

УДК. 621.315.175

ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ПАРАМЕТРА ДІАГНОСТУВАННЯ ОЖЕЛЕДОУТВОРЕННЯ НА ПРОВОДАХ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ**О. А. Козловський, А. Ю. Орлович**Кіровоградський національний технічний університет
просп. Університетський, 8, м. Кіровоград, 25006, Україна. E-mail: kozlovskyioa@gmail.com**А. В. Некрасов**Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: ke@kdu.edu.ua

Елементи повітряних ліній розподільних електричних мереж є найменш захищеними від дії атмосферних навантажень унаслідок сплину нормативного терміну експлуатації, зниження їх механічної міцності при будівництві, а також змін клімату. За цих умов усунути загрозу їх ушкодження та руйнування можливо шляхом проведення плавок ожеледі струмами штучного короткого замикання на основі діагностичної інформації. Проте існуючі системи технічного діагностування ожеледно-вітрових явищ на проводах повітряних ліній мають суттєві недоліки: недосконалі алгоритми прогнозування ожеледоутворення, використання первинних вимірювальних перетворювачів з параметрами, відмінними від параметрів контрольованого проводу. З метою вдосконалення способу прогнозування ожеледоутворення проаналізовано мікрофізичні процеси утворення ожеледно-паморозевих відкладень на проводі й встановлено, що початок фазового переходу в термодинамічній системі «атмосферне повітря–провід» можливо діагностувати за кількістю витраченої енергії зовнішнього джерела. При цьому час роботи зовнішнього джерела пропорційний часу до фазового переходу системи при постійній його потужності. Для кількісної оцінки часу роботи зовнішнього джерела, що необхідний для початку здійснення фазового переходу, розв'язано нестационарне диференціальне рівняння теплопровідності ділянки проводу, отримано математичні моделі двох характерних випадків, що передують ожеледоутворенню: провід знаходиться у вологому повітрі та поверхня проводу змочується дощем. Теоретичними та експериментальними дослідженнями підтверджено, що час охолодження ділянки проводу до моменту появи штучних ожеледно-паморозевих відкладень, за умови незмінної потужності джерела охолодження, є інформативним параметром і може бути використаним при розробці прогнозуючої системи діагностування ожеледоутворення на проводах повітряних ліній розподільних електромереж.

Ключові слова: повітряна лінія електропередачі, обледеніння проводів, параметр діагностування.**ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ПАРАМЕТРА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ГОЛОЛЕДООБРАЗОВАНИЯ НА ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЯХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ****А. А. Козловский, А. Е. Орлович**Кіровоградський національний технічний університет
просп. Університетський, 8, г. Кіровоград, 25006, Україна. E-mail: kozlovskyioa@gmail.com**А. В. Некрасов**Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
ул. Первомайская, 20, г. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: ke@kdu.edu.ua

Елементи воздушних ліній розподільних електричних мереж являються найменш захищеними от воздействия атмосферных нагрузок вследствие истечения нормативного срока эксплуатации, занижения их механической прочности при строительстве, а также изменений климата. В этих условиях устранить угрозу их повреждения и разрушения возможно путем проведения плавок гололеда токами искусственного короткого замыкания на основе диагностической информации. Однако существующие системы технического диагностирования гололедно-ветровых явлений на проводах воздушных линий имеют существенные недостатки: несовершенные алгоритмы прогнозирования гололедообразования, использование датчиков с параметрами, отличными от параметров контролируемого провода. С целью усовершенствования способа прогнозирования гололедообразования проанализированы микрофизические процессы образования гололедо-изморозевых отложений на проводе и установлено, что начало фазового перехода в термодинамической системе «атмосферный воздух–провод» возможно диагностировать по количеству затраченной энергии внешнего источника. При этом время работы внешнего источника пропорционально длительности времени к фазовому переходу системы при постоянной его мощности. Для количественной оценки времени работы внешнего источника, которое необходимо для начала осуществления фазового перехода, решено нестационарное дифференциальное уравнение теплопроводности участка провода, получены математические модели двух характерных случаев, предшествующих гололедообразованию: провод находится во влажном воздухе и поверхность провода смачивается дождем. Теоретическими и экспериментальными исследованиями подтверждено, что время охлаждения участка провода к моменту появления искусственных гололедно-изморозевых отложений, при неизменной мощности источника охлаждения, является информативным параметром и может быть использован при разработке прогнозирующей системы диагностирования гололедообразования на проводах воздушных линий распределительных электрических сетей.

Ключевые слова: воздушная линия электропередачи, обледенение проводов, параметр диагностирования.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Зміна клімату на території України, насамперед, характеризується підвищенням температури холодних сезонів року та зміною гідрологічного режиму. В результаті зростає потужність небезпечних гідрометеорологічних явищ: повеней, шквалів, льодяних дощів та ін. Згідно з прогнозами кліматологів, ці тенденції зберуться й у майбутньому [1]. У той же час повітряні лінії електропередачі – найбільш чутлива до атмосферних навантажень ланка енергосистеми. Причинами їх ушкоджень є природний знос, старіння конструктивних елементів і випадкові, наднормативні навантаження при ожеледно-вітрових явищах.

Екстремальні зусилля, що витримує конструкція повітряної лінії під дією атмосферних факторів, враховуються за допомогою коефіцієнта запасу міцності, залежно від заданого середнього періоду повторюваності найбільш несприятливих сполучень погодних умов для даної місцевості на основі карт кліматичного районування, проте в теперішніх умовах зміни клімату нівелюють передбачений запас міцності. Крім того, в експлуатації знаходиться значна кількість повітряних ліній розподільних мереж, що побудовані за умовами п'ятирічної повторюваності ожеледно-вітрових навантажень. Тому розподільні мережі виявляються найбільш вразливими до дії атмосферних навантажень [2].

Виходом з даної ситуації, що забезпечить надійну роботу повітряних ліній електропередачі, є усунення короткочасних, наднормативних ожеледно-вітрових навантажень за допомогою плавки ожеледі струмами штучного короткого замикання. Однак її ефективність або взагалі успішність цілком залежить від своєчасності проведення [3–5].

Основний напрямок підвищення ефективності плавки ожеледі – це впровадження в електричних мережах енергопостачальних компаній комплексних систем технічного діагностування ожеледно-вітрових явищ на повітряних лініях електропередачі. Системи, що знаходяться в експлуатації, мають низку вагомих недоліків: недосконалі алгоритми прогнозування ожеледоутворення, використання первинних вимірювальних перетворювачів з параметрами, відмінними від параметрів контрольованого проводу [6], часткову укомплектованість локальними системами діагностування [7], наприклад, системами прогнозування обледеніння та раннього підтвердження появи ожеледно-паморозевих відкладень на проводах повітряної лінії й т.ін.

Отже, дослідження, направлені на вивчення закономірностей ожеледоутворення на повітряних лініях розподільних мереж, є актуальними.

Мета роботи полягає в обґрунтуванні вибору параметра діагностування ожеледоутворення на проводах повітряних ліній розподільних електромереж.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. На проводі повітряної лінії утворення ожеледно-паморозевих відкладень відбувається внаслідок сублімації водяної пари і/або гравітаційного осідання переохолоджених крапель води.

Умовою сублімаційного росту ожеледно-паморозевих відкладень є перевищення парціальним тиском водяної пари в повітрі E_a , тиску насиченої пари над поверхнею проводу E_i : $E_a > E_i$. Цей процес спостерігається при переважно радіаційному вихолодженні проводу або при наявності переохолоджених крапель у повітрі й льодяних зародків на проводі.

Інтенсивність сублімаційного росту визначається ступенем пересичення. У природних умовах найбільше пересичення спостерігається при наявності переохолодженого туману, краплі якого підтримують високу вологість повітря, що близька до насичення над водою. При наявності пересичення ріст кристалів льоду на проводі починається на кристалічних зародках – частинках аерозолей або на перших краплинах туману, що потрапили на поверхню проводу.

При формуванні осаду за рахунок гравітаційного осідання крапель залежно від температури проводу t можливі два випадки:

1) якщо $t < 0$ °С, то малі краплини, що потрапили на провід, замерзають відразу, а великі – до замерзання встигають розплющитись і перетворитись на плівку води;

2) якщо $t = 0$ °С, то замерзання переохолоджених крапель відбувається не на поверхні проводу, а на плівці води. Вона може залишитись після закінчення теплої дощу або ж з'явиться при критичній водності туману внаслідок виділення значної кількості теплоти кристалізації [8].

При обох описаних механізмах утворення ожеледно-паморозевих відкладень водяна пара або краплини води проходять через метастабільний стан: «пара – переохолоджена, пара – кристал», «рідина – переохолоджена, рідина – кристал» (рис. 1). Метастабільний стан є термодинамічно нерівноважним, але може зберігатися протягом тривалого часу.

Нехай стан замкнутої системи «пара–провід», («краплина води–провід», «плівка води–провід») змінюється так, що вона переходить у нерівноважний стан з ентропією S .

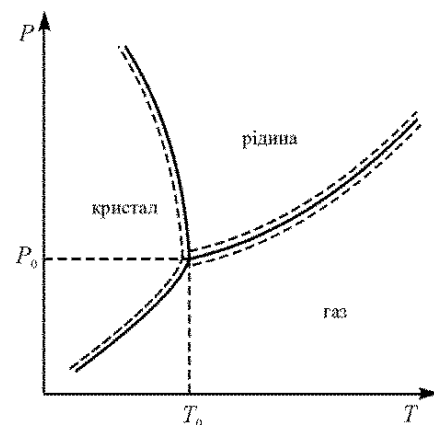


Рисунок 1 – Діаграма фазових станів води

Для такої системи буде справедливе рівняння Больцмана:

$$S = k \ln w + const,$$

де k – стала Больцмана; w – ймовірність стану системи, що відповідає ентропії S , звідки

$$w = C e^{\frac{S}{k}}, \quad (1)$$

де C – постійна.

Згідно з (1), ймовірність того, що система знаходиться у стані рівноваги, дорівнює $w_0 = e^{S_0/k}$. Тоді ймовірність того, що система зі стану, що характеризується ентропією S_0 , перейде у стан з ентропією S , буде пропорційна $e^{\Delta S/k}$, тобто $w \propto C e^{\Delta S/k}$, де $\Delta S = S - S_0$ [9].

З іншого боку, зміну ентропії процесу можливо записати у вигляді

$$\Delta S = -Q_3/T_2,$$

де T_2 – температура нової фази; Q – енергія зовнішнього джерела при зворотному процесі.

Стійкій рівновазі системи відповідає умова $Q_3 \rightarrow \min$ (при $T = const$ та тиску $p_a = const$). Для початку фазового переходу в замкнутій системі необхідно витратити певну кількість енергії, причому чим ближчий стан системи до фазового переходу, тим менше потрібно енергії.

Звідси можливо висунути гіпотезу: утворення природних ожеледно-паморозевих відкладень на проводі повітряної лінії, що знаходиться в замкнутій системі й термічно врівноважений з нею, можливо діагностувати за зміною величини витраченої енергії Q_3 (або за часом роботи джерела охолодження τ_{fr} , за умови постійної потужності охолодження: $P_{fr} = const$) при періодичному штучному охолодженні проводу до появи на ньому ожеледно-паморозевих відкладень.

Для аналітичного обґрунтування та оцінки інформативності τ_{fr} як параметра діагностування визначимо закон зміни температури проводу повітряної лінії у часі при його штучному охолодженні.

Розглянемо два характерних випадки, що передують ожеледоутворенню на проводі:

- 1) провід знаходиться у вологому повітрі;
- 2) поверхня проводу змочується дощем.

Оскільки перший випадок є частковим випадком другого – то розгляд почнемо відразу з останнього.

Диференціальне рівняння теплопровідності для тіла довільної форми має вигляд

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{1}{c\rho} \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} t) + \frac{q_V}{c\rho}, \quad (2)$$

де t – температура; τ – час; c – питома теплоємність; ρ – густина; λ – коефіцієнт теплопровідності; q_V – потужність внутрішніх джерел теплоти, що виділяється (поглинається) джерелами (стоками) в

одиниці об'єму тіла за одиницю часу.

Для нестационарної задачі рівняння (2) при $q_V \neq 0$ та $\lambda = const$ зводиться до вигляду

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \nabla^2 t + \frac{q_V}{c\rho} = \frac{\lambda}{c\rho} \left[\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right] + \frac{q_V}{c\rho},$$

де a – коефіцієнт температуропровідності; ∇^2 – оператор Лапласа у декартовій системі координат.

Для алюмінієвих та сталевалюмінієвих проводів, що використовуються на повітряних лініях розподільних електричних мереж, критерій Біо $< 0,1$, тому провід можливо вважати "термічно тонким" тілом, а отже для нього будуть справедливі рівності:

$$\frac{\partial t}{\partial x} = 0; \quad \frac{\partial t}{\partial y} = 0; \quad \frac{\partial t}{\partial z} = 0; \quad (3)$$

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} = 0; \quad \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} = 0; \quad \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} = 0.$$

З урахуванням (3) рівняння (2) матиме вигляд:

$$\rho c \frac{dt}{d\tau} = q_V.$$

Запишемо рівняння теплового балансу для ділянки проводу з урахуванням потужності:

- 1) внутрішніх джерел нагріву (електричний струм);
- 2) внутрішніх джерел охолодження (штучне охолодження);
- 3) зовнішніх джерел (набуває/втрачає відрізок проводу від дії дощу):

$$m c \frac{dt}{d\tau} = q_{V,h} V - q_{V,fr} V - h_c S [t(\tau) - t_a] - m_w c_w [t(\tau) - t_{dr}] S_{p,a},$$

де m – маса ділянки проводу; c – теплоємність проводу; $q_{V,h}$ – об'ємна густина внутрішніх джерел теплоти; $q_{V,fr}$ – об'ємна густина внутрішніх стоків теплоти; V – об'єм ділянки проводу; S – площа поверхні ділянки проводу; h_c – коефіцієнт конвективного теплообміну; $t(\tau)$ – температура ділянки проводу в момент часу τ ; t_{dr} – температура крапель дощу; c_w – питома теплоємність води; $S_{p,a}$ – площа проекції поверхні проводу, $S_{p,a} = 2Rl$ (рис. 2); R – радіус проводу; l – довжина ділянки проводу; m_w – маса води, що потрапляє на одиницю площі проводу за одиницю часу [10]:

$$m_w = Cel U_g \cos \alpha,$$

Cel – водність дощу [11]:

$$Cel = 0,067 P^{0,846},$$

P – інтенсивність опадів.

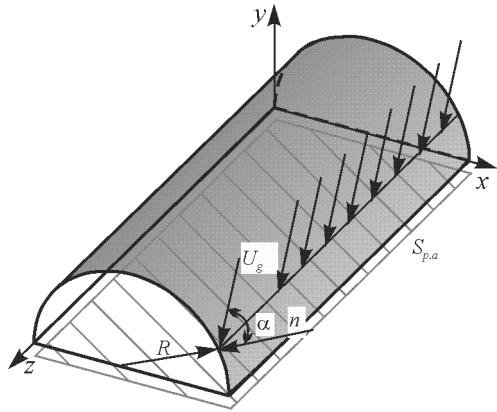


Рисунок 2 – До виводу рівняння потоку дощу

Для типових діаметрів крапель, більших за 1 мм, сили інерції більші за сили в'язкості, тому їх траєкторія польоту поблизу проводу прямолінійна. Рівномірна швидкість польоту може бути знайдена з векторної суми швидкості вітру \vec{v}_a та граничної швидкості краплі \vec{v}_{dr} [8, 10, 11]:

$$U_g = \sqrt{v_a^2 + v_{dr}^2}.$$

Гранична швидкість падаючої краплі для дощів у холодну пору року не перевищує 6–9 м/с [12].

При розгляді конвективного теплообміну приймаємо, що температура навколишнього середовища за час охолодження τ_{fr} ділянки проводу не змінюється, тобто $t_a = const$.

Позначимо потужність внутрішніх джерел нагріву як $P_j = q_{V,h}V$, а охолодження $P_{fr} = q_{V,fr}V$, тоді

$$mc \frac{dt(\tau)}{d\tau} = P_j - P_{fr} - h_c S [t(\tau) - t_a] - m_w c_w S_{p,a} [t(\tau) - t_{dr}]$$

або

$$\frac{dt(\tau)}{d\tau} + \frac{Sh_c + m_w c_w S_{p,a}}{mc} t(\tau) = \frac{1}{mc} (P_j - P_{fr} + h_c t_a S - m_w c_w t_{dr} S_{p,a}). \quad (4)$$

Позначимо:

$$A = \frac{Sh_c + m_w c_w S_{p,a}}{mc};$$

$$B = \frac{1}{mc} (P_j - P_{fr} - h_c t_a S + m_w c_w t_{dr} S_{p,a}).$$

Тоді (4) матиме вид

$$\frac{d}{d\tau} t(\tau) + A t(\tau) = B. \quad (5)$$

Рівняння (5) є диференціальним рівнянням 1-го порядку й має розв'язок [13]

$$t(\tau) = C e^{-A\tau} + \frac{B}{A} \quad (6)$$

або

$$t(\tau) = C e^{-\frac{Sh_c + m_w c_w S_{p,a}}{mc} \tau} + \frac{P_j - P_{fr} + h_c t_a S + m_w c_w t_{dr} S_{p,a}}{h_c S + m_w c_w S_{p,a}}, \quad (7)$$

де C – стала інтегрування.

Для знаходження сталої інтегрування вважаємо, що в момент часу $\tau=0$ температура проводу дорівнює температурі повітря, тобто $t(0) = t_a$. Тоді

$$C = t_a - \frac{P_j - P_{fr} + h_c t_a S + m_w c_w t_{dr} S_{p,a}}{h_c S + m_w c_w S_{p,a}}.$$

Частковий розв'язок рівняння (7):

$$t(\tau) = t_a + \frac{P_j - P_{fr} + m_w c_w S_{p,a} (t_{dr} - t_a)}{h_c S + m_w c_w S_{p,a}} \left(1 - e^{-\frac{\tau}{T_0}} \right), \quad (8)$$

де T_0 – стала часу охолодження відрізка проводу:

$$T_0 = \frac{mc}{h_c S + m_w c_w S_{p,a}}.$$

Для визначення часу охолодження проводу, через який почнеться його обледеніння, введемо поняття переохолодження проводу:

$$\Theta(\tau) = t(\tau) - t_a.$$

Тоді рівняння (8) запишеться у вигляді

$$\Theta(\tau) = \Theta_{st} \left(1 - e^{-\frac{\tau}{T_0}} \right), \quad (9)$$

де Θ_{st} – усталене значення температури переохолодження:

$$\Theta_{st} = \lim_{\tau \rightarrow \infty} \Theta(\tau) = \frac{P_j - P_{fr} + m_w c_w S_{p,a} (t_a + t_{dr})}{h_c S + m_w c_w S_{p,a}}.$$

Час τ_{fr} , за який вода на ділянці проводу охолодиться до температури замерзання (кристалізації) t_{fr} , тобто коли

$$t(\tau_{fr}) = t_a + \Theta(\tau_{fr}) = t_{fr}$$

або

$$\Theta(\tau_{fr}) = \Delta T = t_{fr} - t_a, \quad (10)$$

при цьому вважаємо, що за час охолодження різниця температури замерзання (кристалізації) води на ділянці проводу та повітря залишається незмінною: $\Delta T = const$. Підставивши у (9) замість лівої частини значення з (10), отримаємо

$$\Delta T = \Theta_{st} \left(1 - e^{-\frac{\tau_{fr}}{T_0}} \right). \quad (11)$$

Розв'яжемо рівняння (11) відносно τ_{fr} :

$$\tau_{fr} = -T_0 \ln \left(1 - \frac{\Delta T}{\Theta_{st}} \right). \quad (12)$$

При цьому можливі три випадки:

- 1) $\Delta T > \Theta_{st}$;
- 2) $\Delta T = \Theta_{st}$;
- 3) $\Delta T < \Theta_{st}$ (рис. 3).

У першому випадку дійсний розв'язок відсутній.

У другому випадку $\tau_{fr} \rightarrow \infty$, оскільки

$$\lim_{\Delta T \rightarrow \Theta_{st}} \left[\ln \left(1 - \frac{\Delta T}{\Theta_{st}} \right) \right] = -\infty.$$

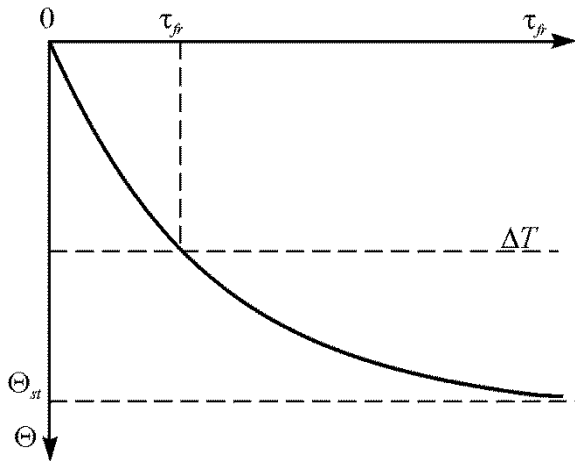


Рисунок 3 – Графічна інтерпретація розв'язку рівняння (12), випадок 3

У третьому випадку розв'язком буде рівняння (12), з якого можливо зробити наступні висновки:

- 1) якщо $\Delta T \rightarrow \Theta_{st}$, то $\tau_{fr} \rightarrow \infty$;
- 2) якщо $\Delta T \rightarrow 0$, то $\tau_{fr} \rightarrow 0$.

Якщо провід знаходиться у вологому повітрі, а дощ відсутній – $m_w = 0$, то рівняння (12) спрощується до вигляду

$$\tau_{fr} = -\frac{mc}{h_c S} \ln \left(1 - \frac{h_c S (t_{fr} - t_a)}{P_j - P_{fr}} \right). \quad (13)$$

У рівнянні (13) температура t_{fr} – це температура точки льоду t_f , тому

$$t_{fr} = t_f = \beta_i \frac{\frac{\ln \varphi}{\alpha_i} + \frac{t_a}{\beta_i + t_a}}{1 - \left(\frac{\ln \varphi}{\alpha_i} + \frac{t_a}{\beta_i + t_a} \right)}, \quad (14)$$

де $\alpha_i = 22,4893^\circ\text{C}$ і $\beta_i = 272,881^\circ\text{C}$ – постійні для льоду [14]; φ – відносна вологість повітря, в.о.

Підставивши у (13) рівняння (14) і спростивши його, матимемо

$$\tau_{fr} = -\frac{mc}{h_c S} \ln \left[1 + \frac{h_c S (\beta_i + t_a)^2 \ln \varphi_a}{(P_j - P_{fr})(t_a \ln \varphi_a + \beta_i \ln \varphi_a - \alpha_i \beta_i)} \right]. \quad (15)$$

Рівняння (12) можна надати в безрозмірному вигляді. Положивши $\tau_{fr^*} = \tau_{fr} / T_0$ за безмірний час, а $\Theta_* = \Delta T / \Theta_{st}$ – за безрозмірну температуру, отримаємо:

$$\tau_{fr^*} = -\ln(1 - \Theta_*),$$

виходячи з обмежень $\Delta T < \Theta_{st}$, $\Theta_* \in [0; 1)$. На рис. 4 надано графік залежності $\tau_{fr^*} = f(\Theta_*)$:

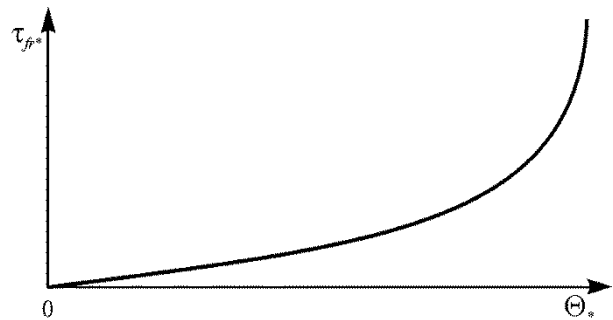


Рисунок 4 – Залежність часу охолодження τ_{fr^*} від температури переохолодження Θ_* .

Для підтвердження висунутої гіпотези й отриманих математичних моделей (12), (15) були проведені експериментальні дослідження процесів утворення ожеледно-паморозевих відкладень на зразках неізольованих проводів повітряних ліній електропередачі марки АС [15]. Лабораторна установка була розроблена на основі промислової морозильної камери. Реєстрація зміни в часі параметрів стану зразків проводу та середовища навколо них здійснювалась автоматизованою системою збору даних на основі універсального вимірювача-регулятора ТРМ-138. Візуальний контроль вимірювань і розрахованих параметрів, їх аналіз та архівування проводилось за допомогою проекту, розробленого в середовищі Master SCADA RT32. Фіксація початку утворення ожеледно-паморозевих відкладень на зразку проводу здійснювалась шляхом контролю електричного опору між багатодрововим та однодротовим електродами. Для цього одна з дротин проводу була електроізольована від інших [15]. Вимірювання електричного опору здійснювалось аналоговим мегомметром Е6-17.

Залежно від метеорологічних умов, а отже, при певних синоптичних станах можливе утворення внутрішньомасової або фронтальної ожеледі [16].

Внутрішньомасова ожеледь виникає при синоптичних станах, що забезпечують утворення низької

внутрішньомасової шаруватої хмарності або густого адвективного туману. Основними причинами появи такої ожеледі є сублимація водяної пари, а після утворення туману – замерзання дрібних крапель (2–5 мкм) на поверхні предметів.

Моделювання умов виникнення внутрішньомасового обледеніння проводилось протягом трьох годин. За цей час у морозильній камері температура повітря підвищувалась від –8 до –3 °С з темпом ≈ 2 °С/год, а його відносна вологість – від 80 до 100 % з темпом ≈ 7 %/год. Охолодження зразка проводу АС–50/8 проводилось циклічно, з інтервалом 10 хв. Величина потужності охолодження зразка була принята $P_{fr} = 4$ Вт для виключення його переохолодження і підтримувалась постійною з похибкою не більше ±2 %.

Розрахунок коефіцієнта конвективного теплообміну для моделі (15) проводився за виразом

$$h_{c,d} = \frac{k_a Nu}{d},$$

де k_a – теплопровідність повітря; d – діаметр проводу; Nu – число Нусельта.

Експерименти проводились при вимушеній конвекції з перпендикулярним напрямом повітряного потоку до осі проводу, тому число Нусельта знаходилось із рівняння [17]

$$Nu = 10^{(-0,07043 + 0,3153 \log Re + 0,03553 (\log Re)^2)},$$

де Re – число Рейнольдса:

$$Re = \frac{\rho_a dv_a}{\mu_a},$$

де ρ_a – густина повітря; μ_a – динамічна в'язкість повітря.

На рис. 5 зображено теоретичні та експериментальні динамічні ряди: різниці температур повітря й точки льоду а); тривалості штучного охолодження ділянки проводу до утворення на ній ожеледно-паморозевих відкладень б).

Теоретичний ряд часу охолодження $\{\tau_{fr,\tau}\}$ був розрахований за виразом (15) за умови, що $P_{fr} = 4$ Вт, а потужність нагріву – $P_j = 0$ Вт. Тренди отриманих динамічних рядів $\{\Delta T_{e,\tau}\}$ і $\{\tau_{fr,\tau}\}$ при наближенні ожеледної ситуації носили лінійний характер. Максимальне розходження дослідних і експериментальних даних склало не більше ±10 % у межах 2 год від початку експерименту. При $\tau_{fr} < 3$ с вимірювальна система переходила у динамічний режим вимірювання.

Для експериментальних даних була розрахована стандартна похибка (рис. 5, 6):

$$m = \sqrt{\frac{\bar{S}^2}{n}},$$

де \bar{S}^2 – дисперсія емпіричного розподілу; n – кількість рівнів динамічного ряду.

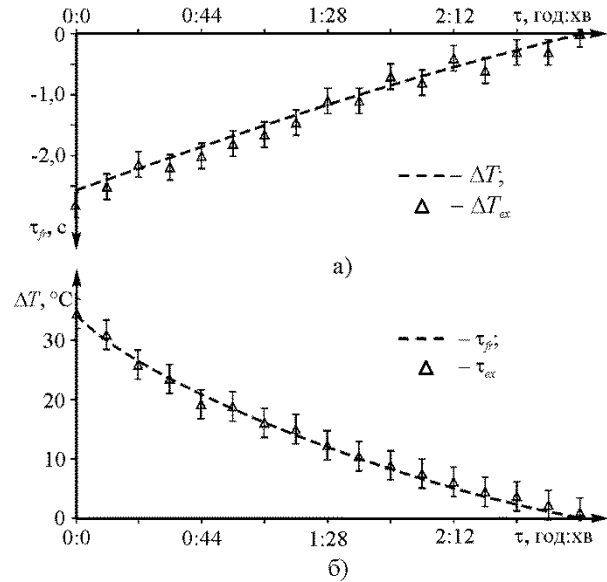


Рисунок 5 – Теоретичні та експериментальні динамічні ряди за умов внутрішньомасового обледеніння: а) $\{\Delta T_e\}$; б) $\{\tau_{fr,\tau}\}$

Фронтальне обледеніння відбувається при невеликих від'ємних температурах повітря. Краплі переохолодженого дощу до замерзання встигають розплющитись і розтектися по поверхні проводу, перетворившись на плівку води, а вже потім замерзнуть.

Моделювання фронтального обледеніння проводилось протягом двох годин. За цей час у морозильній камері температура повітря знижувалась від +2 °С до ≈0 °С з темпом 1 °С/год при відносній вологості 95–99 %. Потужність охолодження зразка проводу АС–50/8 була прийнята 5,1 Вт з метою виключення переохолодження на ньому осілих крапель та плівки води й підтримувалась постійною з похибкою ±2 %.

У природних умовах інтенсивність обложних опадів менша 3 мм/год, тому попередньо знежирена поверхня зразків проводу змочувалась лише перед початком процесу їх штучного охолодження. Такий підхід не вносить суттєвої похибки у вимірювання часу охолодження τ_{fr} , оскільки на поверхні зразка проводу затримується незначна кількість води – 0,63 г. Тривалість пауз у циклі охолодження зразка проводу прийнята 10 хв.

Рівні теоретичного динамічного ряду часу охолодження $\{\tau_{fr,\tau}\}$ були розраховані за математичною моделлю (12) за умови, що $P_{fr} = 5,1$ Вт, а $P_j = 0$ Вт (рис. 6,а).

Повний коефіцієнт конвективного теплообміну проводу, вкритого плівкою води, розраховувався так:

$$h_c = \frac{h_{c,d} h_{c,w}}{h_{c,d} + h_{c,w}},$$

де $h_{c,w}$ – коефіцієнт конвективного теплообміну плівки води на проводі:

$$h_{c,w} = \frac{k_w}{\delta_{w,f}},$$

де k_w – теплопровідність води; $\delta_{w,f}$ – еквівалентна товщина плівки води.

Різниця між розрахованими значеннями коефіцієнта конвективного теплообміну для сухого $h_{c,d}$ і мокрого проводу h_c за умови експерименту склала не більше 1%. Аналогічно трендам, приведеним на рис. 5, тренди динамічних рядів $\{\Delta T_{e,\tau}\}$ і $\{\tau_{fr,\tau}\}$ при моделюванні фронтального обледеніння теж мають лінійний характер. Максимальне розходження дослідних і експериментальних даних знаходиться у межах $\pm 15\%$ і лише в зоні малих значень часу охолодження (точка А на рис. 6,б) зростає. Помірне розходження експериментальних даних з моделлю (12), насамперед, пов'язано з тим, що фазовий перехід «вода–лід» на зразку проводу відбувався при температурі кристалізації $t_{cr} \in [-0,1; -0,3]^\circ\text{C}$, тобто мало місце незначне переохолодження води.

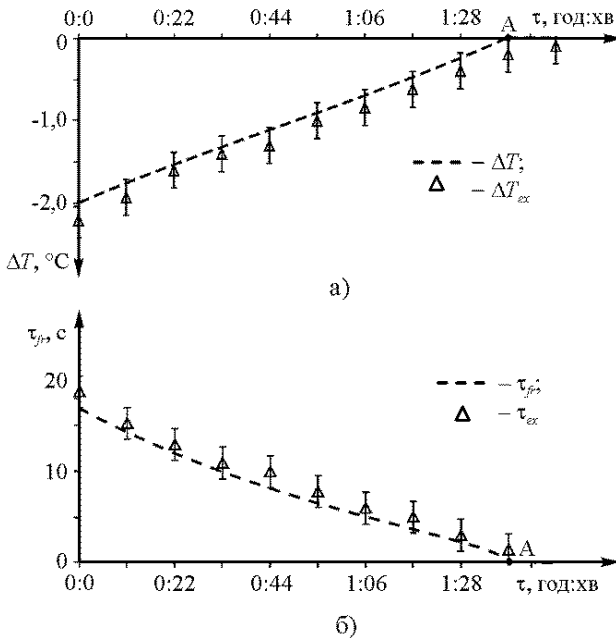


Рисунок 6 – Теоретичні та експериментальні динамічні ряди за умови фронтального обледеніння:

а) $\{\Delta T_\tau\}$; б) $\{\tau_{fr,\tau}\}$

ВИСНОВКИ. Діючі системи технічного діагностування ожеледно-вітрових явищ на провадах повітряних ліній розподільних електромереж мають вагомі недоліки: недосконалі алгоритми прогнозування ожеледоутворення, використання первинних вимірних перетворювачів із параметрами, відмінними від параметрів контрольованого проводу, а отже, потребують удосконалення.

У результаті аналізу мікрофізичних процесів утворення ожеледно-паморозевих відкладень на проводі встановлено, що початок фазового переходу у термодинамічній системі «атмосферне повітря–провід» можливо діагностувати за кількістю витраченої енергії зовнішнім джерелом, причому чим ближчий стан системи до фазового переходу, тим менше необхідно енергії.

Отримано математичні моделі для розрахунку й аналізу тривалості часу охолодження ділянки проводу двох характерних випадків, що передують ожеледоутворенню: провід знаходиться у вологому повітрі та поверхня проводу змочується дощем.

Теоретичними й експериментальними дослідженнями підтверджено, що час охолодження ділянки проводу до моменту появи штучних ожеледно-паморозевих відкладень, за умови незмінної потужності джерела охолодження, є інформативним і може бути використаним як параметр діагностування при розробці прогнозуючої системи технічного діагностування ожеледоутворення на провадах повітряних ліній розподільних електричних мереж.

ЛІТЕРАТУРА

1. Изменение климата стран СНГ в 21-м веке // Бюллетень федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. – 2012. – Вып. 35. – С. 13–15.
2. Козловский А.А., Орлович А.Е., Серебренников С.В. Автоматизированная система прогнозирования разрушающих атмосферных нагрузок на элементы конструкций воздушных линий электропередач // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2002. – Вып. 2. – С. 46–48.
3. Черемисин Н.М., Зубко В.М., Пархоменко О.В. К вопросу о контроле состояния гололедо-изморозевых отложений на ВЛ 0,38–110 кВ и планировании ремонтных работ на них // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Серія «Технічні науки». – 2010. – Вып. 101. – С. 16–18.
4. Дьяков А.Ф., Засыпкин А.С., Левченко И.И. Предотвращение и ликвидация гололедных аварий в электрических сетях энергосистем. – Пятигорск: РП «Южэнергонадзор», 2000. – 284 с.
5. Крызов Г.П., Нарожный В.Б. Плавка гололеда на провадах и тросах ВЛ // Энергетика и электрификация. – 1996. – Вып. 3. – С. 16–18.
6. Козловський О.А., Кубкін М.В., Гришук І.С. Розробка та комп'ютерне моделювання режимів

роботи первинного вимірювального перетворювача ожеледоутворення // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: зб. наук. праць. – Кіровоград: Кіровоградський національний технічний університет, 2012. – Вип. 24 (1). – С. 308–314.

7. Шевченко Н.Ю., Лебедева Ю.В., Хромов Н.П., Сошинов А.Г. Внедрение автоматизированной системы наблюдения за гололедом в Камышинских электрических сетях // Современные проблемы науки и образования. – 2009. – Вып. 5. – С. 127–132.

8. Литвинов И.В. Формирование и преобразование атмосферных осадков на подстилающей поверхности. – Л.: Гидрометеоздат, 1987. – 232 с.

9. Ивлев Л.С., Довгалюк Ю.А. Физика атмосферных аэрозольных систем. – СПб.: НИИХ СПбГУ, 1999. – 194 с.

10. Draganoiu G., Lamarche L., McComber P. A computer model of glaze accretion on wires // Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering. – 1996. – Iss. 118. – PP. 148–157.

11. Best A.C. The size distribution of rain drops // Quarterly Journal of Royal Meteorology Society. – 1950. – Iss. 76. – PP. 16–36.

12. Wang P.K., Pruppacher H.R. Acceleration to terminal velocity of clouds and raindrops // Journal of applied meteorology. – 1977. – Iss. 16. – PP. 275–280.

13. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник для инженеров и учащихся втузов. – М.: Наука, 1986. – 544 с.

14. ДСТУ ГОСТ 8.524:2009. ГСИ. Таблицы психометрические. Построение, содержание, расчетные соотношения.

15. Козловський О.А., Орлович А.Ю., Клименко В.В. Експериментальні дослідження нестаціонарних теплових режимів неізолюваних проводів повітряних ліній перед процесом обледеніння // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: зб. наук. праць. – Кіровоград: Кіровоградський національний технічний університет, 2014. – Вип. 27. – С. 373–381.

16. Специализированные прогнозы погоды / [под ред. В.И. Воробьева, А.Ф. Кивганова] – Л.: изд. ЛГМИ, 1991. – 112 с.

17. Black W.Z., Rehbery R.L. Simplified model for steady state and real-time ampacity of overhead conductors // IEEE Transactions on power apparatus and system. – 1985. – Iss. PAS-104, № 10. – PP. 2942–2953.

RATIONALE SELECTION REASONING OF ICING TEST PARAMETER ON OVERHEAD LINES OF ELECTRIC DISTRIBUTION NETWORK

O. Kozlovskiy, A. Orlovich,

Kirovograd National Technical University

prosp. Universitetskyy, 8, Kirovohrad, 25006, Ukraine. E-mail: kozlovskiyoa@gmail.com

A. Nekrasov

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyy National University

vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: ke@kdu.edu.ua

Elements of overhead lines of electric distribution networks are least protected from the effects of atmospheric overload due to the expiration of the statutory term of operation, diminution of their mechanical strength during the construction, in result of climate change. In these circumstances, threat of damage and destruction of overhead lines is possible to be eliminated through melting ice by artificial short-circuit currents on the basis of diagnosis information. However, existing test systems of icing and wind effects on the wires overhead lines have significant drawbacks: incommensurate-icing committed prediction algorithms, the use of sensors with parameters different from the controlled wire parameters. In order to improve prediction method ice accretion analyzed microphysical processes of icing and rime deposits on the wire, and found that the onset of a phase transition in a thermodynamic system "of atmospheric air – wire" is possible to diagnose the by the number of external power energy consumed. Thus, during operation of the external source in proportion to the time duration phase change system in its constant power. To quantify the time of the external source, this is necessary for the start of the phase transition, resolved time-dependent differential equations of wires section heat conduction and obtained mathematical models of two typical cases prior icing: the wire is in the humid air and the surface of the wire is wetted by rain. Theoretical and experimental studies confirmed that the part of the wire cooling time until artificial rime icing and sediments appear at a constant power of cooling source option is informative and can be used to develop a predictive test system icing on the wires overhead lines of electric distribution networks.

Key words: overhead power line, icing wires, test parameter.

REFERENCES

1. "Climate Change in CIS countries in the 21st century" (2012), *Byulleten federalnoy sluzhby po gidrometeorologii i monitoringu okruzhayushchey sredy*, no. 35, pp. 13–15. (in Russian)

2. Kozlovskiy, A.A., Orlovich, A.E. and Serebrennikov, S.V. (2002), "Automated system of forecasting the breaking atmospheric loads on structural

elements of power transmission lines", *Tekhnicheskaya diagnostika i nerazrushayushchiy kontrol*, no. 2, pp. 46–48. (in Russian)

3. Cheremisin, N.M., Zubko, V.M. and Parkhomenko, O.V. (2010), "On the question of the control of state-rime of ice deposits on the overhead line 0,38–110 kV and planning repair work on them",

Zbirnyk naukovykh prats Kharkivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu silskoho hospodarstva, Vol. 101, pp. 16–18. (in Russian)

4. Dyakov, A.F., Zasytkin, A.S. and Levchenko, I.I. (2000), *Predotvrashcheniye i likvidatsiya gololednykh avariiv v elektricheskikh setyakh energosistem* [Icing accidents prevention and elimination in electric networks of power supply], RP “YUzhenergonadzor”, Pyatigorsk. (in Russian)

5. Kryzhov, G.P. and Narozhnyy, V.B. (1996), "Ice melting on wires and cables overhead lines", *Energetika i elektrifikatsiya*, no. 3, pp. 16–18. (in Russian)

6. Kozlovskiy, O.A., Kubkin, M.V. and Hryshchuk, I.S. (2011), "Operating mode of the ice accretion sensor computer modelling and design", *Zbirnyk naukovykh prats Kirovohradskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu*, Vol. 24, no. 1, pp. 308–314. (in Ukrainian)

7. Shevchenko, N.J., Lebedeva, J.V., Khromov, N.P. and Soshinov, A.G. (2009), "Application of an automated system for icing observation at Kamyshin electric networks", *"Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya"*, no. 5, pp. 127–132. (in Russian)

8. Litvinov, I.V. (1987), *Formirovaniye i preobrazovaniye atmosferykh osadkov na podstilyayushchey poverkhnosti* [The formation and transformation of precipitation on the land surface], Gidrometeoizdat, Leningrad. (in Russian)

9. Ivlev, L.S. and Dovgalyuk, Yu.A. (1999), *Fizika atmosferykh aerosolnykh sistem* [Atmospheric aerosol systems physics], NIIKH SPbGU, St. Petersburg. (in Russian)

10. Best, A.C. (1950), The size distribution of rain drops, *Quarterly Journal of Royal Meteorology Society*, Vol. 76, pp. 16–36.

11. Draganoiu, G., Lamarche, L. and McComber, P. (1996), "A computer model of glaze accretion on wires", *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Vol. 118, pp. 148–157.

12. Wang, P.K. and Pruppacher, H.R. (1977), Acceleration to terminal velocity of clouds and raindrops, *Journal of applied meteorology*, Vol. 16, pp. 275–280.

13. Bronshteyn, I.N. and Semendyayev, K.A. (1986), *Spravochnik dlya inzhenerov i uchashchikhsya vtuzov* [Guide for engineers and students of technical colleges], Nauka, Moscow. (in Russian)

14. DSTU GOST 8.524 (2009), *GSI. Tablitsy psikhometricheskiye. Postroyeniye, sodержaniye, raschetnyye sootnosheniya* [SSM. Psychrometric tables. Construction, maintenance, design relations], Kiev. (in Russian)

15. Kozlovskiy, O.A., Orlovych, A.Yu. and Klymenko, V.V. (2014), "An experimental investigation of unsteady thermal modes of non-isolated wire lines before icing process", *Zbirnyk naukovykh prats Kirovohradskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu*, Vol. 27, pp. 373–381. (in Ukrainian)

16. Vorobyev, V.I. and Kivganova, A.F. (1991), *Spetsializirovannyye prognozy pogody* [Specialized weather forecasts], LGMI, Leningrad. (in Russian)

17. Black, W.Z and Rehbery, R.L. (1985), Simplified model for steady state and real-time ampacity of overhead conductors, Vol. PAS-104, no. 10, pp. 2942–2953.

Стаття надійшла 25.06.2015.