

**В. В. Кучанський<sup>1</sup>**  
**Є. О. Зайцев<sup>1,2</sup>**  
**О. М. Коваленко<sup>2</sup>**

## **АНАЛІЗ КОЛИВАНЬ ПРОВОДІВ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ ПІД ЧАС ПЛАВЛЕННЯ ОЖЕЛЕДІ ПОСТІЙНИМ СТРУМОМ**

<sup>1</sup>Національна академія наук України Інститут електродинаміки, Київ;

<sup>2</sup>Центр інформаційно-аналітичного та технічного забезпечення моніторингу об'єктів атомної енергетики НАН України, Київ

*Проаналізовано взаємозв'язок між струмом плавлення ожеледі, розподілом температури та вібрацією проводів повітряної лінії електропередавання, який ґрунтується на використанні методу послідовного зв'язку для отримання рівняння зв'язку між електричною та тепловою енергіями, що виділяється під час танення ожеледі на проводах постійним струмом. Зазвичай у випадку розрахунку режимів плавки ожеледі вирішується завдання вибору такого значення струму плавки, за якого в заданих метеорологічних умовах ожеледь буде видалена за заданий час. Для конкретної схеми плавки ожеледі такий струм залишається практично незмінним для всіх погодних умов, тому завжди є побоювання, що значення струму в цій схемі може виявитися недостатнім для успішної плавки ожеледі за умов певної несприятливої, але можливої товщини стінки ожеледі, швидкості вітру і температури навколишнього середовища. У статті на основі уточненої моделі плавки ожеледі розглянуто методику визначення дійсної області метеорологічних умов, за яких у разі заданого значення струму забезпечується успішна плавка ожеледі. Зазвичай у випадку розрахунку режимів плавки ожеледі вирішується завдання вибору такого значення струму плавки, за якому в заданих метеорологічних умовах ожеледиця буде розплавлена за заданий час. Така постановка задачі придатна для повітряних ліній, обладнаних спеціальними установками плавки ожеледі з регульованим значенням струму. За умови, що струм плавки ожеледі у всіх погодних умовах не перевищує допустимого значення. Для повітряних ліній, що не мають таких установок струм плавки ожеледі не регулюється, його значення доводиться вибирати з урахуванням низки обмежень (механічної міцності дротів, потужності джерел живлення, схеми живлення для плавлення ожеледі, довжини зони плавлення ожеледі тощо). Досвід експлуатації електричних мереж показує, що ожеледь-вітрові аварії на ПЛ належать до найтяжчих, можуть дезорганізувати електропостачання великих економічних районів регіонів України. Питання запобігання ожеледь-вітровим аваріям на ПЛ актуальне і для магістральних електричних мереж. Варто зазначити суттєву економічну шкоду від ожеледь-вітрових аварій на Західній електроенергетичній системі в осінньо-зимові періоди: 2004—2005, 2010—2011 та 2012—2013.*

**Ключові слова:** ожеледоутворення, повітряна лінія електропередавання, плавлення льоду постійним струмом, вібраційні характеристики.

### **Вступ**

Проводи високовольтних повітряних ліній електропередавання (ЛЕП) найчастіше знаходяться в незахищеному зовнішньому середовищі. За таких умов на можливості безперебійної та безпечної експлуатації ЛЕП впливають характеристики географічного середовища [1], [2], кліматичні умови, рельєф і метеорологічні умови вздовж траси, а також явище ожеледі, що утворюється навколо проводу [3], [4]. З урахуванням, того що Україна знаходиться в зоні помірного кліматичного поясу з ознаками, в основному, помірно континентального та частково субтропічного клімату, для якого характерні м'які зими, які, останнім часом, стають теплішими, що створює сприятливі умови до налипання мокрого снігу на лінії ЛЕП з подальшим утворенням крижаного покриття. Надмірна



Рис. 1. Руйнування проводу ЛЕП внаслідок налипання снігу та утворення ожеледі

тання висвітлено у багатьох роботах, як вітчизняних так і зарубіжних авторів. В роботах [7], [8] провід ЛЕП приймається багатожилковим алюмінієвим проводом зі сталевим осердям для розрахунку, що зменшує точність оцінювання характеристик вібрації за умов плавлення льоду постійним струмом. У процесі розроблення математичної моделі плавлення льоду проводів ЛЕП постійним струмом рівняння температурної рівноваги, отримане на основі закону збереження енергії, у більшості випадків зводиться до рівняння, яке не враховує процес накопичення енергії, що знижує точність розрахунків [9], [10]. Варто зауважити, що суттєве підвищення струму, яке використовуються задля забезпечення танення ожеледі, може спричинити електричні та механічні аварії ЛЕП [11]—[13].

В джерелах [13], [14] проаналізовано та описано процес плавлення льоду постійним струмом та запропоновано відповідну динамічну математичну модель розрахунку плавлення льоду постійним струмом. На основі обчислювальної моделі [14], [15] запропоновано нову динамічну математичну модель розрахунку шляхом уточнення форми плавлення льоду або етапу процесу плавлення льоду та досліджено відповідні методи вирішення, які не враховують вплив вібрацій на технічний стан проводів ЛЕП. В основному дослідження вібраційного стану проводів ЛЕП під час плавлення ожеледі в основному поділяються на теоретичні дослідження процесу плавлення льоду постійним струмом та теоретичні дослідження процесу вібрації проводів. Окремо можна виділити роботи, щодо аналізу вібраційного процесу проводів [16], [17] в яких виведено рівняння коливань відповідно до основних принципів кінематики. Наведена модель не враховує вплив підвищення температури, створюваного постійним струмом короткого замикання, на робочі характеристики проводу ЛЕП та нерівномірний розподіл температури всередині провідника, що в практичному випадку не дозволяє точно визначити дисперсію стрибка для плавлення проводу ЛЕП. В запропонованій в [18], [19] моделі розрахунку розрахункова амплітуда вібраційного стрибка ЛЕП під час танення льоду під дією постійного струму також сильно відхиляється від фактичного значення.

Дослідження проходження вібраційного процесу на його вплив на характеристики ліній ЛЕП під час плавлення льоду постійним струмом може забезпечити важливу теоретичну основу для аналізу та запобігання вторинним пошкодженням від плавлення льоду постійним струмом, а також дозволить розвинути теоретичну основу для аналізу характеристик вібрації проводів ЛЕП в процесі танення льоду постійного струму.

Отже, за результатами аналізу досліджень вітчизняних та зарубіжних науковців щодо висвітлення питання плавлення ожеледі постійним струмом, виявлено такі недоліки:

- використані моделі не враховують вплив осьових температурних змін проводів ЛЕП під впливом температури льоду, а лише визначають граничні умови для реалізації двовимірної моделі;
- не розглядається вплив розподілу температури на поверхні та в самому провіднику на структурну характеристику;
- використана формула розрахунку амплітуди вібраційного стрибка проводу отримується за кривою, яка не має теоретичного підтвердження;
- термічний ефект Джоуля, створений струмом короткого замикання плавлення льоду, не враховується;

вага ожеледі в багатьох випадках призводить до руйнування ЛЕП (приклад руйнування наведено на рис. 1). Так причиною знеструмлень у регіоні багатьох регіонах України зимою 2023—2024 років стала ожеледь на проводах повітряних ліній електропередавання, подекуди вона сягала діаметра 60...89 мм. Такі значення є рекордними за період спостережень з 1945 року [5].

Для того, щоб ЛЕП з утвореним крижаним покриттям на проводах могли безпечно та ефективно функціонувати широко використовуються методи плавлення ожеледі постійним струмом [6]—[10].

Аналітичний огляд відомих літературних джерел щодо дослідження плавлення ожеледі постійним струмом, показав, що це пи-

- відсутній зв'язок процесу танення льоду зі зміною термічного та електричного полів;
- значна кількість робіт оснований на використанні масштабованих моделей, ігноруючи узгодженість між експериментальними та теоретичними дослідженнями, а також симуляційним аналізом.

Враховуючи зазначені недоліки, основною метою цієї статті є оцінка впливу розподілу температури плавлення ожеледі постійним струмом на вібраційні характеристики проводів ЛЕП.

## 1. Аналітичне визначення залежності вібраційної характеристики від температури плавлення льоду проводу ЛЕП постійним струмом

Для аналізу зв'язку між тепловими характеристиками та вібраційними характеристиками льоду від початку до завершення плавлення необхідно визначити ключові часові точки теплоутворення та споживання в процесі плавлення льоду. Для визначення цих точок використаємо метод послідовного зв'язку електротермічної структури. У цьому разі розподіл тепла, яке використовується проводом ЛЕП для плавлення льоду, складається з трьох складових: енергії, використаної на підвищення температури, теплоти плавлення та теплообміну. Тому рівняння розподілу енергії, затраченої на плавлення льоду, матиме вигляд

$$W_J = W_S + W_R + W_H, \quad (1)$$

де  $W_J$  — теплота, яка утворена струмом для плавлення льоду проводу ЛЕП;  $W_S$  — теплота підвищення температури льоду та поглинання тепла для моделі танення льоду проводу;  $W_R$  — теплота, необхідна для підтримання процесу танення льоду провідника;  $W_H$  — теплота для теплообміну між шаром льоду та зовнішнім середовищем.

Теплота  $W_J$  утворюється в проводі передачі постійним струмом короткого замикання. Робота, яка виконується струмом генерує лише тепло, яке визначається за допомогою закону Джоуля

$$W_J = \int_{t_0}^t I^2 \rho_0 \frac{S}{L} (1 + \alpha T) dt, \quad (2)$$

де  $I$  — електричний опір постійного струму плавлення льоду проводу передачі;  $R$  — опір проводу передачі;  $t$  — час, протягом якого подається постійний струм танення льоду до проводу ЛЕП;  $t_0$  — момент початкового застосування постійного струму плавлення льоду проводу ЛЕП;  $\rho_0$  — питомий опір постійного струму проводів передачі за  $0^\circ\text{C}$ ;  $L$  — довжина провідника, задіяного за умов плавлення льоду постійним струмом;  $S$  — площа поперечного перерізу проводу передачі плавлення льоду постійного струму;  $\alpha$  — температурний коефіцієнт питомого опору;  $T = T(x, y, z, t)$  функція розподілу температури проводу передачі плавлення льоду постійного струму в будь-якій точці в будь-який час.

Враховуючі, що провід під ожеледдю має три складові (сталевий сердечник, багатожильний алюмінієвий провід і лід), які в процесі плавлення льоду через температурне розширення матеріалів збільшуються за рахунок теплоти  $W_J$ , що підвищує загальну температуру. До початку плавлення лід немає повітряного зазору між ним та проводом. На цьому етапі, враховуючі лише поглинання тепла матеріалом, для розрахунку  $W_S$ ,  $W_R$  та  $W_H$  використовують такі співвідношення:

$$W_S = \int_{T_0}^T c_s m_s dT + \int_{T_0}^T c_a m_a dT + \int_{T_0}^T c_i m_i dT; \quad (3)$$

$$W_R = \rho_i L_F \Delta V; \quad (4)$$

$$W_H = \int_{t_0}^t \iiint_{\Sigma} \kappa \nabla T ds dt = \int_{t_0}^t \iiint_{\Omega^3} \nabla (\kappa \nabla T) dv dt = \int_{t_0}^t \iiint_{W^3} \kappa \nabla^2 T dx dy dz dt. \quad (5)$$

Для врахування жорсткості та гнучкості проводу під час плавлення льоду постійним струмом скористаємося тим, що матриця жорсткості та матриця гнучкості проводу є зворотними матрицями. У цьому разі, матриця гнучкості проводу в процесі його плавлення постійним струмом отримується через матрицю гнучкості проводу за нормальної роботи, яка для будь-якого проводу виражається таким рівнянням:

$$\begin{bmatrix} v_1(t) \\ v_2(t) \\ \dots \\ v_3(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & \dots & f_{1n} \\ f_{12} & f_{22} & \dots & f_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ f_{n1} & \dots & \dots & f_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \dots \\ p_n \end{bmatrix}, \quad (6)$$

де  $v_i(t)$  — зміщення в різних точках проводу ЛЕП, яке визначає коливні рухи проводу, тобто його вібраційний стан;  $f_{mn}$  — навантаження, прикладене в  $n$  точці проводу ЛЕП, що викликає відхилення інших точок;  $p_i$  — навантаження у визначеній точці проводу.

Розрахуємо температуру танення льоду проводу ЛЕП постійного струму

$$T = t + \frac{I^2 R - 7,24 \left( \frac{318 + 0,5t}{1000} \right) \varepsilon_n d}{0,7 \left( \frac{Vd}{2} \right)^{0,75}}, \quad (7)$$

де  $f_{mn}$  — коефіцієнт випромінювання льоду;  $V$  — швидкість вітру під час танення льоду.

Використання формул (1)—(7) обмежено їхніми граничними умовами та ідеалізованими припущеннями.

Для врахування конструктивних особливостей проводу ЛЕП, процесів танення льоду та теплопередачі між компонентами системи провід–лід–зовнішнє середовище необхідно виконати значний обсяг аналітичних розрахунків та фізичного моделювання на натурних прототипах за використання значної кількості вимірювальних перетворювачів [20]—[22] та відповідних засобів обробки отриманих результатів, окрім того на процес танення льоду на нагрітому проводі будуть впливати і зовнішні чинники середовища (сила тяжіння, сила вітру, тощо). Проведення таких досліджень є не тільки складним у реалізації, а й тривалим процесом, який вимагає залучення значних фінансових та людських ресурсів [23]. Тому для підвищення точності розрахунку температури плавлення льоду постійним струмом на проводах та оцінки їхнього вібраційного стану скористаємося методом узагальненої мінімальної нев'язки тривимірного інтегрального рівняння теплового балансу для плавлення льоду проводів та засобів комп'ютерного моделювання.

## 2. Моделювання та аналіз вібраційних характеристик проводів ЛЕП в процесі плавлення льоду постійним струмом

Враховуючи різні фактори, такі як структурні характеристики проводів, властивості матеріалу та необхідні фактори, що відповідають фактичним умовам плавлення льоду з урахуванням можливостей комп'ютерного моделювання проводів розроблено тривимірну твердотільну модель поля зв'язку електроенергії–тепла–структури провідника та льоду.

Початкові умови моделі визначається шляхом знаходження форми проводу і льоду. За умов введення початкових структурних параметрів проводу передачі модуль пружності сталевого матеріалу становить 206 ГПа, коефіцієнт Пуассона 0,28, а щільність матеріалу 0,75 г/см<sup>3</sup>; модуль пружності алюмінієвого матеріалу становить 59 ГПа, а коефіцієнт Пуассона — 0,31. Відповідні параметри для двох найчастіше застосовуваних марок проводів подано в табл. 1. Для отримання розподілу температури танення використано різні величини струмів.

Таблиця 1

Параметри алюмінієвого багатожильного проводу зі сталевим осердям

Параметр		АС-500/64	АС-400/51
Кількість жил/діаметр, мм	Алюміній	48/3,60	48/3,22
	Сталь	7/2,80	7/2,5
Площа поперечного перерізу, мм <sup>2</sup>	Алюміній	488,58	390,88
	Сталь	43,1	34,36
	Сумарне значення	531,68	425,24
Зовнішній діаметр, мм	—	30	26,82
Опір постійному струму, Ω/км	—	0,05912	0,07389

Використовуючи розроблену імітаційну модель плавлення льоду розраховано температурний стан в різних точках проводу в залежності від шару льоду та інтервалу часу від початку процесу танення.

Зміни температури зовнішньої поверхні та внутрішньої температури передавального дроту в процесі танення льоду отримані за температури навколишнього середовища  $-5^{\circ}\text{C}$ . Товщина льоду вибирається за принципом різниці температур, при цьому на провід безперервно подається постійний струм значенням 2000 А.

Після початку танення льоду температура проводу та льоду поступово підвищується, поки не стане стабільною, оскільки температура зовнішнього середовища встановлено на рівні  $-5^{\circ}\text{C}$ . У цьому разі зовнішня поверхня шару льоду на проводі завжди залишається незмінною, внутрішнє тепло не може вивільнятися через теплопровідність, внутрішня температура поступово зростає, а температура сталевого осердя вища, тому розподіл температури проводу під час процесу танення льоду є таким нерівномірний. Отримані розподіли температур проводів для випадку танення льоду з товщиною 5 мм показано на рис. 2.

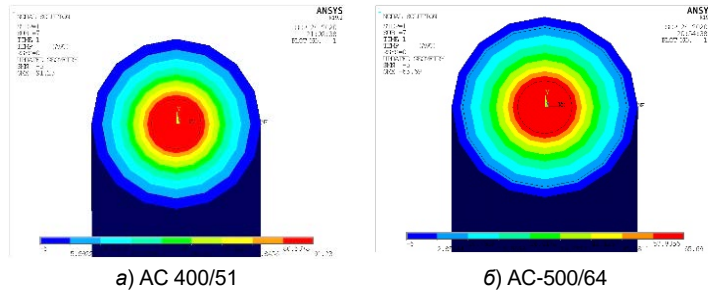


Рис. 2. Розподіл температури в проводі ЛЕП

### 3. Моделювання вібраційного процесу плавлення льоду проводів постійним струмом

Зазначимо, що зміна поля температури впливає на лінійні характеристики проводу та викликає місцеві вібрації, але при цьому виникнення вібрації від танення льоду не впливає на температурне поле або його зміну. Тому для визначення вібрації проводу та процесів, які їх викликають, необхідне проведення спільних досліджень з аналізу зміни величини електричної та теплової енергії та їхній вплив на механічні характеристики проводу за умов танення льоду, це дозволить комплексно вирішити проблему вібраційних характеристик проводів передачі від танення льоду постійним струмом. При цьому аналіз вібраційних характеристик провідників від плавлення льоду використовує лише односторонній зв'язок в системі провід–лід–зовнішнє середовище, а отримані раніше результати аналізу розподілу температурного поля під час плавлення льоду постійним струмом проводів передачі використовуються як основа для аналізу механічних змін проводів, які призводять до виникнення вібрації.

Для аналізу вібрації ЛЕП від танення льоду від впливу постійного струму вибрано метод моделювання додаткової сили, який імітує шар льоду шляхом застосування зовнішнього навантаження та імітує робочі умови льоду в реальних умовах шляхом зміни положення та розміру прикладеного навантаження. В моделі використано структурні параметри проводів AC-500/64 і AC-400/51 та визначено навантаження льоду відповідно до круглого шару льоду товщиною льоду 5 мм, 10 мм, 15 мм і 20 мм, відстань між опорами 300 м. Використання моделі дозволило визначити характеристики вібрації проводу передачі під впливом температури танення льоду та без впливу температури за однакових інших параметрів. Криві коливання проводів в вертикальній площині в часі відносно середньої точки двох ліній електропередавання отримано шляхом вибору точок максимальної амплітуди переміщення провідника, як показано на рис. 3.

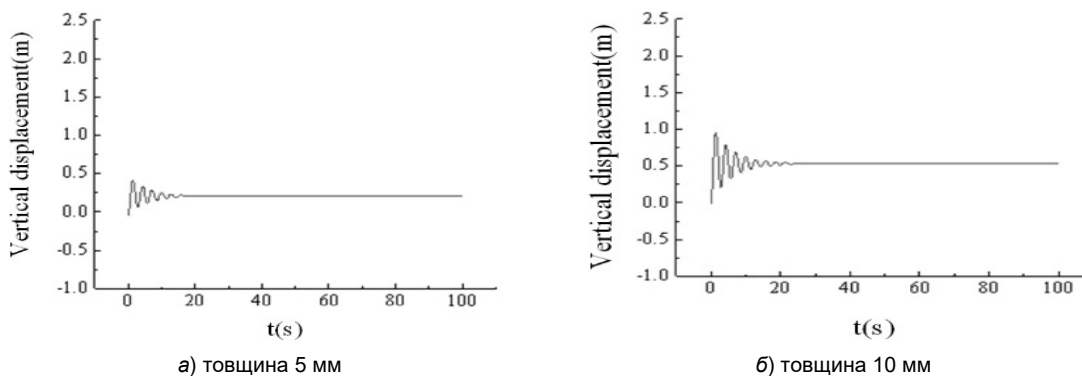
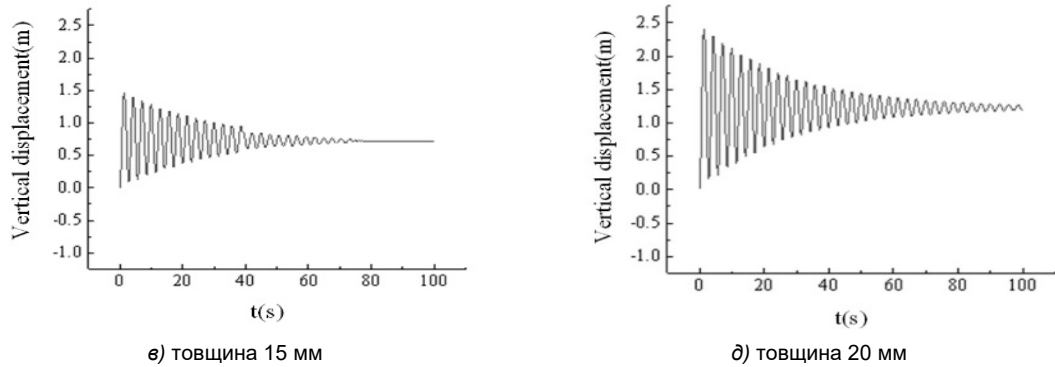


Рис. 3. Вертикальне зміщення проводу AC 400/51 відносно середньої точки



Продовження рис. 3. Вертикальне зміщення проводу АС 400/51 відносно середньої точки

Отримані криві (рис. 3) вертикального переміщення проводів АС 500/64 і АС 400/51 майже однакові за умови однакової товщини льоду. Проте за умови різної товщини льоду отримано, що чим менша товщина льоду, тим сильніший вплив, за товщини льоду 5 мм частка температури, яка впливає на проводи передачі, становила 47,62 % і 50,00%, тоді як за товщині льоду 20 мм, частка впливу становила 8,22 % і 10,79 % відповідно для проводів АС 500/64 і АС 400/51.

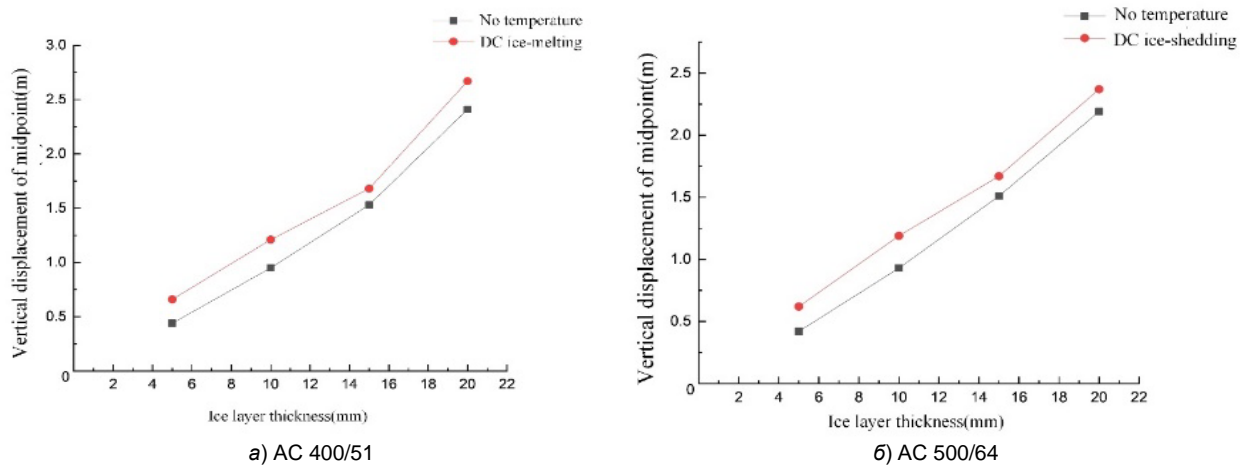


Рис. 4. Вертикальне зміщення середньої точки проводу передавання в залежності від товщини льоду

#### 4. Випробування на вібрацію та аналіз процесу плавлення льоду постійним струмом

Для подальшої перевірки точності математичної моделі, на основі результатів, отриманих шляхом моделювання проведено польові випробування шляхом встановлення система онлайн-моніторингу вібрації на наявній ділянці ЛЕП. Випробування вібраційного зміщення танення льоду проводиться під час виконання танення льоду. Дані метеорологічного середовища записувалися у момент виникнення вібропереміщень за умов зледеніння (провисання проводу), а також враховується стан руху та переміщення сенсора відносно початкової точки встановлення. Аналогічні дані метеорологічних умов навколишнього середовища та вібропереміщення проводу записувалися під час плавлення ожеледі постійним струмом.

Польові випробування проводились на найближчій доступній відстані до системи контролю короткого замикання плавлення постійного струму на монтажній опорі. Пристрій для плавлення льоду постійним струмом розміщено на терміналах опори та встановлено за допомогою кутової сталевий зовнішньої рами на стовпі опори ЛЕП. Пристрій для плавлення льоду постійним струмом складається з траверси та короткого кабелю при цьому основний корпус комбінованого механізму для здійснення короткого замикання складається з порожнистої алюмінієвої трубки довжиною 3,7 м (750 кВ) і 2,5 м (400 кВ) і опорного ізолятора 0,3 м, довжина короткого кабелю становить 5,2 м, а параметри властивостей матеріалу наведені в табл. 2. Пристрій для плавлення льоду є трифазним А, В та С, його встановлено на вибраній опорі лінії для плавлення льоду та є повністю узгоджено з трифазною лінією 750 кВ і 400 кВ. Моделі марок проводів АС-500/64 і АС-400/51 ЛЕП встановлено з регулюванням напрямку і кута встановлення ізоляторів, щоб утримувати траверсу пристрою постійного струму для танення льоду, за цих умов короткий кабель вста-

новлено на опорі ЛЕП на певній відстані для забезпечення під час плавлення льоду.

Система онлайн-моніторингу вібрації проводів під час танення ожеледі постійним струмом призначена задля забезпечення збору та аналізу вібропереміщень проводу, товщини шару танення льоду та метеорологічних умов навколишнього середовища лінії електропередавання. Головним чином завдяки збору даних метеорологічних параметрів середовища, таких як температура, напрямок вітру, а також розрахунку товщини льоду на основі методу виявлення ожеледі отримано значення товщини льоду на проводах. Сенсор моніторингу вібрації розміщено в 5 рівномірно розташованих точках між прольотами, що відповідало 1/8, 2/8, 3/8, 4/8, 6/8 прольоту, з яких сенсор в точці 4/8 є основним, а решта чотири є вторинними точками моніторингу, встановленими на випадок відриву основної точки моніторингу.

Живлення, система збору даних та сенсори встановлені на опорі ЛЕП, а засоби оброблення та відображення розташовані на безпечній відстані. Зв'язок між засобами обробки та іншими частинами системи онлайн-моніторингу вібрації проводів забезпечувався засобами дистанційного зв'язку [24], [25].

Однією з основних складнощів проведеного польового експерименту була необхідність очікування появи льоду на лінії електропередавання для проведення тесту, адже з урахуванням кліматичної зони України є лише дві або три можливості завершити тест на танення льоду та зібрати необхідні дані взимку. Схема встановлення пристрою онлайн-контролю танення льоду постійного струму для провідників наведена на рис. 5.

Таблиця 2

Складові системи плавлення льоду

Складова	Параметр	Числове значення
Кабель короткого замикання	погонна вага, кг/м	0,57
	модуль пружності, ГПа	58
Траверса для танення льоду постійним струмом	погонна вага, кг/м	71,7
	модуль пружності, ГПа	5,71
Розпірні ізолятори	погонна вага /(кг/м)	7,5
	модуль пружності, ГПа	30
	модуль зсуву, ГПа	5
	діаметр, мм	120

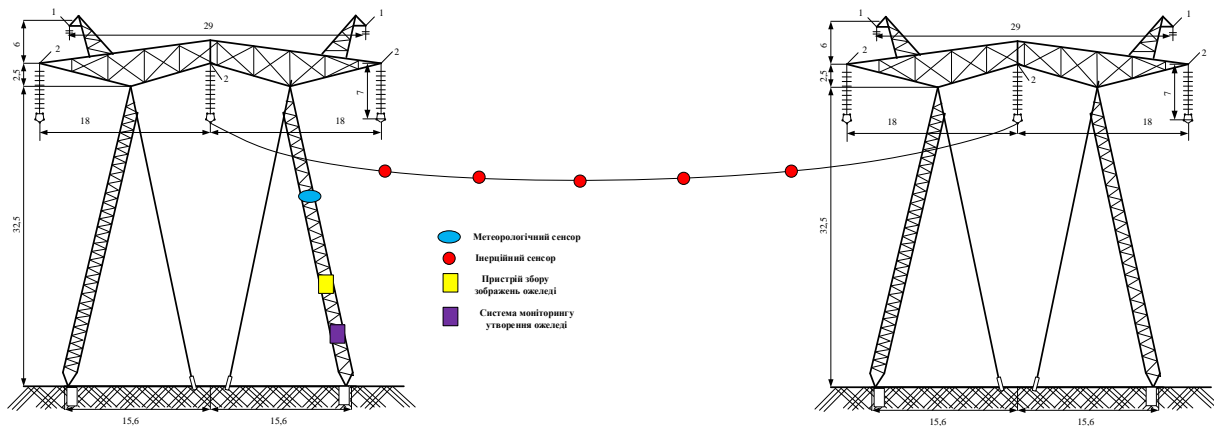


Рис. 5. Схема встановлення пристрою онлайн-контролю танення льоду постійним струмом проводу ЛЕП

Згідно з вимогами випробування ЛЕП на танення льоду, швидкість зовнішнього вітру повинна бути в межах 5 м/с під час випробування, а дані фактичного вимірювання швидкості зовнішнього вітру, що перевищують необхідну швидкість зовнішнього вітру не використовуються. Після кількох порівнянь і зборів даних їх зіставлено між собою. Температура навколишнього середовища вимірювалась в режимі реального часу. Відповідно до вимог випробування мінімальна температура повинна бути в межах необхідної температури танення ожеледі постійним струмом ( $-5^{\circ}\text{C}$ ). До того ж, товщина льоду визначається за допомогою онлайн-відео моніторингу зображень ожеледі, а загальний об'єм льоду визначається шляхом віднімання виміряного об'єму відповідного проводу за допомогою отриманих зображень. Отримані дані, щодо вертикального зміщення середньої точки для різних товщин льоду показані на рис. 6.

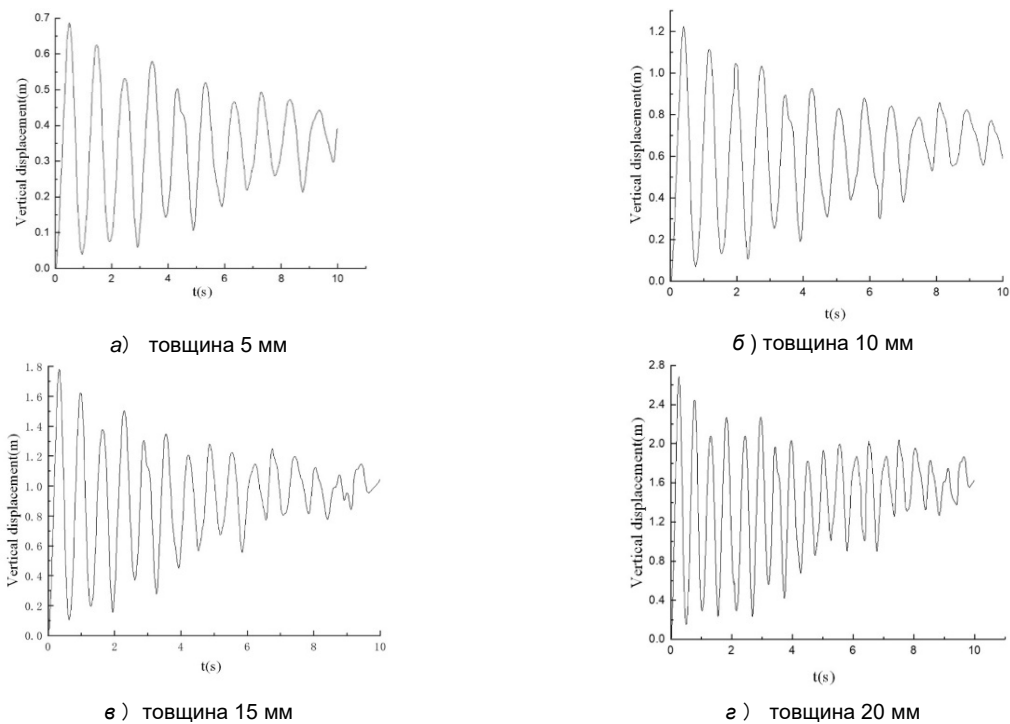


Рис. 6. Результати польових випробувань проводу АС 400/51

### Висновки

Результати, подані на рис. 6, демонструють поступове затухання вібрацій під час танення. Порівнюючи результати, отримані під час польових випробувань та моделюванням, визначено, що результати моделювання, є відносно постійною величиною, але в результаті проведених тестувань встановлено, що мають місце певні вібрації дроту, викликані впливом вітру. За таких умов роль вітрового навантаження має залежність від товщини льоду та етапу його танення, так вітрове навантаження поступово зростає, викликаючи зростання коливання проводу ЛЕП на пізнішому етапі плавлення ожеледі, коли енергія вібрації проводу, отримана від початкового стрибка току плавлення, зменшується.

В статті подано розрахунок розподілу поля температури танення льоду постійного струму в провіднику передавання шляхом обчислення моделі поля електричного, теплового та структурного зв'язку проводу. Сигнали віброзміщення провідника в залежності від товщини льоду та часу плавлення ожеледі отримані за методом моделювання.

Перевірку отриманих шляхом моделювання даних здійснено, шляхом онлайн-моніторингу вібрації. За результатами розрахунків та польових випробувань дійшли висновку, що результати чисельного розв'язання, результати розрахунку моделювання та результати експериментального випробування мають однаковий тренд і закон зміни, а їхня розбіжність не перевищує 10%. Отримані сигнали вібропереміщення під час польових досліджень мають нерівномірне тремтіння кривої, яке поступово збільшується під впливом вітрового навантаження, викликаючи коливання вібрації лінії електропередавання. Для двох різних випробувань проводу максимальний коефіцієнт вертикального зміщення середньої точки становить понад 10% від амплітуди вібрації проводу.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Zou Chenqiao, Peng Ping, Liu Yonggang, and Xu Hao, "Analysis of the Influence of Remanence on the Performance of Current Transformer Caused by DC Ice Melting of Transmission Lines," *Journal of Physics: Conference Series*, no. 2503 (1), 2023.
- [2] Wen Zuopeng, Lou Wenjuan, and Jiang Xiong, "Galloping stability of a 3-DOF conductor model considering inertial coupling and anti-galloping mechanism of inertial mass," *Journal of Vibration Engineering*, no. 35 (4), pp. 1029-1036, 2022.
- [3] S. S. Shovkopylas, A. I. Kryukov, A. Y. Kutuzov, and E. I. Satsuk, "Operation of Current Protection for the Zero Sequence of Overhead Electric Power Transmission Lines Taking the Circuit for Ice Melting on its Lightning-Protection Cables into Account," *Power Technology and Engineering*, no. 56 (2), 2023.
- [4] Wen Zuopeng, and Liang Hong-chao, "Optimization for galloping wind speed control of ultra-high-voltage iced conductors with large span using TTMD," *Journal of Vibration Engineering*, no. 34 (5), pp. 934-942, 2021.



- [5] «Енергетики зафіксували рекордну ожеледь на дротах ЛЕП,» *UA.NEWS*, 15 Січня 2024, [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://ua.news/ua/ukraine/energetiki-zafiksuvali-rekordnu-ozheled-na-drotah-lep> .
- [6] Louis M. Schellenberg, Thomas J. Newton, and Gary R., “Hunt On the rotation of melting ice disks,” *Journal Environmental Fluid Mechanics*, no. 23 (2), 2023.
- [7] Zhu He, et al., “Dynamic response analysis of sub-conductor non-synchronous deicing during DC ice-melting of four-bundle conductor spacer system,” *Journal of Vibration and Shock*, no. 42 (1), pp. 282-291, 2023.
- [8] Zhu He, et al., “DC ice-melting operation of the ground wire based on the characteristic investigation of the thermal structure coupling effect,” *Electric Power Systems Research*, 218, 2023.
- [9] Zhu Gaojia, et al., “Finite formula temperature field calculation technology and its application in the analysis of permanent magnet motor,” [J] *Proceedings of the CSEE*, no. 37 (S1), pp. 152-161, 2017.
- [10] Yang Lei, et al., “Thermotactic habit of gas hydrate growth enables a fast transformation of melting ice,” *Applied Energy*, 331, 2023.
- [11] Wen Yi, et al., “Research on Risk Assessment and Suppression Measures for Ice-Shedding on 500 kV Compact Overhead Lines,” *Energies*, no. 15 (21), 2022.
- [12] Lou Wenjuan, et al., “Jump height of an iced transmission conductor considering joint action of ice-shedding and wind,” *Cold Regions Science and Technology*, 199, 2022.
- [13] Lou Wenjuan, Zhang Yuelong, and Huang Mingfeng, “Study on amplification factor of jump height of crescent-shaped iced transmission conductor following ice shedding under wind action,” *Journal of Vibration and Shock*, no. 41 (21), pp. 272-278, 2022.
- [14] Zhuang Wenbing, et al., “Estimation model of transmission line icing dynamic process based on micrometeorological monitoring,” *Power System Protection and Control*, no. 47 (14), pp. 87-94, 2019.
- [15] Meng Zhigao, “Study on DC ice melting process and model of optical fiber composite overhead ground line (OPGW),” *Chongqing University*, 2017.
- [16] Lu J, et al., “An Analysis of the Reliability of a New Dataset of Transmission Line Icing Thickness in Southern China,” *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, no. 58 (2), 2019.
- [17] Jiazhen Lu, et al., “Low-Harmonic DC Ice-Melting Device Capable of Simultaneous Reactive Power Compensation,” *Energies*, no. 11, pp. 2-17, 2018.
- [18] Tang Rui, “Establishment of the dynamic model of de-icing of transmission line and its application in induced de-icing,” *Jiangsu: Nanjing University of Science and Technology*, 2017.
- [19] Zhu He, Wang Gang, and Guo Xin, “Influences of ice crystal on aerodynamic characteristics of a 3D iced conductor,” *Journal of Vibration and Shock*, no. 40 (1), pp. 212-217, 2021.
- [20] С. Зайцев, В. Кучанський, і І. Гунько, *Підвищення експлуатаційної надійності та ефективності роботи електричних мереж та електроустановок*, моногр. Publishing House «European Scientific Platform», 2021, 156 p., [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://doi.org/10.36074/penereme-monograph.2021> .
- [21] O. Zaitsev and V. V. Kuchanskyu, “Corona discharge problem in extra high voltage transmission line,” in *Systems Decision and Control in Energy II*, Springer, pp. 3-30, 2021.
- [22] V. Kuchanskyu, and I. O. Zaitsev, “Corona Discharge Power Losses Measurement Systems in Extra High Voltage Transmission Lines,” in *2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*, 2020, pp. 48-53. <https://doi.org/10.1109/ESS50319.2020.9160088> .
- [23] I. Zaitsev, A. Levutskyi, and V. Bereznychenko “Hybrid diagnostics systems for power generators faults: systems design principle and shaft run-out sensors,” in “Power systems research and operation: Selected problems,” Kyrylenko O., Zharkin A. and other, Eds., Springer, 2021, pp. 71-98. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-82926-1\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-030-82926-1_4) .
- [24] С. Зайцев, В. Березниченко, С. Закусило, і А. Антоненко, «SMART засоби визначення аварійних станів в розподільних електричних мережах міст,» *Таврійський науковий вісник, серія: Технічні науки*, № 5, с. 3-12, 2022. <https://doi.org/10.32851/tnv-tech.2022.5.1> .
- [25] С. А. Закусило, і С. О. Зайцев, «Використання технології LoRaWAN в системах інформаційного обміну засобів контролю та діагностування енергетичного обладнання,» *Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем керування організаційно-технічними та технологічними комплексами*, матер. X Міжнародної науково-технічної Internet-конференції, 24 листопада 2023., Київ, Україна: НУХТ, 2023, с. 183. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://nuft.edu.ua/naukova-diyalnist/naukovi-konferencii> .

Рекомендована кафедрою електричних станцій та систем ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 7.02.2025

**Кучанський Владислав Володимирович** — канд. техн. наук, старший науковий співробітник, старший дослідник, завідувач відділу оптимізації систем електропостачання, e-mail: [kuchanskiyvladislav@gmail.com](mailto:kuchanskiyvladislav@gmail.com) .

Національна академія наук України Інститут електродинаміки, Київ;

**Зайцев Євген Олександрович** — д-р техн. наук, старший науковий співробітник Національної академії наук України Інституту електродинаміки; завідувач відділу теоретичної електротехніки та діагностики електротехнічного обладнання Центру інформаційно-аналітичного та технічного забезпечення моніторингу об'єктів атомної енергетики Національної академії наук України, Київ;

**Коваленко Олександр Миколайович** — аспірант кафедри публічного адміністрування Міжрегіональної Академії Управління персоналом; молодший науковий співробітник відділу технологій захисту довкілля та радіаційної безпеки.

Центр інформаційно-аналітичного та технічного забезпечення моніторингу об'єктів атомної енергетики Національної академії наук України, Київ

V. V. Kuchanskyy<sup>1</sup>  
Ye. O. Zaitsev<sup>1,2</sup>  
O. M. Kovalenko<sup>2</sup>

## Analysis of Vibrations of Overhead Power Lines During Ice Melting with Direct Current

<sup>1</sup>National Academy of Sciences of Ukraine Institute of Electrodynamics, Kyiv;

<sup>2</sup>Center for Information-analytical and Technical Support of Nuclear Power Facilities Monitoring of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

*The article analyzes the relationship between the ice melting current, temperature distribution and vibration of overhead power line wires, which is based on the use of the series connection method to obtain the connection equation between the electrical and thermal energy released during the process of melting ice on wires with a direct current. Usually, in the case of calculating ice melting modes, the problem of choosing such a melting current value is solved, at which, under given meteorological conditions, ice will be removed in a given time. For a specific ice melting scheme, such a current remains practically unchanged for all weather conditions, therefore, there is always a fear that the current value in this scheme may be insufficient for successful ice melting under certain unfavorable, but possible ice wall thickness, wind speed and ambient temperature. The article, based on the refined model of ice melting, considers the method of determining the actual range of meteorological conditions under which, for a given current value, successful ice melting is ensured. Usually, in the case of calculating ice melting modes, the problem of choosing such a melting current value is solved, at which, under given meteorological conditions, the ice will melt in a given time. Such a formulation of the problem is suitable for overhead lines equipped with special ice melting installations with an adjustable current value. provided that the ice melting current in all weather conditions does not exceed the permissible value. For overhead lines that do not have such installations, the ice melting current is not regulated, its value must be chosen taking into account a number of restrictions (mechanical strength of wires, power supply capacity, ice melting power scheme, length of the ice melting zone, etc.). Experience in operating electric networks shows that ice-wind accidents on overhead lines are among the most severe, and can disrupt the power supply of large economic areas of the regions of Ukraine. The issue of preventing ice-wind accidents on overhead lines is also relevant for main electric networks. It should be noted the significant economic damage from ice-wind accidents on the Western electric power system in the autumn-winter periods: 2004—2005, 2010—2011 and 2012—2013.*

**Keywords:** ice formation, overhead power line, ice melting by direct current, vibration characteristics.

**Kuchanskyy Vladyslav V.** — Cand. Sc. (Eng.), Senior Researcher, Head of the Department of Power-Supply Systems Optimization, e-mail: kuchanskiyvladislav@gmail.com ;

**Zaitsev Yevhen O.** — Dr. Sc. (Eng.), Senior Researcher, Head of the Department of Theoretical Electrical Engineering and Diagnostics of Electrical Equipment of Center for Information-analytical and Technical Support of Nuclear Power Facilities Monitoring of the National Academy of Sciences of Ukraine;

**Kovalenko Olexandr M.** — Post-Graduate Student of the Chair of Public Administration Interregional Academy of Personnel Management; Junior Researcher of the Department of Environmental Protection Technologies and Radiation Safety of Center for Information-analytical and Technical Support of Nuclear Power Facilities Monitoring of the National Academy of Sciences of Ukraine