

УДК 621.315.1

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2024.68.075>

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ МОНІТОРИНГУ ВІДКЛАДЕНЬ ОЖЕЛЕДІ ТА ЗМІНИ СТІЛИ ПРОВИСАННЯ ПРОВІДІВ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ

Т.Л. Кацадзе, канд. техн. наук, **Н.В. Буслова**, канд. техн. наук, **К.М. Новіков**, **А.Д. Ніколаєва**
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
пр. Берестейський, 37, Київ, 03056, Україна
e-mail: teymuraz@ukr.net

Представлено результати дослідження проблеми моніторингу стану проводу повітряної лінії електропередавання. Проаналізовано відомі підходи до формування пристрою моніторингу стріли провисання та відкладень ожеледі на проводах лінії. Показано, що один з найперспективніших підходів базується на вимірюванні кута нахилу кривої провисання проводу поблизу точки його закріплення на опорі. Показано, що однозначне співвідношення між кутом нахилу кривої провисання та стрілою провисання проводу дозволяє організувати непряме вимірювання робочої температури проводу за умови відсутності відкладень ожеледі. Показано, що облаштування пристрою моніторингу датчиком температури дозволить здійснювати контроль ваги відкладень ожеледі і, у разі необхідності, видавати сигнал для організації протиожеледних заходів. Модифікація пристрою з триосьовим гіроскопічним датчиком дозволяє додатково реалізувати моніторинг вітрового натиску на проводи повітряної лінії. В роботі представлено математичні моделі для вирішення зазначених задач моніторингу стану проводу. Бібл. 9, рис. 4.

Ключові слова: повітряна лінія електропередавання, моніторинг стану проводу, стріла провисання, відкладення ожеледі.

Вступ. До сучасних систем передачі та розподілу електричної енергії висувають жорсткі вимоги щодо надійності та безперебійності роботи. Аварійні відключення устаткування електричних мереж можуть призвести до недовідпустки електричної енергії та відповідних економічних збитків. Одним з найуразливіших елементів електричних мереж є повітряні лінії електропередавання, які зазнають активного впливу оточуючого середовища. Атмосферні явища – вітер та відкладення ожеледі на проводах – зумовлюють збільшення навантаження на конструктивні елементи лінії та можуть призвести до обриву проводів та інших аварійних випадків в процесі експлуатації повітряних ліній електропередавання. Тому актуальною науково-технічною задачею залишається проблема моніторингу відкладень ожеледі та стріли провисання проводу з метою попередження виникнення недопустимих ожеледно-вітрових навантажень на проводи повітряних ліній.

Крім того, слід зважати та те, що стріла провисання проводу визначає зарядну ємність електропередачі і її зміна в процесі експлуатації повітряної лінії впливає на баланс реактивної потужності в магістральних електричних мережах, ємнісну складову струмів короткого замикання тощо [1]. Тому моніторинг стріли провисання проводу дозволить організувати ефективну компенсацію надлишкової зарядної потужності електропередач надвисокої номінальної напруги, створюючи саморегульовану систему адаптивних електропередач, забезпечуючи гнучкість електричної системи, збільшення пропускної здатності магістральної мережі, раціональне регулювання напруги в електричній системі тощо. Урахування зміни ємнісної складової струмів короткого замикання дозволить збільшити точність визначення місця аварії та зменшити показники надійності SAIDI та SAIFI для розподільних електричних мереж.

Мета роботи полягає у розробці математичних моделей та алгоритмів роботи основного блоку пристрою моніторингу відкладень ожеледі та стріли провисання проводу повітряної лінії електропередавання.

Матеріали дослідження. До основних вимог до конструктивного виконання пристрою моніторингу відкладень ожеледі та стріли провисання проводів повітряної лінії слід віднести конструктивну надійність та точність вимірювань, простоту виконання та економічність.



Зазначимо, що задача моніторингу стану проводу повітряної лінії не нова, на теперішній час відомо багато підходів до методів вимірювання провисання проводу в систем моніторингу стану проводу [2–4]. Такі методи поділяють на прямі та непрямі. До прямих слід віднести методи безпосереднього вимірювання провисання проводу та відкладень ожеледі із застосуванням лазерних сканерів, засобів комп'ютерного зору, GPS-датчиків тощо. Непрямі методи базуються на співвідношеннях між стрілою провисання проводу та механічними, термічними, електричними або магнітними параметрами повітряної лінії. Такі методи передбачають розрахунок провисання проводу за результатами вимірювань напруження проводу, кута нахилу кривої провисання проводу, робочої температури та струму, різниці атмосферного тиску в точці закріплення проводу та в нижній точці провисання, напруження магнітного поля у поверхні землі під проводом, частоти власних коливань проводу тощо. Один з найпростіших і водночас точних і надійних методів визначення провисання проводу базується на вимірюванні кута нахилу кривої провисання проводу біля точки закріплення на опорі [5–8].

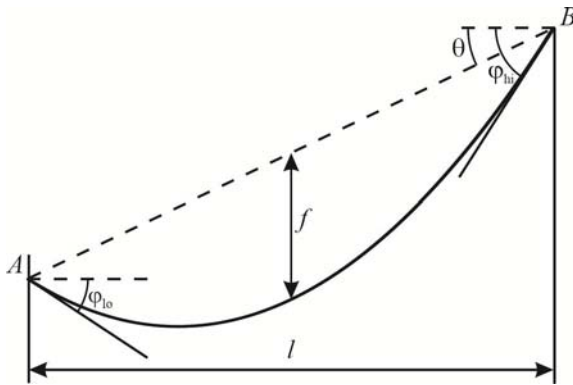


Рис. 1. Вимірювання кута нахилу кривої провисання проводу біля точки закріплення на опорі

Застосування даного методу проілюстровано на рис. 1, де A, B – точки закріплення проводу на «нижній» та «верхній» опорах відповідно; θ – кут, який утворює з горизонталлю пряма, що поєднує точки закріплення проводу на суміжних опорах; $\varphi_{lo}, \varphi_{hi}$ – кути нахилу дотичних до кривої провисання проводу біля точок закріплення на «нижній» та «верхній» опорах відповідно; l – довжина прогону; f – стріла провисання посередині прогону.

За відсутності перепаду висоти точок закріплення проводу на суміжних опорах прогону тангенс кута нахилу дотичної до кривої провисання проводу визначається виразом

$$\tan[\varphi] = \text{Sinh}\left[\frac{\gamma l}{2\sigma}\right] = \text{Sinh}\left[\frac{4f}{l}\right], \quad (1)$$

де γ – питоме вертикальне навантаження, яке зазнає провід; σ – напруження проводу в нижній точці провисання; l – довжина прогону; f – стріла провисання.

З виразу (1) впливає співвідношення між стрілою провисання та кутом дотичної в точці закріплення проводу на опорі:

$$f = \frac{l}{4} \text{ArcSinh}[\tan[\varphi]], \quad (2)$$

За наявності перепаду висоти точок закріплення проводу в прогоні вираз (2) визначає співвідношення між кутом нахилу дотичної до кривої провисання проводу та стрілою провисання великого або малого еквівалентного прогонів відповідно до місця встановлення датчику біля точки закріплення проводу на «верхній» або «нижній» опорі відповідно. У разі розташування датчику біля точки закріплення проводу на «верхній» опорі стріла провисання проводу визначається виразом

$$\begin{aligned} f &= \frac{l}{4} \left(\text{ArcSinh}[\tan[\varphi_{hi}]] - 2 \tan[\theta] \right) + \frac{\sigma}{\gamma} \left(1 + \frac{1}{2} \text{ArcSinh}[\tan[\varphi_{hi}]] \tan[\theta] - \text{Cosh}[\tan[\theta]] \right) = \\ &= \frac{l}{8} \left(\text{ArcSinh}[\tan[\varphi_{hi}]] - 2 \tan[\theta] + \sqrt{\text{ArcSinh}[\tan[\varphi_{hi}]]^2 + 4 \tan[\theta]^2 + 8(1 - \text{Cosh}[\tan[\theta]])} \right), \end{aligned} \quad (3)$$

де φ_{hi} – кут нахилу дотичної до кривої провисання проводу біля точки закріплення на «верхній» опорі; θ – кут, який утворює з горизонталлю пряма, що поєднує точки закріплення проводу на суміжних опорах.

Своєю чергою, у разі розташування датчика біля точки закріплення проводу на «нижній» опорі вираз для визначення стріли провисання проводу набуває вигляду

$$f = \frac{l}{4} \left(\text{ArcSinh}[\text{Tan}[\varphi_{lo}]] + 2 \text{Tan}[\theta] \right) - \frac{\sigma}{\gamma} \left(1 + \frac{1}{2} \text{ArcSinh}[\text{Tan}[\varphi_{lo}]] \text{Tan}[\theta] - \text{Cosh}[\text{Tan}[\theta]] \right) = \quad (4)$$

$$= \frac{l}{8} \left(\text{ArcSinh}[\text{Tan}[\varphi_{lo}]] + 2 \text{Tan}[\theta] + \sqrt{\text{ArcSinh}[\text{Tan}[\varphi_{lo}]]^2 + 4 \text{Tan}[\theta]^2 - 8(1 - \text{Cosh}[\text{Tan}[\theta]])} \right),$$

де φ_{lo} – кут нахилу дотичної до кривої провисання проводу біля точки закріплення на «нижній» опорі.

Для типових прогонів завдовжки до 800 м вирази (2) – (4) можна спростити та подати у вигляді

$$f = \frac{l}{4} \text{Tan}[\varphi] \quad (5)$$

за відсутності перепаду висоти точок закріплення проводу;

$$f = \frac{l}{2} \left(\frac{\text{Tan}[\varphi_{hi}]}{2} - \text{Tan}[\theta] \right) + \frac{\sigma}{2\gamma} \text{Tan}[\theta] (\text{Tan}[\varphi_{hi}] - \text{Tan}[\theta]) = \frac{l}{4} (\text{Tan}[\varphi_{hi}] - \text{Tan}[\theta]) \quad (6)$$

у разі розташування датчика поблизу точки закріплення проводу на «верхній» опорі;

$$f = \frac{l}{2} \left(\frac{\text{Tan}[\varphi_{lo}]}{2} + \text{Tan}[\theta] \right) - \frac{\sigma}{2\gamma} \text{Tan}[\theta] (\text{Tan}[\varphi_{lo}] - \text{Tan}[\theta]) = \frac{l}{4} (\text{Tan}[\varphi_{lo}] + \text{Tan}[\theta]) \quad (7)$$

у разі розташування датчика поблизу точки закріплення проводу на «нижній» опорі.

На рис. 2 представлені залежності кута нахилу датчика від стріли провисання проводу в прогонах повітряної лінії 100–450 м. З рис. 2 випливає, що взаємна залежність кута нахилу датчика та стріли провисання близька до лінійної. Із збільшенням довжини прогону, очевидно, зменшується кут нахилу проводу. Відповідно до представлених даних збільшення стріли провисання на 1 м зумовлює зміну кута нахилу проводу приблизно на 2° в прогоні завдовжки 100 м та приблизно на $0,5^\circ$ в прогоні довжиною 450 м.

У роботі [8] показано, що зміну стріли провисання проводу у прогоні моделює рівняння стану проводу у формі

$$\frac{8E}{3l^2} (f^2 - f_0^2) - \frac{l^2}{8} \left(\frac{\gamma}{f} - \frac{\gamma_0}{f_0} \right) = \alpha E (t - t_0), \quad (8)$$

де l – довжина прогону; α – температурний коефіцієнт лінійного здовження проводу; E – модуль пружності проводу; f, f_0 – стріли провисання в поточному та вихідному режимах; γ, γ_0 – питома навантаження, яке зазнає провід в поточному та вихідному режимах; t, t_0 – робоча температура проводу в поточному та вихідному режимах відповідно.

Зазначимо, що як вихідний режим проводу можна обирати будь-який режим, параметри якого (робоча температура проводу, питома навантаження та стріла провисання) відомі заздалегідь.

Якщо провід зазнає навантаження виключно від власної ваги, тобто за відсутності відкладень ожеледі на проводі вираз (8) дозволяє сформулювати співвідношення між кутом нахилу кривої провисання робочою температурою проводу. За відсутності перепаду висоти точок закріплення проводу на суміжних опорах з урахуванням (5) таке співвідношення має вигляд

$$t = t_0 + \frac{1}{\alpha} \left(\frac{\gamma_1}{E} \frac{l}{2} \left(\frac{l}{4f_0} - \text{Cot}[\varphi] \right) + \frac{\text{Tan}[\varphi]^2}{6} - \frac{8}{3} \left(\frac{f_0}{l} \right)^2 \right), \quad (9)$$

де γ_1 – питома навантаження від власної ваги проводу.

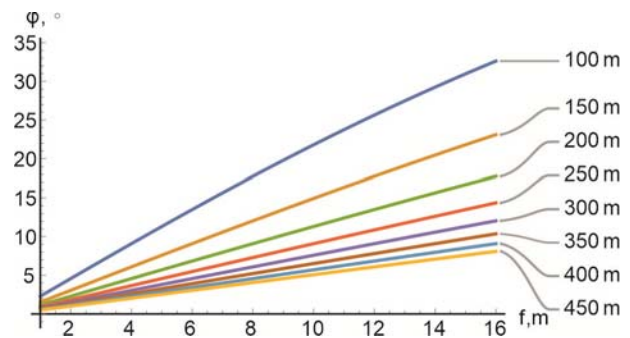


Рис. 2. Залежності кута нахилу датчика від стріли провисання проводу в прогонах повітряної лінії 100–450 м

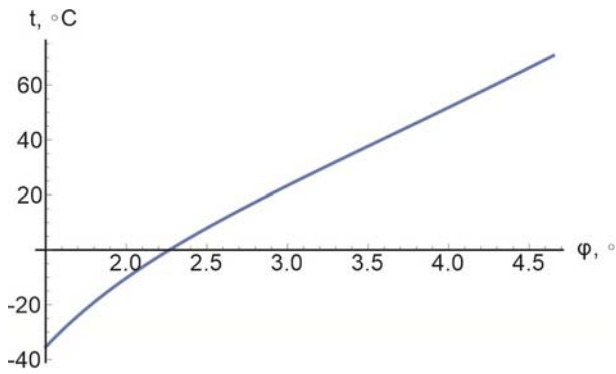


Рис. 3. Взаємна залежність робочої температури проводу та кута нахилу кривої провисання в прогоні завдовжки 200 м типової повітряної лінії

Якщо прилад моніторингу стану проводу додатково оснастити датчиком температури, з'являється можливість організувати контроль відкладень ожеледі на проводах повітряної лінії. Дійсно, з (8) впливає залежність

$$\gamma = \frac{f}{f_0} \left(\gamma_0 + \frac{8f_0}{l^2} \left(\frac{8E}{3l^2} (f^2 - f_0^2) - \alpha E (t - t_0) \right) \right). \quad (10)$$

Вагу відкладень ожеледі на одиницю довжини проводу можна визначити за виразом

$$p_{\text{ice}} = \frac{f}{f_0} \left(\gamma_0 + \frac{8f_0}{l^2} \left(\frac{8E}{3l^2} (f^2 - f_0^2) - \alpha E (t - t_0) \right) \right) F - gM_0, \quad (11)$$

де F – розрахунковий переріз проводу; M_0 – погонна маса проводу; g – прискорення вільного падіння.

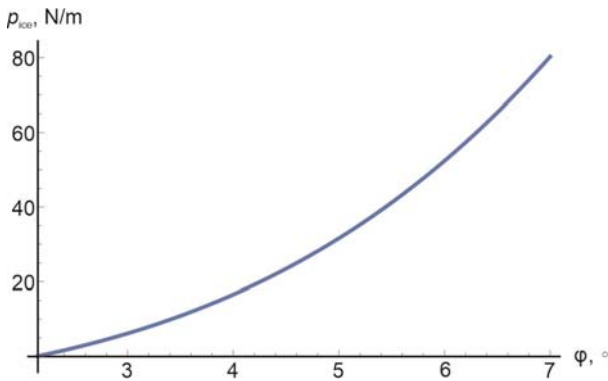


Рис. 4. Залежність ваги відкладень ожеледі від кута нахилу кривої провисання в прогоні завдовжки 200 м типової повітряної лінії

На рис. 3 представлена взаємна залежність робочої температури проводу та кута нахилу кривої провисання в прогоні завдовжки 200 м типової повітряної лінії напругою 110 кВ, виконаної проводом марки АС-240/32. Аналіз інформації, наведеної на рис. 3 свідчить про нелінійний характер залежності робочої температури проводу від кута нахилу кривої провисання. Разом з тим в області робочих температур $+20^\circ\text{C}$ та більше асимптотично наближається до лінійної. При цьому зміна кута нахилу кривої провисання проводу на 1° відповідає зміні робочої температури приблизно на 30°C .

На рис. 4 представлено залежність ваги відкладень ожеледі від кута нахилу кривої провисання в прогоні завдовжки 200 м типової повітряної лінії напругою 110 кВ, виконаної проводом марки АС-240/32.

Таким чином, у разі, коли вага відкладень ожеледі досягає певного критичного значення пристрій має подавати сигнал щодо організації заходів боротьби з відкладенням ожеледі, наприклад, топлення ожеледі. Очевидно, що контроль відкладень ожеледі за виразом (11) слід виконувати в діапазоні низьких температур, за яких спостерігаються відкладення ожеледі.

Модифікація пристрою із встановленням триосьового гіроскопічного датчика

дозволить здійснювати моніторинг вітрового навантаження, відхилення площини провисання проводу від вертикалі та взаємного наближення фазних проводів лінії. Для розв'язання такої задачі слід визначати вертикальну та горизонтальну проекції стріли провисання проводу, відхиленого під натиском вітру. Наприклад, за відсутності перепаду висоти точок закріплення проводу на суміжних опорах проекції стріли провисання визначаються виразами

$$f_{\text{ver}} = \frac{l}{4} \text{AcrSinh}[\text{Tan}[\varphi_{\text{ver}}]]; \quad f_{\text{hor}} = \frac{l}{4} \text{AcrSinh}[\text{Tan}[\varphi_{\text{hor}}]], \quad (12)$$

де φ_{ver} , φ_{hor} – кути нахилу кривої провисання проводу у вертикальній та горизонтальній площині.

Для такого режиму навантаження від натиску вітру на одиницю довжини проводу слід визначати за виразом

$$P_{\text{wind}} = \sqrt{\left(\frac{f'}{f_0} \left(\gamma_0 + \frac{8f_0}{l^2} \left(\frac{8E}{3l^2} (f'^2 - f_0^2) - \alpha E (t - t_0) \right) \right) F \right)^2 - (gM_0)^2}. \quad (13)$$

У формулі (13) f' – стріла провисання проводу на відхиленій під натиском вітру площині:

$$f' = \frac{l}{8} \frac{\sqrt{2 - \text{Cos}[2(\varphi_{\text{ver}} - \varphi_{\text{hor}})] - \text{Cos}[2(\varphi_{\text{ver}} + \varphi_{\text{hor}})]}}{\text{Cos}[\varphi_{\text{ver}}] \text{Cos}[\varphi_{\text{hor}}]}. \quad (14)$$

Відповідно до необхідності безперервного моніторингу стріли провисання проводу можна передбачити два алгоритми функціонування пристрою. Перший алгоритм передбачає роботу пристрою тільки в температурних режимах утворення ожеледі, другий алгоритм передбачає постійний моніторинг стріли провисання проводу та моніторинг відкладень ожеледі за умови, коли температура повітря знаходиться в діапазоні утворення ожеледі.

Зазначимо, що запропонований прототип пристрою може виконувати додаткові моніторингові функції, наприклад, відслідковувати виникнення вібрації та галопування проводів.

Висновки.

1. Жорсткі вимоги до забезпечення надійності передачі та розподілу електричної енергії зумовлюють актуальність проблеми моніторингу стану проводу повітряної лінії для попередження виникнення аварійних ситуацій, обумовлених екстремальними кліматичними навантаженнями та впливами. Результати такого моніторингу додатково дозволяють організувати коригування електричних параметрів електропередач відповідно до поточних експлуатаційних умов та забезпечити формування адаптивної саморегульованої електричної мережі.
2. Серед широкого спектру відомих підходів до вирішення задачі моніторингу стану проводу повітряної лінії вимогам простоти, надійності, точності та економічності відповідає метод вимірювання кута нахилу провисання проводу поблизу точки його закріплення на опорі. Однозначне співвідношення між кутом нахилу та стрілою провисання проводу дозволяє побудувати пристрій моніторингу, основним елементом якого є гіроскопічний датчик.
3. Запропоновані математичні моделі дозволяють організувати безперервний моніторинг стану проводу повітряної лінії, зокрема визначати поточне значення стріли провисання, робочої температури проводу, ваги відкладень ожеледі та вітрового натиску на провід.
4. В ідеальному випадку за умови рівномірного розподілу навантаження вздовж проводу, очевидно, достатньо встановлювати один пристрій на кожній фазній конструкції в межах анкерованої ділянки. Проте, з урахуванням нерівномірності відкладень ожеледі та поривів вітру кількість пристроїв необхідно збільшувати, що потребує проведення додаткових досліджень щодо оптимізації (мінімізації) необхідної кількості пристроїв.
5. Робота пристрою буде ефективнішою, якщо організувати канали передачі інформації оператору системи. До того ж, урахування особливостей провисання проводу за нерівномірного відкладення ожеледі, потребує організації певної координації інформації, отриманої від пристроїв, встановлених на проводах однієї фази в межах анкерованої ділянки.

1. Кацадзе Т.Л. та ін. Визначення зарядної ємності лінії електропередавання з урахуванням провисання проводу. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2024. Вип. 67. С. 39–47. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2024.67.039>
2. IEEE Standard 524 -2016. IEEE guide for the installation of overhead transmission line conductor. Official edition. NY: Piscataway, 2016. 160 p.
3. Measurement and monitoring of overhead transmission line sag in smart grid: A review / A. U. Mahin et al. *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1049/gtd2.12271> (date of access: 27.03.2024).
4. Chen Y., Ding X. A survey of sag monitoring methods for power grid transmission lines. *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1049/gtd2.12778> (date of access: 27.03.2024).

5. Research on Sag Online Monitoring System for Power Transmission Wire Based on Tilt Measurement / X. Xiao et al. *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*. 2013. Vol. 2, No. 1. Pp. 6–11. DOI: <https://doi.org/10.12720/sgce.2.1.6-11> (date of access: 27.03.2024).
6. Research on the Continuous Monitoring of the Sag of Overhead Electricity Transmission Cables Based on the Measurement of their Slope / D. Sacerdotianu et al. *2018 International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE)*. 2018. Pp. 1–5.
7. Malhara S., Vittal V. Mechanical State Estimation of Overhead Transmission Lines Using Tilt Sensors. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2010. Vol. 25, No. 3. Pp. 1282–1290. DOI: <https://doi.org/10.1109/tpwrs.2009.2038703> (date of access: 27.03.2024).
8. Power line sag monitor: patent US6205867B1 United States: G01C9/00. Published on 27.03.2003. 12 p.
9. Кацадзе Т.Л. Основи механічних розрахунків повітряних ліній електропередавання. Підручник. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во "Політехніка", 2019. 336 с.

MATHEMATICAL MODELS FOR MONITORING ICE-COATING AND SAGGING ON OVERHEAD TRANSMISSION POWER LINES

T. Katsadze, N. Buslova, K. Novikov, A. Nikolaeva

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»,

Beresteiskiy ave., 37, Kyiv, 03056, Ukraine

e-mail: teymuraz@ukr.net

The paper presents the results of studying the problem of monitoring the condition of an overhead power line wire. The known approaches to the formation of a device for monitoring the sagging boom and ice-coating on the line wires are analysed. It is shown that one of the most promising approaches is based on measuring the angle of inclination of the wire sagging curve near the point of its fixation on the support. It is shown that an unambiguous correlation between the slope angle of the sagging curve and the wire sagging arrow allows for an indirect measurement of the operating temperature of the wire in the absence of ice deposits. It has been shown that equipping the monitoring device with a temperature sensor will allow monitoring the weight of ice-coating and, if necessary, issuing a signal for organising anti-icing measures. Modification of the device with a three-axis gyroscopic sensor allows for additional monitoring of wind pressure on overhead line wires. The paper presents mathematical models for solving these problems of monitoring the condition of the wire.

Keywords: overhead power line, wire condition monitoring, sag monitoring, ice-coating monitoring.

1. Katsadze T. et al. Determination Of The Overhead Power Lines Charging Capacitance Taking In Account The Cable Sagging. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky NAN Ukrainy*. 2024. Vol. 67. Pp. 39–47. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2024.67.039> (Ukr)
2. IEEE Standard 524 -2016. IEEE guide for the installation of overhead transmission line conductor. Official edition. NY: Piscataway, 2016. 160 p.
3. Measurement and monitoring of overhead transmission line sag in smart grid: A review. A. U. Mahin et al. *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1049/gtd2.12271> (date of access: 27.03.2024).
4. Chen Y., Ding X. A survey of sag monitoring methods for power grid transmission lines. *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1049/gtd2.12778> (date of access: 27.03.2024).
5. X. Xiao et al. Research on Sag Online Monitoring System for Power Transmission Wire Based on Tilt Measurement *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*. 2013. Vol. 2, No. 1. Pp. 6–11. DOI: <https://doi.org/10.12720/sgce.2.1.6-11> (date of access: 27.03.2024).
6. D. Sacerdotianu et al. Research on the Continuous Monitoring of the Sag of Overhead Electricity Transmission Cables Based on the Measurement of their Slope. *2018 International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE)*. 2018. Pp. 1–5.
7. Malhara S., Vittal V. Mechanical State Estimation of Overhead Transmission Lines Using Tilt Sensors. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2010. Vol. 25, No. 3. Pp. 1282–1290. DOI: <https://doi.org/10.1109/tpwrs.2009.2038703> (date of access: 27.03.2024).
8. Power line sag monitor : patent US6205867B1 United States : G01C9/00. Published on 27.03.2003. 12 p.
9. Katsadze T. Fundamentals of mechanical calculations of overhead power lines: Handbook. Kyiv: KPI im. Ihoria Sikorskoho, Politehnika, 2019. 336 p. (Ukr)

Надійшла: 20.08.2024

Прийнята: 27.08.2024

Submitted: 20.08.2024

Accepted: 27.08.2024