2].

Електростанції в Китаї, як правило, розташовані у віддалених районах, що призводить до великої відстані передачі електричної енергії і, зазвичай, на цьому шляху знаходяться райони зі складними погодними умовами. Зокрема, більшість ПЛ електропередач у

південній частині Китаю часто страждають від сильних морозів, що призводить до різноманітних аварій з обледенінням, включаючи розрив або замикання на ПЛ електропередачі, а також обвалення опори електропередачі та спалах ізолятора. ОПВ спричиняють величезні економічні збитки підприємствам і створюють ризики безпеки країни та населенню. Для вирішення даної проблеми в Китаї створили систему моніторингу в режимі реального часу, яка швидко розвивалася і в даний час ефективно працює в ЕМ країни [2].

Під час аналізу підходів прогнозування ОПВ має сенс акцентувати увагу на вже існуючі технології запобігання ОПВ на проводах ПЛ.

До таких технологій відноситься технологія *variable resistance cable (VRC) de-icing system*, яка базується на застосуванні кабелю зі змінним опором [4]. Дана система являє собою незначні модифікації кабелю і зроблені з готових компонентів електронні пристрої, що дозволяють шляхом перемикання змінювати електричний опір ПЛ з низького на високий. Високий опір автоматично викликає нагрів, завдяки якому відбувається плавлення утвореного ОПВ, або, насамперед, запобігає наростанню ОПВ на проводах ПЛ.

Мобільні установки плавлення ОПВ призначені для локальної плавки ожеледі на проводах ПЛ [5]. На рис. 1 представлено принцип застосування мобільної установки плавлення ОПВ.

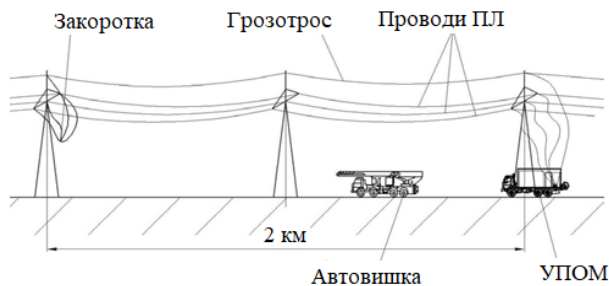


Рисунок 1 – Принцип застосування мобільної установки плавлення ОПВ

Застосування такої установки (рис. 1) потребує доступу до ПЛ. А враховуючи неможливість під'їзду автотранспорту до ПЛ через погодні умови цей метод переважно являється не прийнятним.

Слід відзначити, що проаналізовані вище засоби та технології прогнозування і запобігання ОПВ на проводах ПЛ вимагають витрат енергії і є актуальним тільки для відповідного регіону ЕМ.

Аналіз методів запобігання та прогнозування ОПВ на проводах ПЛ електропередачі. Вплив екстремальних погодних умов, як-от сніг, льодовий дощ тощо, на ЕМ включає дві основні категорії:

1. вага льоду на ПЛ може перевищувати межу її вантажопідйомності та призводити до розриву проводу лінії або руйнування опори, що спричинить відключення лінії;

2. коли ізолятор покритий льодом, толерантність ізоляції та продуктивність знижуються або навіть

втрачаються, що може призвести до однофазного замикання на землю.

Щоб уникнути збою в постачанні електроенергії, який спричинено екстремальними погодними умовами, необхідно визначити де такі явища відбуваються та дослідити масштаби їх впливу на окремі елементи інфраструктури ЕМ.

Методи запобігання ОПВ на проводах ПЛ полягають у недопущенні обмерзання, зниження розмірів відкладень та їх видалення.

Запобігання ОПВ на проводах ПЛ ведеться на основі нижчеперелічених методів [5–9]:

- механічні;
- електромеханічні;
- електротермічні;
- застосування високочастотного струму;
- фізико-хімічні.

Механічні методи полягають в застосуванні спеціальних пристосувань, що забезпечують збивання ОПВ з проводів. Недоліком таких рішень є низька продуктивність і можливість пошкодження і деформації проводів в процесі видалення ОПВ, що супроводжується прискореним зносом проводів й може призвести до їх обривів. Також невисоку ефективність видалення ОПВ показало й використання наземного транспортного засобу [5].

Електромеханічні методи видалення ОПВ з проводів ПЛ утворюють клас нових методів і пристроїв боротьби з ОПВ на проводах ПЛ. Видалення ОПВ на основі цих методів пропонується проводити не з допомогою термічного впливу від протікаючого по проводах струму, а за допомогою електромеханічного впливу на ОПВ [5].

Електротермічні методи полягають у нагріві проводів ПЛ електричним струмом для попередження утворення ОПВ або їх плавки. Плавлення ОПВ на проводах ПЛ здійснюється за умови існування ОПВ шляхом штучного підвищення струму в ЕМ до такої величини, при якій теплоти, яка виділяється в проводах, достатньо для розплавлення ожеледі [7, 8].

Метод застосування високочастотного струму полягає в тому, що без відключення лінії від споживачів на струмонесучі проводи подається високочастотний струм (в межах від 50 до 500 МГц), який розігріває провід. Оскільки струм має досить високу частоту, то виникає так званий «скін-ефект». Тобто, протікаючий по проводу струм витісняється у зовнішній шар провідника. За таких умов, товщина шару, по якому протікає струм, визначається за формулою:

$$\delta(f) = 10^{-3} \sqrt{\frac{\sigma}{\pi \mu_0 \mu f}} \quad (1)$$

де σ – питомий опір при постійному струмі, Ом мм²/м;

μ_0 – магнітна постійна, рівна $1,257 \cdot 10^{-6}$ Гн/м;

μ – відносна магнітна проникність;

f – частота, МГц.

Відповідно до (1) потоншення шару $\delta(f)$ з ростом частоти веде до збільшення опору тієї частини проводу, по якій тече струм. Це означає, чим вище значення частоти сигналу, тим більше розсіюється на провід теплова потужність за умови однакової величини струму, який протікає по проводу.

Однак, до недоліків такого методу слід віднести необхідність постійного прогріву проводів для запобігання ОПВ та високу вартість джерел високочастотного струму необхідної потужності.

Для реалізації цього способу доцільно використовувати радіопередавачі з діапазоном частот 87,5...108 МГц, а це може привести до створення радіоперешкод в ультракороткохвильовому діапазоні.

Фізико-хімічні методи полягають в нанесенні на проводи розчинів спеціальних речовин, які замерзають при температурах нижчих, аніж температура замерзання води. Ця група методів передбачає отримання покриттів з низькою адгезією до водних середовищ, як-от сніг і лід. Одним з найбільш перспективних методів в зниженні адгезії є створення супергідрофобних покриттів. Ці рідини або покриття корисні в дорожньому господарстві й авіації, але при передачі електричної енергії малоефективні. Термін дії таких «незамерзаючих рідин» недовгий, а регулярно наносити їх на сотні кілометрів проводів нереально [6].

Оскільки дані про ОПВ на проводах ПЛ характеризуються високою розмірністю, нелінійністю, мультимодальністю та неоднорідністю важко створити точну модель прогнозування за допомогою традиційних методів оцінювання й прийняття рішень [7–9].

Наразі робота зі складними мультимодальними даними про покриття ОПВ стикається з проблемами, які демонструють наявність «шуму» й геометричне зростання ОПВ, а розмірність даних стає все більшою і більшою. Однак, лише невелика частина високимірних ознак може відображати справжні характеристики даних. «Шум» у даних приховує реальну інформацію і впливає на точність моделі прогнозування.

Нелінійність, мультимодальність та неоднорідність даних призводять до того, що традиційні моделі прогнозування не відповідають вимогам для реалізації традиційними методами. Щільність цих даних низька і може існувати висока кореляція між різними вимірами, яка призводить до того, що традиційна модель прогнозування не працює належним чином, а точність прогнозу є низькою.

Також мультимодальні дані містять неструктуровані зображення і структуровані метеорологічні та механічні показники. Традиційні методи вилучення ознак не можуть ефективно обробляти такий спектр даних, тому що їх різноманітність і складність призводить до великих обчислювальних витрат на модель прогнозування, а сама модель прогнозування за таких умов менш надійна.

До методів, які дозволяють вирішити це завдання відноситься метод аналізу часових рядів та Ensemble Empirical Mode Decomposition (EEMD) [2].

Метод аналізу часових рядів використовується для обробки моделі прогнозування даних про ОПВ на проводах ПЛ, а дані обробляються часовими рядами для аналізу характеристик. Аналіз часових рядів широко використовувався в обробці динамічних даних і досяг великих успіхів.

Метод аналізу часових рядів для даних про ОПВ може ефективно зменшити вплив «шуму». Він також може максимізувати використання внутрішнього закону, представленого частотно-часовими характеристиками і ефективно аналізувати дані для забезпечення основ створення наступних моделей прогнозування [2].

Метод Ensemble Empirical Mode Decomposition (EEMD). Цей метод створений на основі методу аналізу частотно-часової області для адаптивного розкладання нелінійних і мультимодальних послідовностей та дослідження неявних режимів для покращення здатності проти «шуму».

В основі методу EEMD лежить максимізація використання властивих закономірностей, які представлені частотно-часовими характеристиками для ефективного аналізу даних і створення основи для наступних моделей та підвищення точності їх прогнозування [10].

На рис. 2 представлено модель, яку створено на базі EEMD для розкладання метеорологічних і механічних показників у дані ОПВ [11].

Відповідно до рис. 2, чим вища частота, тим вищий рівень енергії. За таких умов, залишковий сигнал можна відкинути тому, що енергія надто низька.

Оскільки відповідні фактори, які впливають на ОПВ, динамічно змінюються з часом, то ця модель використовує EEMD для адаптивного розкладання метеорологічних і механічних показників у дані ОПВ. Також доцільно розкладання вихідних даних на відносно одночастотні та стабільні компоненти таким чином, щоб зменшити вплив різних факторів на прогнозування ОПВ. Потім дані зображення та архівні дані про рівень ОПВ залучаються до створення моделі прогнозування, що ефективно покращує її точність.

Отже, проведений аналіз існуючих методів запобігання та прогнозування ОПВ на проводах ПЛ показав, що в даний час існує широкий спектр різних методів, які доцільно розглядати комплексно.

SWOT-аналіз. Представлені існуючі підходи і методи запобігання та прогнозування ОПВ на проводах ПЛ в ЕМ зарубіжних країн мають всі підстави до впровадження в ЕМ України.

Насамперед потрібно розуміти, що найбільш доцільним буде впровадження не однієї певної системи оцінювання та запобігання ОПВ, а декількох одночасно з подальшим розвитком технологій, а саме ІТ-систем. Тобто, за можливості, перейняти для початку технології, необхідні для запобігання ОПВ механічним методом. Це дасть змогу вирішувати проблему наявності ОПВ на проводах одразу.

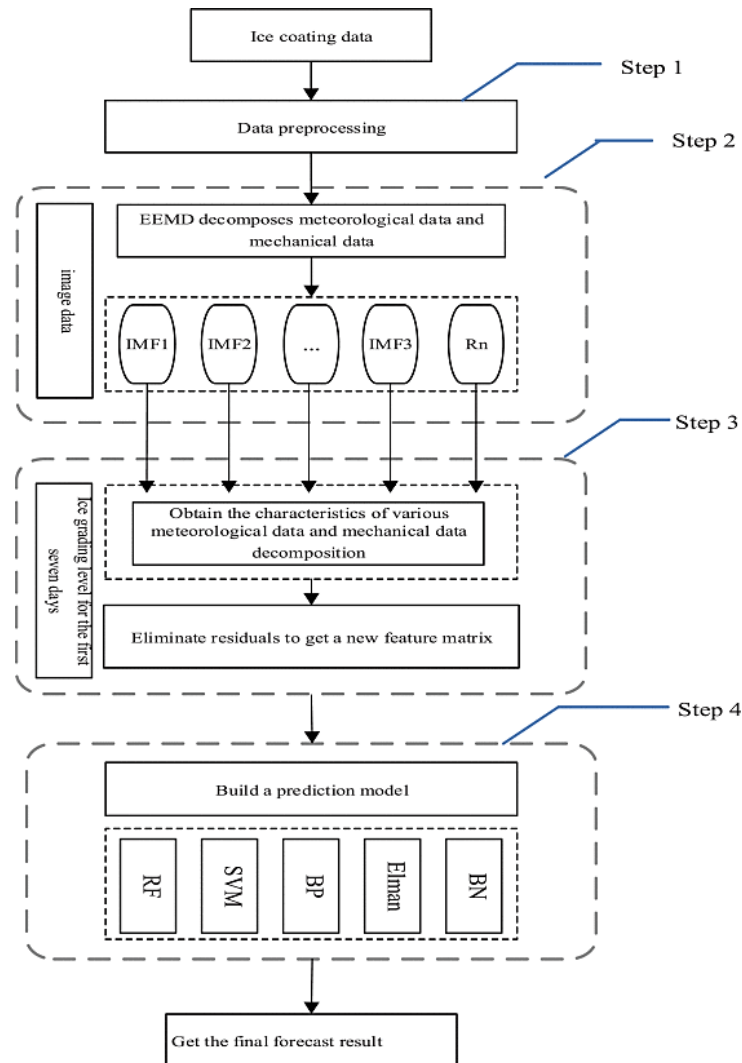


Рисунок 2 – Модель на базі EEMD для розкладання метеорологічних і механічних показників у дані ОПВ

В той же час доцільно розробити власну ІТ-систему оцінювання та запобігання ОПВ або підлаштувати під українські реалії зарубіжні ІТ-системи, які дають змогу слідкувати та попереджувати ОПВ на проводах ПЛ.

Також необхідно якнайшвидше розвивати електромеханічний та електротермічні методи запобігання ОПВ, адже вони є нескладними в реалізації та ефективними в експлуатації.

Щодо запобігання ОПВ хімічним способом, тобто нанесення розчину на проводи, такий підхід є дещо застарілим та малонадійним і ефективним, тому через це, ймовірно, не має потреби його реалізації в Україні.

Як показала практика експлуатації ПЛ, найбільш поширеним і ефективним способом запобігання ОПВ є плавка льоду на проводах [8]. Даний підхід забезпечується шляхом нагрівання проводів ПЛ електричним струмом. Ефективність плавлення багато в чому визначається організацією даного процесу. Особливо це стосується почергового плавлення ОПВ на групі взаємозв'язаних за режимом плавлення ПЛ. Головною проблемою в таких ситуаціях є відсутність завчасної інформації про стан погоди в районі, де проходить лінія.

Основним джерелом метеорологічної інформації про несприятливі для енергетики погодні умови є дані спостережень гідрометеорологічного центру, що в повній мірі не вирішує проблему інформаційного забезпечення. Тому для підвищення ефективності під час прийняття рішень для оцінювання та запобігання ОПВ на проводах ПЛ доцільно використовувати комплексні інформаційні системи моніторингу метеопараметрів та режимів роботи з використанням спеціалізованих прогнозних моделей та ІТ-систем.

Висновок. В статті проаналізовано підходи і методи прогнозування та запобігання ожеледно-паморозевих відкладень на проводах повітряних ліній електропередачі, які існують в електричних мережах зарубіжних країн. Розглянуто переваги і недоліки представлених способів і методів, наявні проблеми та можливі шляхи їх вирішення.

Обґрунтовано можливість інтегрування зарубіжного досвіду в електричні мережі України шляхом створення комплексних інформаційних систем моніторингу метеопараметрів та режимів роботи електричних мереж з використанням спеціалізованих прогнозних моделей та ІТ-систем, що дозволить автоматизувати процес оцінювання поточного стану

повітряних ліній електропередачі на основі метеорологічних та режимних даних для своєчасного прийняття рішення щодо аварійних ситуацій, які спровоковано ожеледно-паморозевими відкладеннями на проводах повітряних ліній електропередачі.

Список літератури

- Chen L., Shi X., Pengand B., Sun J. Dynamic Simulation of Power Systems Considering Transmission Lines Icing and Insulators Flashover in Extreme Weather. *IEEE Access*. 2022. Vol. 10. P. 39656–39664. DOI: <https://doi.org/10.1109/access.2022.3166483>.
- Li H., Chen Y., Zhang G. et al. Transmission line ice coating prediction model based on EEMD feature extraction. *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. P. 40695–40706. DOI: <https://doi.org/10.1109/access.2019.2907635>.
- Šabata J., Lehký P., Zeman L., Vaculik P. Automated Icing Monitoring System on the territory of the Czech and Slovak Republic. *16th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures (IWAIS 2015)* : Proceedings, Uppsala, Sweden, 28 June – 3 July 2015. P. 245–248. URL: https://windren.se/IWAIS_p/IWAIS2015/IWAIS2015_pa/70_09_04_Paper_Sabata_Automated_Icing_Monitoring_System_on_the_territory_of_the_Czech_and_Slovak_Republic.pdf.
- Petrenko V. F., Sullivan C. R., Kozlyuk V. Variable-resistance conductors (VRC) for power-line de-icing. *Cold Regions Science and Technology*. 2011. Vol. 65, no. 1. P. 23–28. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2010.06.003>.
- Trudel G., Gingras J. P., Pierre J. R. Designing a reliable power system: Hydro-Quebec's integrated approach. *Proceedings of the IEEE*. 2005. Vol. 93, no. 5. P. 907–917. DOI: <https://doi.org/10.1109/jproc.2005.846332>.
- Antonini C., Innocenti M., Horn T., Marengo M., Amirfazli A. Understanding the effect of superhydrophobic coatings on energy reduction in anti-icing systems. *Cold Regions Science and Technology*. 2011. Vol. 67, no. 1-2. P. 58–67. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2011.02.006>.
- Чебанов А. Б. Обґрунтування способу плавки ожеледиці повітряної лінії за допомогою генератора зондуючих імпульсів. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2018. Вип. 8, № 2. DOI: <https://doi.org/10.31388/2220-8674-2018-2-34>.
- Муслідинов А. Р., Жарікова А. О. Плавка ожеледиці на проводах ЛЕП. *IX Всеукраїнська науково-технічна конференція здобувачів вищої освіти ТДАТУ імені Дмитра Моторного* : зб. тез, м. Мелітополь, Україна, 10–25 листоп. 2021 р. С. 20–21.
- Jones K. F. A simple model for freezing rain ice loads. *Atmospheric Research*. 1998. Vol. 46, no. 1-2. P. 87–97. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0169-8095\(97\)00053-7](https://doi.org/10.1016/s0169-8095(97)00053-7).
- Chen L., Zhang H., Wu Q., Terzija V. A numerical approach for hybrid simulation of power system dynamics considering extreme icing events. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2018. Vol. 9, no. 5. P. 5038–5046. DOI: <https://doi.org/10.1109/tsg.2017.2679109>.
- Zhao G., Lu Z., Wang X., Peng Y., Chang S. Full scale experiment for vibration analysis of ice-coated bundled-conductor transmission lines. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2022. Vol. 26, no. 1. P. 336–352. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12205-021-0814-2>.

References

- L. Chen, X. Shi, B. Peng, and J. Sun, "Dynamic simulation of power systems considering transmission lines icing and insulators flashover in extreme weather," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 39656–39664, 2022, doi: <https://doi.org/10.1109/access.2022.3166483>.
- H. Li et al., "Transmission line ice coating prediction model based on EEMD feature extraction," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 40695–40706, 2019, doi: <https://doi.org/10.1109/access.2019.2907635>.
- J. Šabata, P. Lehký, L. Zeman, and P. Vaculik, "Automated Icing Monitoring System on the territory of the Czech and Slovak Republic," in *16th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures (IWAIS 2015)*, Uppsala, Sweden, Sweden, Jun. 28–Jul. 3, 2015. pp. 245–248. [Online]. Available: https://windren.se/IWAIS_p/IWAIS2015/IWAIS2015_pa/70_09_04_Paper_Sabata_Automated_Icing_Monitoring_System_on_the_territory_of_the_Czech_and_Slovak_Republic.pdf.
- V. F. Petrenko, C. R. Sullivan, and V. Kozlyuk, "Variable-resistance conductors (VRC) for power-line de-icing," *Cold Regions Science and Technology*, vol. 65, no. 1, pp. 23–28, Jan. 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2010.06.003>.
- G. Trudel, J. P. Gingras, and J. R. Pierre, "Designing a reliable power system: Hydro-Quebec's integrated approach," *Proceedings of the IEEE*, vol. 93, no. 5, pp. 907–917, May 2005, doi: <https://doi.org/10.1109/jproc.2005.846332>.
- C. Antonini, M. Innocenti, T. Horn, M. Marengo, and A. Amirfazli, "Understanding the effect of superhydrophobic coatings on energy reduction in anti-icing systems," *Cold Regions Science and Technology*, vol. 67, no. 1-2, pp. 58–67, Jun. 2011. doi: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2011.02.006>.
- A. Chebanov, "Justification of the mode of fusion of ice overhead lines by means of the generator of probing pulses," *Scientific Bulletin of the Tavrnia Agrotechnological State University*, vol. 8, no. 2, 2018, doi: <https://doi.org/10.31388/2220-8674-2018-2-34>. (in Ukrainian)
- A. R. Musledinov and A. O. Zharikova, "Plavka ozheledytsi na provodakh LEP [Melting ice on power line wires]," in *IX Vseukrainska Naukovo-Tekhnichna Konferentsiia Zdobuvachiv Vyshchoi Osvity Tdatu Imeni Dmytra Motornoho [IX All-Ukrainian Scientific and Technical Conference of Higher Education Applicants of the Dmytro Motorny Tavrnia State Agrotechnological University]*, Melitopol, Ukraine, Nov. 10–25, 2021. pp. 20–21. (in Ukrainian)
- K. F. Jones, "A simple model for freezing rain ice loads," *Atmospheric Research*, vol. 46, no. 1-2, pp. 87–97, Apr. 1998. doi: [https://doi.org/10.1016/s0169-8095\(97\)00053-7](https://doi.org/10.1016/s0169-8095(97)00053-7).
- L. Chen, H. Zhang, Q. Wu, and V. Terzija, "A numerical approach for hybrid simulation of power system dynamics considering extreme icing events," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 5, pp. 5038–5046, Sep. 2018. doi: <https://doi.org/10.1109/tsg.2017.2679109>.
- G. Zhao, Z. Lu, X. Wang, Y. Peng, and S. Chang, "Full scale experiment for vibration analysis of ice-coated bundled-conductor transmission lines," *KSCE Journal of Civil Engineering*, vol. 26, no. 1, pp. 336–352, Jan. 2022, doi: <https://doi.org/10.1007/s12205-021-0814-2>.

Надійшла (received) 23.05.2023

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

Омеляненко 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»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3276-5476>; e-mail: omeljanenkhalina@gmail.com.

Черкашина Вероніка Вікторівна (Veronika Viktorivna Cherkashyna) – доктор технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри передачі електричної енергії, академік НАН ВО України; м. 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»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3786-7834>; e-mail: shalex7573@gmail.com.