

температуры в приповерхностном слое служит специальная скважина глубиной 20,5 м, которая также находится в здании VEC.

Исследования, проведенные в центрах VVP а MVP показывают, что изменения температуры в массиве горных пород происходят очень медленно и в малом объеме. В течение лета происходит регенерация температурного поля. Мониторинг изменений температуры вблизи поверхности (на территории VSB - TУO) показывает, что краткосрочные климатические эффекты (смена времен года) являются на глубине около 12 м незначительными.

**исследовательские участки, тепловой насос, скважины, Температурный профиль, возобновляемые источники энергии**

Одержано 17.11.15

УДК 621.315.175

**О.А. Козловський, викл., А.Ю. Орлович, проф., канд. техн. наук**

*Кіровоградський національний технічний університет, м. Кіровоград, Україна,*

*E-mail: kozlovskyioa@gmail.com*

## Математична модель прогнозування ожеледоутворення на проводах повітряних ліній електротрансмісії

Розроблено адаптивну модель прогнозування на основі ковзної лінійної регресії, що дозволяє визначати час утворення ожеледно-паморозевих відкладень на проводах повітряних ліній. Для оцінки надійності прогнозів отримано аналітичне рівняння фідучіальних меж. Виконано порівняльний аналіз результатів прогнозування отриманих за методами ковзної лінійної та лінійної регресії. Запропонована прогностична модель має достатню точність та надійність для розробки на її основі прогнозуючої системи технічного діагностування ожеледоутворення на проводах повітряних ліній електротрансмісії.

**повітряна лінія електротрансмісії, обледеніння проводів, прогнозування, динамічний ряд**

**А. А. Козловский, преп., А.Ю. Орлович, проф., канд. техн. наук**

*Кировоградский национальный технический университет, г. Кировоград, Украина*

**Математическая модель прогнозирования гололедообразования на проводах воздушных линий электропередачи**

Разработана адаптивная модель прогнозирования на основе скользящей линейной регрессии позволяет определять время гололедообразования на проводах воздушных линий. Для оценки надежности прогнозов получено аналитическое уравнение фидучиальных границ. Выполнен сравнительный анализ результатов прогнозирования полученных по методам скользящей линейной и линейной регрессии. Предложенная модель имеет достаточную точность и надежность для разработки на ее основе прогнозирующей системы технического диагностирования гололедообразования на проводах воздушных линий.

**воздушная линия электропередачи, обледенение проводов, прогнозирование, динамический ряд**

**Вступ.** Ожеледно-вітрові явища є однією з основних причин, що призводять до технологічних порушень у роботі повітряних ліній електротрансмісії енергопостачальних компаній України. На сьогодні запропоновано велику кількість активних методів захисту проводів (грозозахисних тросів) повітряних ліній від ожеледно-паморозевих відкладень (ОПВ). Практична реалізація конкретного способу

захисту залежить від багатьох факторів: класу напруги мережі, технічного стану повітряних ліній та обладнання підстанцій, потужності силових трансформаторів, тощо. Найбільш часто застосовується плавка ожеледі електричним струмом, що перевищує тривало допустимі значення і дозволяє досить швидко звільняти від ожеледно-паморозевих відкладень проводи повітряних ліній. У зв'язку з великою розгалуженістю та протяжністю електромереж, складністю збирання/розбирання схем плавки ожеледі у тяжких погодних умовах для її успішного проведення необхідна своєчасна і достовірна прогностична інформація про початок процесу ожеледоутворення на проводах повітряних ліній.

**Постановка проблеми.** У даний час про можливість утворення ожеледі енергопостачальні компанії попереджає Український гідрометеорологічний центр. При цьому використовуються метеорологічний і кліматичний методи прогнозування, але їх застосування для повітряних ліній є обмеженим із-за неможливості врахування специфіки процесів, що протікають при утворенні ожеледно-паморозевих відкладень на проводі. Тому в більшості випадків, електротехнічний персонал отримує інформацію про початок обледеніння проводів повітряних ліній електричних мереж із затримкою. Отже, питання розробки методів діагностування утворення ожеледно-паморозевих відкладень на проводах повітряних ліній електропередачі є актуальними.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Обледеніння проводів повітряних ліній електропередачі (ПЛЕ) залежить від великої кількості метеопараметрів та параметрів самого проводу [1, 2]. Тому використання існуючих динамічних моделей, на основі лінійних диференціальних рівнянь, пов'язане зі значними труднощами при технічній реалізації засобів короткострокового прогнозування обледеніння проводів. Найбільш придатним для цієї мети вважається інструментальний метод [3, 4], сутність якого полягає в періодичному контролі параметру діагностування і побудові на основі отриманих даних прогностичної моделі у режимі реального часу.

В інструментальних методах прогнозування обледеніння проводу за граничну умову появи ожеледі приймається рівність нулю предиканта:  $y = 0$ , а задача прогнозування заключається у пошуку дійсного кореня  $\tau_{ic}$  рівняння  $y = f(\tau) = 0$ , де  $\tau$  – поточний час. Найпростіше для цього використати будь-який метод пошуку кореня рівняння [5], але у даному випадку функція  $f(\tau)$  на момент побудови прогнозу ще не існує. У працях [3, 4] запропоновано екстраполювати  $f(\tau)$  лінійною функцією побудованою по двох останніх значеннях  $y_{i-1}, y_i$ , за умови, що вона околі точки  $y = 0$  лінійна, а  $y_{i-1}, y_i$  виміряні через однакові інтервали часу  $\Delta\tau$ :  $y_{i+1} - V_i\tau = 0$ , де  $V_i = (y_i - y_{i+1})/\Delta\tau$  – швидкість зміни предиканта  $y$ . Однак, функція  $f(\tau)$  у заданих межах, як правило, не лінійна. Тому такий прогноз буде не стійким, також неможливо визначити оцінку похибки з якою  $y_i$  наближає істинне значення кореня  $\tau_{ic}$ . Таким чином, для покращення якості прогнозів необхідно розглядати більшу передісторію вимірюваних значень, а їх сукупність – як дискретний динамічний ряд  $\{x_\tau\}$ .

У праці [6] доведено, що початок фазового переходу у термодинамічній системі «атмосферне повітря – провід» доцільно діагностувати за часом роботи джерела охолодження  $\tau_{fr}$  (за умови постійної потужності охолодження:  $P_{fr} = \text{const}$ ) при періодичному штучному охолодженні проводу до появи на ньому ожеледно-паморозевих відкладень.

**Постановка завдання.** Метою досліджень є розробка математичної моделі прогнозування часу ожеледоутворення на проводах повітряних ліній електропередачі

на основі аналізу дискретного динамічного ряду.

**Виклад основного матеріалу.** Дискретні динамічні ряди можливо розглядати з двох точок зору. У першому випадку послідовність рівнів ряду інтерпретується як реалізація деякого випадкового процесу і відповідна математична модель будується на основі апарата теорії випадкових процесів. У другому випадку вважається, що динамічний ряд складається із двох складових, перша із яких представляє собою квазидетерміновану функцію (тренд динамічного ряду) –  $\varphi_i = f(\tau_i)$ , а друга  $\varepsilon_i$  – є послідовністю незалежних, центрованих, випадкових величин, тобто

$$y_i = \varphi_i + \varepsilon_i, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (1)$$

де  $n$  – кількість рівнів динамічного ряду.

Математично, перша складова рівняння (1) приймається відомою з точністю до деякої сукупності невідомих параметрів  $\theta_0, \dots, \theta_q$ , що як правило лінійно входять у вираз тренду, а друга складова – є дискретним білим шумом.

У відповідності з другим підходом задача прогнозування часу утворення ОПВ на проводі ПЛЕ може бути сформульована так [5, 7]: нехай у результаті роботи вимірального перетворювача у рівновіддалені моменти часу  $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$  отримані рівні  $\tau_{fr.1}, \tau_{fr.2}, \dots, \tau_{fr.n}$  динамічного ряду  $\{\tau_{fr.\tau}\}$ , також задано певний клас функцій  $L = \{\varphi(\tau; \theta)\}$  де  $\theta = (\theta_1, \dots, \theta_i)$  – вектор довільних параметрів. Необхідно для будь-якого моменту часу  $\tau_m > \tau_n$  знайти найкращу (у певному сенсі) оцінку  $\hat{\tau}_{fr.m} = \varphi(\tau, \theta)$  майбутнього значення ряду  $\{\tau_{fr.\tau}\}$  як функцію  $\varphi(\tau, \theta)$  наявних спостережень  $\tau_{fr.1}, \tau_{fr.2}, \dots, \tau_{fr.n}$ .

Розв'язок поставленої задачі складається з наступних етапів [8, 9]:

- попередній аналіз даних і апріорної інформації про процес ожеледоутворення;
- вибір класу структур моделей-кандидатів;
- вибір методу оцінювання моделей-кандидатів і оцінка їх параметрів;
- розрахунок значення предиканта за отриманою моделлю процесу;
- оцінка точності та надійності отриманого прогнозу.

Параметр  $\tau_{fr}$  доцільно контролювати лише при попаданні температури повітря навколо проводу повітряної лінії електропередачі у діапазон  $-6...0^\circ\text{C}$ . При цій температурі найбільш ймовірно утворення небезпечних ОПВ на проводі.

Експериментальні дані свідчать [6], що при наближенні ожеледної ситуації помітно змінюється величина рівнів ряду  $\{\tau_{fr.\tau}\}$  – з'являється спадаючий тренд. Аналіз ефективності плавок ожеледі виявив, що необхідний горизонт прогнозування  $\tau_{f.h}$  складає не менше 2 годин. Інтервал між вимірюваннями  $\Delta\tau$  параметру  $\tau_{fr}$  обмежується постійною часу нагріву проводу ПЛЕ і повинен бути мінімальним, тобто  $\tau_{f.h} > \Delta\tau$ . Прогнозна модель має розроблятися в режимі реального часу і з появою кожного нового рівня  $\tau_{fr.\tau}$  необхідно проводити її оновлення (через проміжок часу  $\Delta\tau$ ).

Можливі варіації класів моделей отримуються за результатами візуального перегляду даних. Множина членів у рівняннях вибирається у відповідності з наявним об'ємом даних. Тобто, коли спостережень багато, можливо отримати відносно точну модель, якщо об'єм даних обмежений, неможливо побудувати дуже точну модель і,

отже, рівень її складності не може бути високим [9].

При розробці математичної моделі дискретного динамічного ряду  $\{\tau_{fr,\tau}\}$  велике значення має вибір класу функцій  $\varphi(x, \theta)$ , що використовуються для опису його детермінованої складової рівняння (1). Вдалий вибір цієї функції істотно впливає на обчислювальну простоту і точність розв'язку задачі [5].

Моделі зі стандартних параметричних класів є лише наближенням істинного процесу, але вони частково можуть відображати деякі нелінійні характеристики цього процесу, що дозволяє їм мати описову перевагу всередині вибірки над більш простими лінійними моделями. Незважаючи на це лінійні моделі володіють більшою гнучкістю. Навіть при повністю вірній специфікації нелінійної моделі із-за неточності оцінювання параметрів вона може давати прогнози більш низької якості, ніж проста лінійна модель, параметри якої оцінені точно. Це, в свою чергу, призводить до більш високої якості позавибіркового прогнозу [10].

Якщо в структурно-детермінованому динамічному ряді час тлумачити як екзогенну змінну, а рівні ряду – як значення ендогенної змінної, то формально модель (1) і модель регресії будуть еквівалентними [5]. Тоді для аналітичного опису експериментального ряду  $\{\tau_{fr,\tau}\}$  може бути використана лінійна модель регресії

$$\tau_{fr,\tau} = \beta_0 + \beta_1\tau + \varepsilon, \quad (2)$$

де  $\tau_{fr,\tau}$  – рівень ряду у момент часу  $\tau$ ;

$\beta_0, \beta_1$  – параметри;

$\varepsilon$  – випадкове відхилення.

У рівнянні (2) параметри  $\beta_0, \beta_1$  невідомі і визначити їх неможливо із-за відсутності всіх можливих комбінацій  $\tau_{fr,\tau}$  і  $\tau$ , а величина  $\varepsilon$  змінюється при кожному новому спостереженні. Однак, замінивши параметри  $\beta_0, \beta_1$  їх оцінками  $b_0, b_1$  отримаємо лінійне рівняння тренду ряду  $\{\tau_{fr,\tau}\}$

$$\hat{\tau}_{fr} = b_0 + b_1\tau. \quad (3)$$

При наближенні умов навколишнього середовища до природного ожеледоутворення тренд ряду  $\{\tau_{fr,\tau}\}$  стає стрімко спадаючим [6], а гіпотеза про незалежність вартості спостережень від часу виявляється сумнівною. У цьому випадку доцільно кожному рівню ряду надати вагу  $w_i$ , де  $i=1, 2, \dots, n$ . Тоді зважені оцінки найменших квадратів  $b_0, b_1$  параметрів  $\beta_0, \beta_1$  отримуються у результаті мінімізації функції  $Q = \sum_{i=1}^n w_i (\tau_{fr,i} - \hat{\tau}_{fr,i})^2$ , якщо ж оновлення оцінок параметрів проводиться лише по  $m$  останніх точках динамічного ряду  $\{\tau_{fr,\tau}\}$ , то вага  $i$ -го спостереження буде рівна [11]

$$w_i = \begin{cases} 1, & \text{якщо } i \in [n-m+1, n] \\ 0, & \text{інакше.} \end{cases}$$

Після диференціювання  $Q$  отримаємо систему нормальних рівнянь прямої

$$\left. \begin{aligned} b_0 \sum_{i=1}^n w_i + b_1 \sum_{i=1}^n w_i \tau_i &= \sum_{i=1}^n w_i \tau_{fr,i} \\ b_0 \sum_{i=1}^n w_i \tau_i + b_1 \sum_{i=1}^n w_i \tau_i^2 &= \sum_{i=1}^n w_i \tau_i \tau_{fr,i} \end{aligned} \right\}. \quad (4)$$

Розв'язавши систему (4) отримаємо коефіцієнти  $b_0$  та  $b_1$  [12]:

$$b_0 = \bar{\tau}_{fr.w} - b_1 \bar{\tau}_w; \quad b_1 = \frac{\sum_{i=1}^n w_i (\tau_{fr.i} - \bar{\tau}_w)(\tau_i - \bar{\tau}_w)}{\sum_{i=1}^n w_i (\tau_i - \bar{\tau}_w)^2}.$$

де  $\bar{\tau}_{fr.w}$ ,  $\bar{\tau}_w$  – середні значення:  $\bar{\tau}_{fr.w} = \sum_{i=1}^n w_i \tau_{fr.i} / \sum_{i=1}^n w_i$ ,  $\bar{\tau}_w = \sum_{i=1}^n w_i \tau_i / \sum_{i=1}^n w_i$ .

Ряд  $\{\tau_{fr.\tau}\}$  має лінійний тренд (3), тоді розв'язавши систему рівнянь

$$\left. \begin{aligned} \hat{\tau}_{fr} &= b_0 + b_1 \tau \\ \hat{\tau}_{fr} &= 0 \end{aligned} \right\},$$

отримаємо прогнозний час утворення ожеледно-паморозевих відкладень на проводі

$$\hat{\tau}_{ic} = \left( -\frac{b_0}{b_1} \right)^2.$$

Для оцінки надійності отриманого значення  $\hat{\tau}_{ic}$  визначимо ліву та праву  $100(1-\alpha)\%$ -ві фідучіальні межі, відповідно,  $\tau_L$  та  $\tau_R$  [13]. На рис. 1  $\tau_L$  це  $\tau$  – координата точки перетину прямої

$$\tau_{fr} = \hat{\tau}_{ic} = 0 \quad (5)$$

і кривої

$$\tau_{fr} = b_0 + b_1 \tau - ts \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{(\tau_L - \bar{\tau})^2}{S_{xx}}}, \quad (6)$$

де  $S_{xx}$  – сума квадратів відхилень, відносно загального середнього  $S_{xx} = \sum (\tau_i - \bar{\tau})^2$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ ;

$s^2$  – оцінка дисперсії відносно регресії, що базується на двох степенях свободи;

$t$  – звичайна відсоткова точка для  $t$  – критерію,  $t = t(v; 1-\alpha/2)$ ;

$v$  – число ступенів свободи для  $s^2$ .

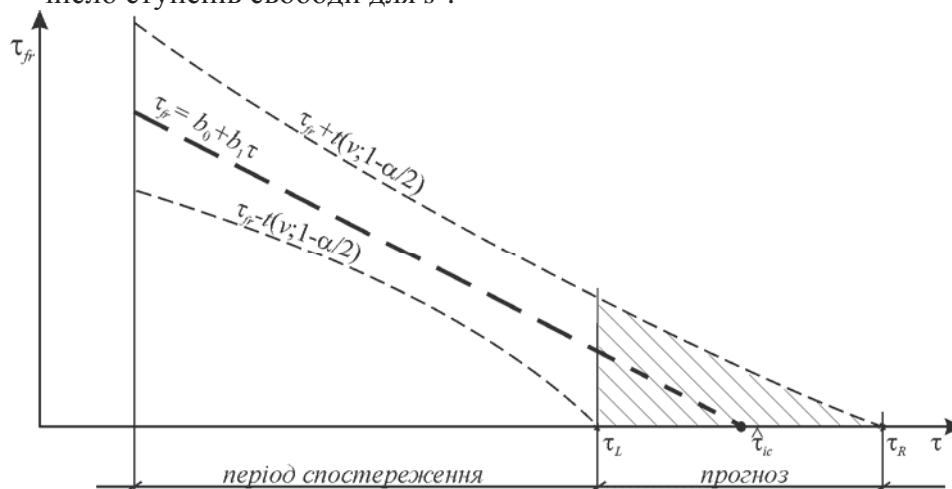


Рисунок 1 – Графічна інтерпретація  $100(1-\alpha)\%$ -вих фідучіальних меж

Прирівняємо вирази (5) та (6) і після перетворень отримаємо наступне квадратне рівняння відносно  $\tau_L$

$$p\tau_L^2 + 2q\tau_L + r = 0, \quad (7)$$

де  $p, q, r$  – коефіцієнти:

$$p = b_1^2 S_{xx} - t^2 s^2; \quad q = b_0 b_1 S_{xx} + t_2 s_2 \bar{\tau}; \quad r = b_0^2 S_{xx} - t^2 s^2 \left( \frac{S_{xx}}{n} - \bar{\tau}^2 \right).$$

Для  $\tau_R$  рівняння буде аналогічне (6), отже,  $\tau_L$  та  $\tau_R$  є коренями рівняння (7)

$$\left. \begin{matrix} \tau_L \\ \tau_R \end{matrix} \right\} = -\frac{q \pm \sqrt{q^2 - pr}}{p}.$$

Провівши ряд перетворень і спрощень (7), маємо

$$\left. \begin{matrix} \tau_L \\ \tau_R \end{matrix} \right\} = \frac{d\bar{\tau} + \frac{b_0}{b_1} \pm \frac{ts}{b_1} \sqrt{\frac{(b_0 + b_1\bar{\tau})^2}{S_{xx} b_1^2} - \frac{d-1}{n+k}}}{d-1}, \quad (8)$$

де  $d = t^2 s^2 / (b_1^2 S_{xx})$ .

Для отримання більш загального виразу де  $\tau_{fr}$  є середнім із  $k$  спостережень у (8) проведемо заміну  $1/n$  на  $1/n + 1/k$

$$\left. \begin{matrix} \tau_L \\ \tau_R \end{matrix} \right\} = \frac{d\bar{\tau} + \frac{b_0}{b_1} \pm \frac{ts}{b_1} \sqrt{\frac{(b_0 + b_1\bar{\tau})^2}{S_{xx} b_1^2} - \frac{d-1}{n+k}}}{d-1},$$

тоді при  $k=1$  отримаємо вираз для окремого, нового рівня ряду, а при  $k=\infty$  для істинного середнього значення.

Мінімальну кількість рівнів ряду необхідну для побудови рівняння тренду приблизно можливо визначити за виразом середньоквадратичної похибки лінії тренду [14]

$$s_{\hat{y}} = s_y \bar{K},$$

де  $s_y$  – середній квадрат відхилень фактичних значень від розрахункових;

$\bar{K}$  – деяка функція числа спостережень і періоду упередження

$$\bar{K} = \frac{s_{\hat{y}}}{s_y} = \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{3(n+2L-1)^2}{n(n^2-1)}}.$$

Параметр  $\bar{K}$  є певним критерієм похибки і виходячи із його значення можливо визначити мінімально-необхідну кількість рівнів ряду при заданому періоді упередження. Так, при упередженні прогнозу на один крок ( $L=1$ ) і не перевищенні середньоквадратичної похибки рівняння, вимірної в одиницях середньоквадратичного відхилення від тренду ( $\bar{K} \leq 1$ ) необхідна кількість рівнів ряду складе  $n_{\min} \approx 6$ .

Оцінка точності прогнозної моделі проводиться за фактичними значеннями прогнозованого показника. У якості оцінок точності прогнозів використані наступні:

- середня абсолютна похибка

$$MAE = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^n |\tau_{ic} - \hat{\tau}_{ic,i}|;$$

- середня абсолютна похибка у відсотках

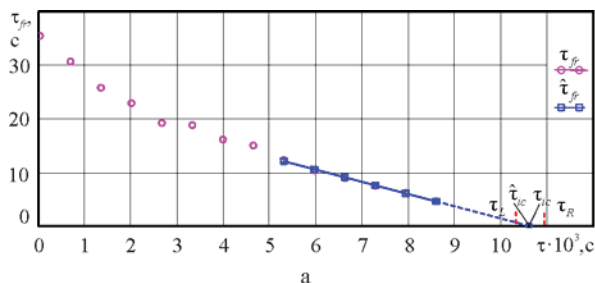
$$MAPE = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^n \left| \frac{\tau_{ic} - \hat{\tau}_{ic,i}}{\tau_{ic}} \right| 100\% ,$$

де  $m$  – кількість прогнозів.

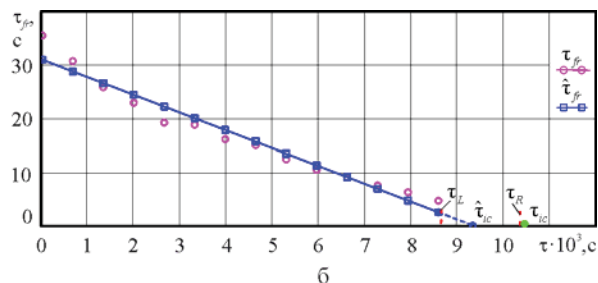
Тестування запропонованої прогнозної моделі проведено на основі експериментального дискретного динамічного ряду  $\{\tau_{fr,\tau}\}$  за умов фронтального обледеніння [6]. Для виконання порівняльного аналізу використано результати прогнозування за лінійною регресією (табл. 1, рис. 2, 3).

Таблиця 1 – Порівняння моделей за точністю прогнозування

№ прогнозу	Час упередження, с	Ковзна лінійна регресія				Лінійна регресія			
		MAE, с	MAPE, %	$\tau_L$ , с	$\tau_R$ , с	MAE, с	MAPE, %	$\tau_L$ , с	$\tau_R$ , с
1	7260	4060,1	38,4	5351,7	8597,2	4060,1	38,4	5351,7	8597,2
2	6600	3536,5	33,5	6255,0	10006,3	3812,6	36,1	5944,2	8731,4
3	5940	2876,9	27,2	7602,2	11550,4	3532,7	33,5	6492,2	9325,7
4	5280	2416,6	22,9	8299,9	11574,4	3313,6	31,4	6955,6	9359,5
5	4620	2084,2	19,7	8782,6	11399,1	3120,9	29,6	7350,6	9426,8
6	3960	1910,1	18,1	8967,0	10239,4	2943,6	27,9	7709,3	9588,0
7	3300	1727,4	16,4	9355,3	10694,7	2775,1	26,3	8042,2	9793,1
8	2640	1560,0	14,8	9521,6	11115,6	2613,4	24,7	8355,1	10020,6
9	1980	1389,9	13,2	10304,0	10922,7	2460,6	23,3	8635,6	10197,2
10	1320	1291,6	12,2	10636,6	11369,0	2311,2	21,9	8917,2	10488,0
11	660	1219,2	11,5	10794,4	11367,3	2167,8	20,5	9171,8	10640,5



а – ковзна лінійна регресія;



б – лінійна регресія

Рисунок 2 – Результати прогнозування при  $\Delta\tau = 660$  с,  $m = 11$  шт.

Із представлених результатів прогнозування видно, що при часі упередження 121 хв прогнози мають «задовільну» точність ( $20\% \leq MAPE \leq 50\%$ ), а при його

зменшенні до 80 хв – «хорошу» ( $10\% \leq MAPE < 20\%$ ), згідно класифікації [15]. Точність та надійність прогнозів покращується при наближенні термодинамічної системи «атмосферне повітря – провід» до точки природного ожеледоутворення.

**Висновки.** Розроблено адаптивну математичну модель прогнозування, що дозволяє визначати в умовах зміни структури даних час утворення ожеледно-паморозевих відкладень на проводі повітряної лінії електропередачі. Для оцінки надійності прогнозів отримано аналітичне рівняння фідучіальних меж. У результаті порівняльного аналізу якості прогнозів за середньою абсолютною похибкою та середньою абсолютною похибкою у відсотках, виявлено, що прогнози на основі ковзної лінійної регресії мають точність вищу ніж на основі лінійної регресії.

## Список літератури

1. Колмогорова И.М. Прогнозирование образования гололёда / И.М. Колмогорова, М.Ц. Цыбидоржиев, А.З. Винаров // Техника в сельском хозяйстве. – 1987. – № 5. – С. 13 – 15.
2. Тер-Мкртчян М.Г. Использование дискриминантного анализа для прогноза гололёда / М.Г. Тер-Мкртчян, А.И. Снитковский, Л.Е. Лукиянова // Труды Гидрометцентра СССР: сб. науч. тр. – 1971. – Вып. 90. – С. 3 – 39.
3. Колмогорова И.М. Разработка малой динамической модели прогноза гололёда / И.М. Колмогорова, М.Ц. Цыбидоржиев, А.З. Винаров // Рациональное проектирование и эксплуатация устройств сельского электроснабжения: сб. науч. тр. – Москва: Московский институт инженеров сельскохозяйственного производства им. В.Г. Горячкина, 1989. – С. 55 – 58.
4. Пат. 53235 Україна МКВ7, Н 02 G7/16. Спосіб прогнозування обледеніння дротів повітряних ліній електропередач / Козловський О.А., Орлович А.Ю.; заявник і патентовласник Кіровоградський державний технічний університет. – № 2002042886; заяв. 10.04.02; опубл. 15.01.03, Бюл. № 1.
5. Чураков Е.П. Математические методы обработки экспериментальных данных в экономике / Е.П. Чураков. – М.: Финансы и статистика, 2004. – 240 с.
6. Козловський О.А. Обґрунтування вибору параметру діагностування ожеледоутворення на проводах повітряних ліній розподільних електричних мереж / О.А. Козловський, А.Ю. Орлович, А.В. Некрасов // Електромеханічні і енергозберігаючі системи: щоквартальний науково-виробничий журнал. – Кременчук: КрНУ, 2015. – Вип. 3/2015 (31). – С. 149 – 157.
7. Вапник В.Н. Восстановление зависимостей по эмпирическим данным / В.Н. Вапник. – М.: Наука, 1979. – 447 с.
8. Бидюк П.И. Структурный анализ методик построения регрессионных моделей по временным рядам наблюдений / П.И. Бидюк, Т.Ф. Зворыгина // Управляющие системы и машины. – 2003. – №2. – С. 93 – 99.
9. Кашьяп Р.Л. Построение динамических стохастических моделей по экспериментальным данным / Р.Л. Кашьяп, А.Р. Рао; [под ред. В.С. Пугачева]. – М.: Наука, 1983. – 384 с.
10. Иццоки О. Выбор модели и парадоксы прогнозирования / О. Иццоки // Квантиль. – 2006. – №1. – С. 43 – 51.
11. Лукашин Ю.П. Адаптивные методы краткосрочного прогнозирования временных рядов / Ю.П. Лукашин. – М.: Финансы и статистика, 2003. – 416 с.
12. Себер Дж. Линейный регрессионный анализ / Дж. Себер; [пер. с англ. В.П. Носко; под ред. М.Б. Малютова]. – М.: Мир, 1980. – 456 с.
13. Дрейпер Н.Р. Прикладной регрессионный анализ / Норман Р. Дрейпер, Гарри Смит; [пер. с англ. М. Власенко, Р. Имамудинова]. – М.: Вильямс, 2007. – 912 с.
14. Чертырыкин Е.М. Статистические методы прогнозирования / Е.М. Чертырыкин – М.: Статистика, 1977. – 200 с.
15. Присенко Г.В. Прогнозування соціально-економічних процесів / Г.В. Присенко, Є.І. Райкович. – К.: КНЕУ, 2005. – 378 с.

**Oleksandr Kozlovskiy, lecturer, Anatolij Orlovich, Prof., PhD tech. sci.**

*Kirovograd national technical university, Kirovohrad, Ukraine*

### **Mathematical model predicting icing on the wires overhead lines**

The purpose of research is to develop a mathematical model of time predicting icing on wires overhead lines based on the analysis of discrete time series.

Developed adaptive forecasting model based on a rolling linear regression, allow appointing the time of ice and hoarfrost sediments formation on the transmission line wires in the changing data structures environment. For checking in assessing the reliability were founded the analytical equations of fiducial limits. As a result of benchmarking the average absolute error and mean absolute error in percentage found that forecasts based on a rolling linear regression with error in  $\approx 2$  times lower than on the basis of linear regression.

The proposed predictive model has sufficient accuracy and reliability for mathematically reasonable development on the basis of ice and hoarfrost sediments on wires overhead transmission lines technical predictive test system.

**overhead power lines, wires icing, prediction, time series**

Одержано 28.12.15

**УДК 681.5.015**

**В.О. Кондратець, проф., д-р техн. наук, О.М. Сербул, доц., канд. техн. наук**  
*Кіровоградський національний технічний університет, м.Кіровоград, Україна,*  
*E-mail:*

## Оптимізація точності прогнозування співвідношення руда/вода в кульовому млині з циркулюючим навантаженням

Вибір пристроїв вимірювання технологічних параметрів за похибкою можливо подати як задачу оптимізації відповідно методу динамічного програмування у три стадії, у кожній з яких обирається один з засобів. В процесі оптимізації при відносній похибці вимірювання витрати пульпи у пісковому жолобі  $\pm 3,0\%$  відносна максимальна похибка прогнозування співвідношення руда/вода склала  $1,72\%$  при визначенні витрати руди і води в млин з похибкою  $\pm 1,0\%$  порівняно з допустимою  $\pm 3,0\%$ .

**кульовий млин, співвідношення руда/вода, прогнозування, точність, оптимізація**

**В.А. Кондратец, проф., д-р техн. наук, А.Н. Сербул, доц., канд. техн. наук**  
*Кировоградский национальный технический университет, г. Кировоград, Украина*  
**Оптимизация точности прогнозирования соотношения руда/вода в шаровой мельнице с циркулирующей нагрузкой**

Выбор устройств измерения технологических параметров по ошибке возможно представить как задачу оптимизации в соответствии с методом динамического программирования в три стадии, в каждой из которых выбирается одно из средств. В процессе оптимизации при относительной погрешности измерения расхода пульпы в песковом желобе  $\pm 3,0\%$  относительная максимальная погрешность прогнозирования соотношения руда/вода составила  $1,72\%$  при определении расхода руды и воды в мельницу с погрешностью  $\pm 1,0\%$  сравнительно с допустимой  $\pm 3,0\%$ .

**шаровая мельница, соотношение руда/вода, прогнозирование, точность, оптимизация**

**Постановка проблеми.** Металургійна галузь України споживає значну частку сировини, яка отримана в процесах збагачення бідних залізних руд. У збагачувальній галузі для подрібнення руди крупністю  $0...25$  мм широко використовують кульові млини, що працюють у замкненому циклі з механічним спіральним класифікатором. На подрібнення руд споживається понад  $50\%$  загальних витрат електроенергії, призначеної для отримання кінцевої продукції – концентрату. Крім того, витрачається