

Н.В. КРЮКОВА, В.С. МАРКОВ, Є.В. ГОНЧАРОВ, І.В. ПОЛЯКОВ

ПОРІВНЯННЯ МЕТОДІВ МОНІТОРИНГУ ОЖЕЛЕДІ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ ТА ОГЛЯД ВИМІРЮВАЛЬНОЇ АПАРАТУРИ, ЩО ВИКОРИСТОВУЄТЬСЯ ДЛЯ ДІАГНОСТИКИ ТАКИХ ЛІНІЙ

Низька конструкційна надійність повітряних ліній, обумовлена безперервним кліматичним впливом, стає причиною аварій електричних мереж та ненадійного електропостачання. Забезпечення безаварійної експлуатації повітряних ліній є складним завданням, вирішення якого має найважливіше значення для нормального функціонування всієї інфраструктури. В осінньо-зимовий період складні метеорологічні умови практично повністю виключають швидке завершення ремонтних робіт. Досить велика частка аварій виникає при формуванні намерзлої криги на проводах та грозозахисних тросах. На сьогодні основним способом діагностики намерзлої криги залишаються візуальні огляди високовольтних ліній електропередачі. Необхідно на практиці застосовувати оснащення повітряних ліній пристроями телеметрії крижаних навантажень, що дозволить в режимі реального часу контролювати формування криги на проводах. У сучасних пристроях для моніторингу ожеледі використовуються наступні методи діагностики: тензометричний, волоконно-оптичний, аеродинамічний, локаційний та інструментально-параметричний. Тензометричний метод діагностики реалізується за допомогою прямого виміру крижаного навантаження на провід з подальшим порівнянням вимірених величин з наперед заданими значеннями порогових навантажень. Для реалізації цього методу діагностики застосовують магнето-пружні сило-вимірні датчики. Такий датчик під'єднаний між траверсою П-подібної опори і верхнім кінцем відповідної гірлянди ізоляторів з фазним проводом. Окремо проводять вимірювання крижаного, вітрового та крижано-вітрового навантажень. Цей метод має обмежену сферу застосування, а саме для діагностики утворення ожеледі на фазних проводах проміжних прольотів одно-ланцюгових ліній з двостійковими П-подібними опорами. В системах контролю об'єктів у важких умовах експлуатації, на атомних електростанціях реалізується волоконно-оптичний метод тензометричних вимірювань. Датчик механічного зусилля (волоконно-оптичний датчик деформації) реалізує волоконно-оптичний метод тензометричних вимірювань. Волоконно-оптичні датчики деформації відрізняються високою точністю через стійкість до перешкод та складністю виконання.

Ключові слова: аварій електричних мереж, повітряні лінії, діагностика, високовольтні лінії електропередачі, методи діагностики.

N. V. KRYUKOVA, V. S. MARKOV, Ye. V. HONCHAROV, I. V. POLYAKOV

COMPARISON OF METHODS FOR MONITORING ICING OF HIGH-VOLTAGE POWER LINES AND AN OVERVIEW OF MEASURING EQUIPMENT USED TO DIAGNOSE SUCH LINES

The low structural reliability of overhead lines, due to continuous climatic influence, becomes the cause of electrical network accidents and unreliable power supply. Ensuring the trouble-free operation of overhead lines is a complex task, the solution of which is of the utmost importance for the normal functioning of the entire infrastructure. In the autumn-winter period, difficult weather conditions almost completely exclude the quick completion of repair works. A fairly large share of accidents occurs during the formation of icy deposits on wires and lightning protection cables. Today, visual inspections of high-voltage power lines remain the main way of diagnosing icy deposits. In practice, it is necessary to equip overhead lines with ice load telemetry devices, which will allow monitoring the formation of ice deposits on wires in real time. The following diagnostic methods are used in modern ice monitoring devices: strainometric, fiber-optic, aerodynamic, locational, and instrumental-parametric. The tensiometric method of diagnosis is implemented by means of direct measurement of the icy load on the wire with subsequent comparison of the measured values with predetermined values of the threshold loads. To implement this diagnostic method, magnetoelastic force measuring sensors are used. Such a sensor is connected between the traverse of the U-shaped support and the upper end of the corresponding garland of insulators with a phase wire. Ice, wind and ice-wind loads are measured separately. This method has a limited scope of application, namely for diagnosing the formation of ice on the phase wires of intermediate spans of single-circuit lines with two-post U-shaped resistances. The fiber-optic method of strain gauge measurements is implemented in object control systems under difficult operating conditions, at nuclear power plants. The mechanical effort sensor (fiber-optic strain sensor) implements the fiber-optic method of strain measurement. Fiber-optic strain sensors are characterized by high accuracy due to resistance to interference and complexity of execution.

Keywords: electrical network accidents, overhead lines, diagnosing, high-voltage power lines, diagnostic methods.

Актуальність. Низька конструкційна надійність повітряних ліній, обумовлена безперервним кліматичним впливом, стає причиною аварій електричних мереж та ненадійного електропостачання.

Забезпечення безаварійної експлуатації повітряних ліній є складним завданням, вирішення якого має найважливіше значення для нормального функціонування всієї енергетичної інфраструктури. В осінньо-зимовий період складні метеорологічні умови практично повністю виключають швидке завершення ремонтних робіт. Досить велика частка аварій виникає при формуванні намерзлої криги на проводах та грозозахисних тросах.

В теперішній час основним способом діагностики крижаних утворень залишаються візуальні огляди високовольтних ліній електропередачі. Необхідно на практиці застосовувати оснащення повітряних ліній пристроями телеметрії механічних навантажень у вигляді ожеледі, що дозволить в режимі реального часу контролювати формування криги на проводах.

Аналіз методів діагностики. У сучасних пристроях для моніторингу ожеледі використовуються наступні методи діагностики: тензометричний, волоконно-оптичний, аеродинамічний, локаційний та інструментально-параметричний.

Тензометричний метод діагностики реалізується за допомогою прямого виміру крижаного навантаження на провід з подальшим порівнянням вимірених величин з наперед заданими значеннями порогових навантажень. Для реалізації цього методу діагностики застосовують магнето-пружні сило-вимірні датчики. Такий датчик під'єднаний між траверсою П-подібної опори і верхнім кінцем відповідної гірлянди ізоляторів з фазним проводом. Окремо проводять вимірювання крижаного, вітрового та крижано-вітрового навантажень.

Цей метод має обмежену сферу застосування, а саме його використовують тільки для діагностики утворення ожеледі на фазних проводах проміжних

© Н.В. Крюкова, В.С. Марков, Є.В. Гончаров, І.В. Поляков, 2023

прольотів одно-ланцюгових ліній з двостійковими П-подібними опорами.

В системах контролю об'єктів у важких умовах експлуатації, на атомних електростанціях реалізується волоконно-оптичний метод тензометричних вимірювань. Датчик механічного зусилля (волоконно-оптичний датчик деформації) реалізує волоконно-оптичний метод тензометричних вимірювань. Волоконно-оптичні датчики деформації відрізняються високою точністю через стійкість до перешкод та складністю виконання. Метод, опитування на основі лазера, який налаштовується у процесі роботи, відрізняється великою вартістю. Значно дешевші методи опитування у волоконно-оптичних датчиках потребують стабілізацію фільтрів та мають не дуже велику точність.

Аеродинамічний метод діагностики полягає в тому, що на проміжному прольоті лінії одночасно вимірюються напрямок вітру, швидкість вітру і величина фактичного вітрового навантаження на провід з крижаними утвореннями або без них. Після цього за вимірними швидкістю і напрямком вітру розраховується величина очікуваного вітрового навантаження на провід без утворень і виконується її порівняння з величиною фактичного вітрового навантаження. Якщо фактичне вітрове навантаження більше очікуваного, то фіксується наявність на проводі крижаних утворень; якщо фактичне та очікуване вітрові навантаження рівні, то робиться висновок про відсутність криги. Для реалізації цього методу діагностики використовують вимірвачі швидкості і напрямку вітру, а також тензометричні датчики. Кожен з датчиків підвішений між траверсою опори і верхнім кінцем відповідної гірлянди ізоляторів. Недоліком цього методу є складний монтаж.

Локаційний метод діагностики залежить від подачі імпульсного сигналу в контрольовану лінію та визначення сумарного часу, витраченого на його поширення вздовж проводів у прямому та зворотному напрямку після відбиття від кінця лінії. Метод дозволяє визначити наявність крижаних утворень на проводах та їх величину шляхом порівняння часу розповсюдження сигналів або шляхом порівняння амплітуд відбитих сигналів. Наявність крижаних утворень зменшує швидкість поширення сигналу вздовж лінії та викликає його додаткове згасання, затухання обумовлені втратами енергії електромагнітної хвилі, яка витрачається на нагрів шару крижаного утворення.

Перевагою локаційного методу діагностики ожеледі є те, що всі виміри проводяться дистанційно, всі прилади діагностики можуть бути розташованими на підстанції; відсутня необхідність встановлення на повітряних лініях будь-якої апаратури. Для реалізації цього методу застосовують прибори імпульсної рефлектометрії – рефлектометри. Вони випускаються в переносному виконанні; вони мають невеликі габарити та масу, також плюсом є низька вартість. Недоліком цього методу є невелика точність, тому що неможливо відрізнити наявність невеликої за товщиною ожеледі на значній довжині повітряної лінії від досить великої концентрації криги на малій довжині прольоту.

Метод інструментально-параметричної діагностики реалізується за допомогою пристроїв, що являють

собой підвісні модулі, які закріплюються на похилих ділянках проводу. До складу модуля входять: інклінометр, який вимірює кут нахилу до горизонталі, датчика температури лінії та джерело автономного живлення. Інклінометр дозволяє контролювати зміну кута нахилу корпусу пристрою та даної ділянки проводу по відношенню до горизонталі. Грунтуючись на показаннях інклінометра можна обчислити фактичне подовження проводу під впливом температури та розподіленого вагового навантаження від ожеледі. Знання довжини прольоту проводу дозволяє розрахувати стрілу його провисання та відстань до землі чи до наземних об'єктів.

Використовуючи відому залежність проводу від температурного режиму та користуючись показаннями інклінометра і датчика температури, можна виділити внесок у подовження проводу за рахунок збільшення вертикального навантаження та оцінити інтенсивність крижаних утворень. Недоліком цього методу є необхідність складного монтажу та подальшого технічного обслуговування, яке супроводжується відключенням лінії.

Метод інструментально-параметричної діагностики вважається найбільш прогресивним методом діагностики ліній електропередачі. Цей метод реалізовано за допомогою OTLM-модулю (OTLM – Overhead Transmission Line Monitoring).

OTLM-модуль (рис. 1) представляє собою систему для діагностики та управління повітряними лініями [1–3].

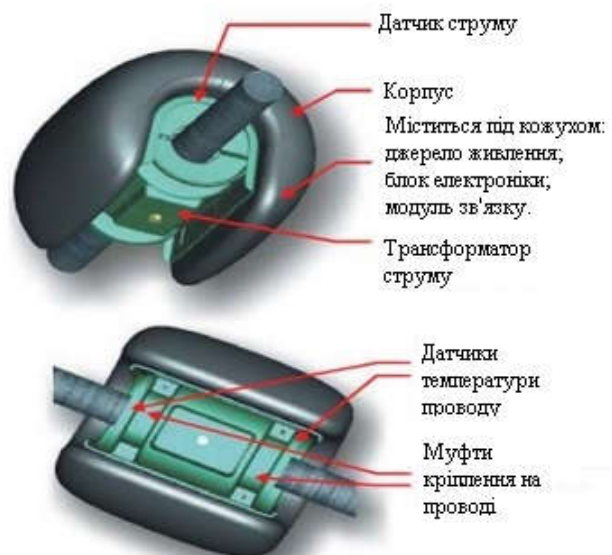


Рис. 1. Конструкція OTLM модуля

Кріплення безконтактної системи OTLM модуля моніторингу повітряної лінії електропередачі конструктивно монтується на високовольтні проводи до прольоту електромережі (рис. 2).



Рис. 2. Кріплення ОТЛМ модуля до прольоту електромережі (вид збоку)

В процесі роботи модуля в режимі реального часу вимірюються параметри температури проводу, сили струму в ньому, провисання за рахунок крижаних утворень, швидкості вітру, що дає змогу робити високоточний прогноз навантаження на мережу повітряної лінії електропередачі.

Датчики модулю збирають інформацію безпосередньо від лінії електропередачі. Інформація з датчиків постійно поступає операторам системи моніторингу, що дозволяє об'єктивно оцінювати стан лінії в даний момент часу та робити прогноз на майбутнє. Модуль виконано у вогнестійкому вологозахисному композитному корпусі. Він підключається до програмного забезпечення диспетчерської служби за допомогою модулів геолокації GSM або за допомогою WiFi, або через супутник; має камеру високої роздільної здатності. Інженерно-технічний обслуговуючий персонал має змогу в режимі реального часу діагностувати стан лінії електропередачі.

В табл. 1 наведені технічні характеристики модуля. Слід відмітити відносну значну вагу модуля при незначних габаритах. Перевагою такого модуля є змога функціонувати при досить широкому діапазоні температур навколишнього середовища. Монтаж модулів ОТЛМ загалом не є більш трудомістким за монтаж датчиків раніше розглянутих методів.

Таблиця 1 – Технічні характеристики модуля

Габаритні розміри, мм	315 x 298 x 315
Вага, кг	~ 12,5
Діапазон діаметрів провідників, мм	15...45
Частота мережі	50 Гц (60 Гц)
Діапазон робочих температур, °C	- 40...+ 85
Діапазон вимірів температури провідника, °C	- 40...+ 200

Комп'ютерна обробка даних основана на характеристиках провідника, встановлює точність вимірювання провисання провідника для поточної температури. Вплив умов навколишнього середовища та електричний струм у провіднику викликає зміни довжини прольоту, отже змінюється значення стріли провисання [4, 5].

Можливо робити комп'ютерний розрахунок провисання проводу лінії електропередачі з урахуванням температури навколишнього середовища [6, 7]. Крім температури, комп'ютерна програма враховує не тільки геометрію проводу, але й геометрію крижаного утворення або крапель води.

Таким чином, застосування мультифізичних модулів і математичних моделей дозволяє проводити діагностику та розрахунки з великою точністю, з урахуванням механічного впливу, тепломасообміну, а також розрахунку електричних і магнітних полів [8–15] для визначення аварійного стану лінії електропередачі.

На рис. 3 показаний розрахунок зусилля на точку кріплення провідника при температурі навколишнього середовища майже + 18 °C.

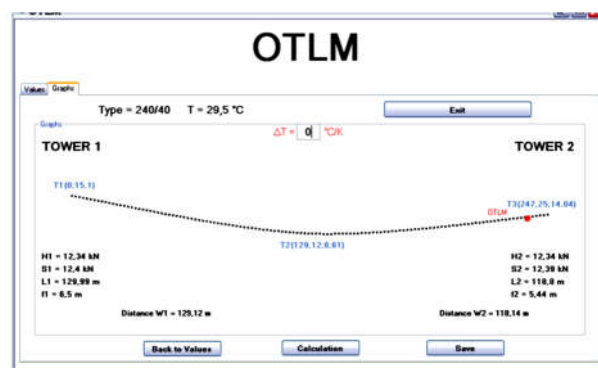


Рис. 3. Розрахункові зусилля на точку кріплення провідника при температурі вимірювання $T = +29,5^{\circ}\text{C}$ та навколишнього середовища температура $+17,39^{\circ}\text{C}$

Окрім пристроїв ОТЛМ на лінії електропередачі використовують як додатковий датчик метеостанцію, що дозволяє ретельно проводити діагностику стану лінії електропередачі (рис. 4).



Рис. 4. Лінії електропередачі з двома ОТЛМ модулями на проводах підвісних ізоляторів траверс (маленькі кола) і метеостанція на стійці анкерної опори (велике коло)

Висновки.

1. Сучасні методи моніторингу стану ліній електропередачі, особливо в складних метеорологічних умовах, наприклад, утворення ожеледі, значною мірою

потребують датчиків, які встановлюються безпосередньо на проводах лінії електропередачі.

2. Дистанційні виміри найбільш дешеві, але вони відрізняються невеликою точністю.

3. Різноманітні методи діагностики та датчики дозволяють оптимізувати капітальні затрати та точність вимірювань в конкретних умовах.

4. Достатньо перспективним є волоконно-оптичний метод діагностики, але найбільш коректний метод опитування датчика в цьому методі має відносно велику вартість.

5. Найбільш прогресивним методом є метод інструментально-параметричної діагностики.

Список літератури

- 1 Empowering grids and the people who run them URL: https://www.mosdorfer.com/wp.content/uploads/2022/03/Folder_Gridpulse_Einzelseiten.pdf
- 2 Kryukova N.V. Modern Monitoring Systems of Electric Power Lines / N.V. Kryukova, E.V. Goncharov, I.V. Polyakov // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: XXVI міжн. наук.-практична конф. (microCAD-2018), 16-18 травня: тези доп. Ч. II / НТУ "ХПІ", Харків. – 2018. – С. 86.
- 3 Гончаров С.В. Перспективи сучасних методів дистанційного контролю ліній електропередачі / С.В. Гончаров, І.В. Поляков, В.С. Марков та ін. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2020. – № 2(4). – С. 145–151.
- 4 Lovrenčić Viktor. The Contribution of Conductor Temperature and Sag Monitoring to Increased Ampacities of Overhead Lines (OHLs) / Viktor Lovrenčić, Marko Gabrovšek, Matej Kovačič [et al.] // Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science. – 2015. – No. 59(3), P. 70–77. – URL: <https://pp.bme.hu/eecs/article/view/8585/6866>
- 5 Bennett, A. Introduction to atmospheric visibility estimation / A. Bennett // Bristol industrial and research associates limited. – URL: http://www.biral.com/wp-content/uploads/2015/02/Introduction_to_visibility-v2-2.pdf.
- 6 Tomaszewski, M. The study of weather conditions favourable to the accretion of icing that pose a threat to transmission power lines / M. Tomaszewski [et al.] // International Journal of Critical Infrastructure Protection. – 2019. – Vol. 25. – P. 139–151.
- 7 Wachal, R. A computer vision early-warning ice detection system for the Smart Grid / R. Wachal [et al.] // IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (Orlando, FL, May 07-10, 2012). – Orlando, 2012, 1–6 pp.
- 8 Dube, M. Non-Invasive Detection of Faults in Power Lines / M. Dube, N. Cagnon, A. Hainese // Worcester: WPI, 2008. – 69 p.

- 9 Huang, Qi. A novel approach for fault location of overhead transmission line with noncontact magnetic-field measurement / Qi Huang, Wei Zhen, P.W.T. Pong // IEEE Transactions on power delivery. – 2014. – Vol. 27, No. 3 – P. 1186–1195.
- 10 Kabalci E.A Measurement and power line communication system design for renewable smart grids / E. Kabalci, Y. Kabalci // Measurement science review. – 2013. – Vol. 13, No 5. – P. 248–252.

References (transliterated)

- 1 Empowering grids and the people who run them URL: https://www.mosdorfer.com/wp.content/uploads/2022/03/Folder_Gridpulse_Einzelseiten.pdf
- 2 Kryukova N.V., Goncharov E.V., Polyakov I.V. Modern Monitoring Systems of Electric Power Lines. Abstracts of XXVI Int. Sci.-Pract. Conf. MicroCAD-2018 «Information technologies: science, engineering, technology, education, health». Kharkiv, 16-18 May 2018, Part. 2, pp. 86.
- 3 Honcharov Ye., Polyakov I., Markov V. [et al.] Prospects of Modern Remote Methods Control of Power Transmission Lines. Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology. 2020. No. 2(4), Pp. 145–151.
- 4 Lovrenčić Viktor, Marko Gabrovšek, Matej Kovačič [et al.] The Contribution of Conductor Temperature and Sag Monitoring to Increased Ampacities of Overhead Lines (OHLs). Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science. 2015. No. 59(3), P. 70–77. URL: <https://pp.bme.hu/eecs/article/view/8585/6866>
- 5 Bennett, A. Introduction to atmospheric visibility estimation. Bristol industrial and research associates limited. URL: http://www.biral.com/wp-content/uploads/2015/02/Introduction_to_visibility-v2-2.pdf.
- 6 Tomaszewski, M. [et al.] The study of weather conditions favourable to the accretion of icing that pose a threat to transmission power lines. International Journal of Critical Infrastructure Protection. 2019. Vol. 25. Pp. 139–151.
- 7 Wachal, R. [et al.] A computer vision early-warning ice detection system for the Smart Grid. IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (Orlando, FL, May 07-10, 2012). Orlando, 2012, Pp. 1–6.
- 8 Dube, M., Cagnon N., Hainese A. Non-Invasive Detection of Faults in Power Lines. Worcester: WPI, 2008. 69 p.
- 9 Huang, Qi., Wei Zhen, P.W.T. Pong A novel approach for fault location of overhead transmission line with noncontact magnetic-field measurement. IEEE Transactions on power delivery. 2014. Vol. 27, No. 3. Pp. 1186–1195.
- 10 Kabalci E.A, Kabalci Y. Measurement and power line communication system design for renewable smart grids. Measurement science review. 2013. Vol. 13, No 5. P. 248–252.

Надійшла (received) 26.03.2023

Відомості про авторів / About the authors

Крюкова Наталія Валеріївна (Kryukova Nataliya Valeriivna) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", доцент кафедри загальної електротехніки; м. Харків; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4600-1159>; e-mail: nataliia.kryukova@khp.edu.ua.

Марков Владислав Сергійович (Markov Vladyslav Sergiyovych) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри загальної електротехніки, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0703-0918>; e-mail: vladyslav.markov@khp.edu.ua.

Гончаров Євген Вікторович (Honcharov Yevgen Viktorovych) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", доцент кафедри загальної електротехніки; м. Харків; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1924-8906>; e-mail: yevhen.honcharov@khp.edu.ua.

Поляков Ігор Володимирович (Polyakov Igor Volodymyrovych) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри загальної електротехніки, тел.: (057) 707-64-27. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9329-1705>; e-mail: ihor.v.poliakov@khp.edu.ua