

О.В. Бориченко¹, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0002-6127-2945В.П. Калінчик¹, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0003-4028-0185В.А. Побігійло¹, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0003-2673-7329Д.В. Філянін¹, канд. техн. наук, ORCID 0000-0003-3576-3633Д.В. Яценко¹, канд. техн. наук, ORCID 0000-0001-6702-569X¹Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ІНТЕРВАЛЬНЕ ПРОГНОЗУВАННЯ ПРОЦЕСУ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ

В роботі розглядається вирішення задачі інтервального прогнозування процесу електроспоживання. Показано, що ефективної роботи методів і алгоритмів прогнозування застосовуються такі критерії в оцінці якості реалізації короткострокового прогнозування електроспоживання: точність прогнозування; інтервальність; стійкість до помилок в даних; адаптивність моделі. Показано, що якість прогнозованої моделі значною мірою визначається її точністю, яка є мірою адекватності майбутнього процесу з його оцінкою. Показано, що спостереження за реальним процесом проводиться в умовах перешкод, ймовірність отримання абсолютно точного прогнозу є досить малою. В зв'язку з цим вводиться область прогнозованих значень процесу електроспоживання. Запропонована процедура інтервального прогнозування процесу електроспоживання для лінійної моделі, яка заснована на визначенні дисперсії помилки прогнозу.

Ключові слова: електроспоживання, прогнозування, точність, інтервальне прогнозування, дисперсія помилки прогнозу.

Вступ. Для ефективної роботи методів і алгоритмів прогнозування застосовуються наступні критерії в оцінці якості реалізації короткострокового прогнозування електроспоживання: точність прогнозування; інтервальність; стійкість до помилок в даних; адаптивність моделі.

Якість прогнозованої моделі значною мірою визначається її точністю, яка є мірою адекватності майбутнього процесу з його оцінкою.

Прогнози можна розподілити на дві групи: точкові - це такі прогнози, які фіксують єдине значення прогнозованого фактору; інтервальні - група яка фіксує два та більше можливих показів фактору прогнозу.

При правильно обраній прогнозній моделі, що відповідає детермінованій основі процесу, математичне очікування помилок прогнозу при нульовому математичному очікуванні перешкоди дорівнює нулю. Однак вид апріорно обраної моделі не завжди відповідає дійсності. Крім того, можливі такі зміни коефіцієнтів моделі, при яких може виникнути ситуація, коли за час, поки система забезпечить оцінку нової основи процесу з необхідною точністю, з'являються неприпустимо великі помилки прогнозу [1-4].

Метою роботи є визначення області прогнозованих значень процесу електроспоживання.

Викладення основного матеріалу.

З огляду на те, що спостереження за реальним процесом проводиться в умовах перешкод, ймовірність отримання абсолютно точного прогнозу є досить малою. У зв'язку з цим вводиться область прогнозованих значень процесу електроспоживання.

$$\hat{W}_j - t_q \sqrt{D(\delta)} \leq W_j \leq \hat{W}_j + t_q \sqrt{D(\delta)}, \quad (1)$$

де $D(\delta)$ – дисперсія помилки прогнозу.

Прогнозований процес можна представити моделлю виду

$$x(t) = f(\bar{a}, t) + \varepsilon_t, \quad (2)$$

помилка прогнозу в момент часу $t + \tau$ визначається

$$\delta_\tau(t) = x_\tau(t) - \hat{x}_\tau(t), \quad (3)$$

де $\hat{x}_\tau(t) = f(\hat{a}, t + \tau)$ – точковий прогноз.

У загальному вигляді, помилка прогнозу складається з двох складових

$$\delta_\tau(t) = \delta'_\tau(t) - \delta''_\tau(t), \quad (4)$$

де $\delta'_\tau(t) = f(\bar{a}, t + \tau) - f(\hat{a}, t + \tau)$ – помилка, спричинена неточністю оцінки коефіцієнтів моделі;

$\delta''_\tau(t) = \varepsilon_\tau(t)$ – помилка, спричинена наявністю перешкод у точці прогнозу.

В [5] наводиться оцінка коефіцієнтів моделі

$$\hat{a} = F^{-1}BW^2x(t), \quad (5)$$

де $F = BW^2W^TB^T$, B – матриця розміром $n \times N$ (n – число коефіцієнтів a_i ; N – кількість спостережень) значень вектора $\bar{t}$ при різних спостереженнях; W – діагональна матриця ваг розміром $N \times N$.

Матриця коваріацій коефіцієнтів моделі визначається [5]

$$\text{cov}(\hat{a}) = F^{-1}BW^2W^TB^TF^{-1}D(\varepsilon), \quad (6)$$

де $D(\varepsilon)$ – дисперсія перешкоди, оцінку якої можна отримати у вигляді

$$D(\varepsilon) = \frac{1}{N-n} \sum_{j=1}^n [x_j(t) - f_j(\bar{a}, t)]^2. \quad (7)$$

Позначивши в (6)

$$F^{-1}BW^2W^TB^TF^{-1} = \text{cov}(k) \quad (8)$$

отримаємо

$$\text{cov}(\hat{a}) = \text{cov}(k) D(\varepsilon). \quad (9)$$

Розкид значень коефіцієнтів моделі є причиною розкиду прогнозованих значень. Коваріаційна матриця прогнозованих значень процесу представлена у вигляді [5]

$$\text{cov}(\hat{x}) = B^TF^{-1}BW^4B^TD(\varepsilon), \quad (10)$$

звідки дисперсія прогнозу в j -й точці дорівнює

$$D(\hat{x}_j) = \bar{t}_j^T \text{cov}(\hat{a}) \bar{t}_j = \bar{t}_j^T \text{cov}(k) \bar{t}_j D(\varepsilon) \quad (11)$$

Як було показано вище (4), помилка прогнозу, крім розкиду прогнозу, буде викликана і наявністю перешкоди в точці прогнозу.

Дисперсія помилки прогнозу $D(\delta)$ дорівнює

$$D(\delta) = D(\hat{x}_j) + D(\varepsilon) = D(\varepsilon)(1 + \bar{t}_j^T \text{cov}(k) \bar{t}_j). \quad (12)$$

Тоді, область прогнозованих значень процесу при наявності перешкоди в точці прогнозу визначається

$$\hat{x}_j - t_q \sqrt{D(\delta)} \leq x_j \leq \hat{x}_j + t_q \sqrt{D(\delta)}. \quad (13)$$

Для лінійної моделі елементи матриці (8) визначаються

$$F^{-1} = \frac{\alpha^4}{\beta(1-\beta^4)} \begin{bmatrix} \beta(1+\beta) & \frac{\beta}{\alpha^2} \\ \frac{\beta}{\alpha^2} & \frac{1}{\alpha^2} \end{bmatrix}. \quad (14)$$

$$BW^4B^T = (1-\beta^{2N}) \begin{bmatrix} \frac{1}{1-\beta^2} & -\frac{\beta^2}{(1-\beta^2)\beta^2} \\ -\frac{\beta^2}{(1-\beta^2)\beta^2} & -\frac{\beta^2(1+\beta^2)}{(1-\beta^2)\beta^2} \end{bmatrix}. \quad (15)$$

Тоді

$$\text{cov}(k) = \frac{(1+\beta^N)(1-\beta)}{(1+\beta^N)(1+\beta)^3} \begin{bmatrix} 1+4\beta+5\beta^2 & 1+2\beta-3\beta^2 \\ 1+2\beta+3\beta^2 & 2(1-\beta)^2 \end{bmatrix}. \quad (16)$$

При $N \rightarrow \infty$

$$\text{cov}(k) = \frac{1-\beta}{(1+\beta)^3} \begin{bmatrix} 1+4\beta+5\beta^2 & 1+2\beta-3\beta^2 \\ 1+2\beta+3\beta^2 & 2(1-\beta)^2 \end{bmatrix}. \quad (17)$$

Дисперсія прогнозу в j -й точці, що відповідає $\bar{t}_j = t + \tau$, дорівнює

$$D[x_\tau(t)] = \frac{1-\beta}{(1+\beta)^3} \begin{bmatrix} 1+4\beta+5\beta^2 + \\ +2(1+2\beta-3\beta^2)\tau + \\ +2(1-\beta)^2\tau^2 \end{bmatrix} D(\varepsilon). \quad (18)$$

Введемо позначення

$$B(\tau) = \frac{1-\beta}{(1+\beta)^3} \begin{bmatrix} 1+4\beta+5\beta^2 + 2(1+2\beta-3\beta^2)\tau + \\ +2(1-\beta)^2\tau^2 \end{bmatrix}. \quad (19)$$

На рисунку1 наведено залежності коефіцієнта $B(\tau)$ від β при різних значеннях τ . З отриманих залежностей видно, що дисперсія прогнозу зростає зі збільшенням інтервалу випередження τ .

З урахуванням (19) перепишемо вираз (18) у вигляді

$$D[x_\tau(t)] = B(\tau)D(\varepsilon). \quad (20)$$

Дисперсія помилки прогнозу з урахуванням перешкоди в точці прогнозу визначається (див. вираз 12)

$$D(\delta) = D(\varepsilon)[1 + B(\tau)]. \quad (21)$$

Для лінійної моделі ($N = 2$) на підставі (7)

$$D(\varepsilon) = \frac{1}{N-2} \sum_{j=1}^n [x_j(t) - \hat{x}_j(t)]^2. \quad (22)$$

Підставивши (22) в (21), отримаємо

Дисперсія помилки прогнозу з урахуванням перешкоди в точці прогнозу визначається (див. вираз 12)

$$\begin{aligned} D(\delta) &= \frac{1}{N-2} \sum_{j=1}^n [x_j(t) - \hat{x}_j(t)]^2 [1 + B(\tau)] = \\ &= \frac{1}{N-2} \sum_{j=1}^n [x_j(t) - \hat{x}_j(t)]^2 \frac{1-\beta}{(1+\beta)^3} \left[\frac{1 + 4\beta + 5\beta^2}{+2(1 + 2\beta - 3\beta^2)\tau} + \frac{+2(1 - \beta)^2\tau^2}{+2(1 - \beta)^2\tau^2} \right]. \end{aligned} \quad (23)$$

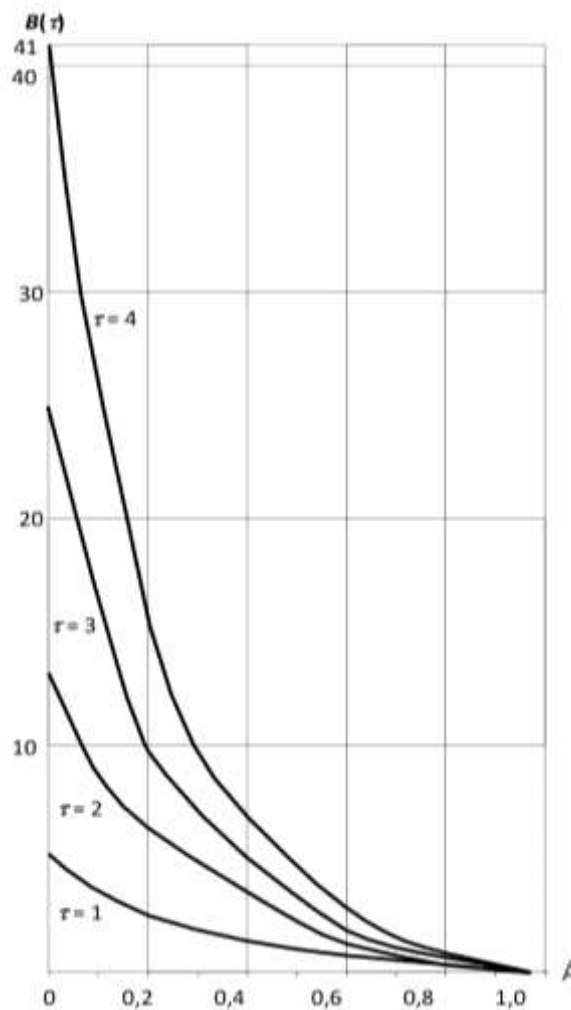


Рисунок1 - Залежність коефіцієнта $B(\tau)$ від β .

Таким чином, отримано вираз для визначення дисперсії помилок прогнозування для лінійної моделі.

Висновок. Для ефективної роботи методів і алгоритмів прогнозування застосовуються такі критерії в оцінці якості реалізації короткострокового прогнозування електроспоживання: точність прогнозування; інтервальність; стійкість до помилок в даних; адаптивність моделі. Зазначено, що якість прогнозованої моделі значною мірою визначається її точністю, яка є мірою адекватності майбутнього процесу з його оцінкою. Для підвищення точності прогнозу запропонована процедура інтервального прогнозування процесу електроспоживання для лінійної моделі, яка заснована на визначенні дисперсії помилки прогнозу.

O. Borychenko¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0002-6127-2945

V. Kalinchyk¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0003-4028-0185

V. Pobigaylo¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0003-2673-7329

D. Filyanin¹, Cand. Sc. (Eng.), ORCID 0000-0003-3576-3633

D. Yatsenko¹, Cand. Sc. (Eng.), ORCID 0000-0001-6702-569X

¹National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

INTERVAL FORECASTING OF THE PROCESS OF ELECTRICITY CONSUMPTION

The paper considers the solution of the problem of interval forecasting of electricity consumption. It is shown that the following criteria are used to evaluate the quality of short-term electricity consumption forecasting: forecasting accuracy; interval; resistance to data errors; model adaptability. It is shown that the quality of a forecasting model is largely determined by its accuracy, which is a measure of the adequacy of the future process with its assessment. It is shown that observation of the real process is carried out under conditions of interference, and the probability of obtaining an absolutely accurate forecast is quite low. In this regard, the range of predicted values of the electricity consumption process is introduced. A procedure for interval forecasting of the electricity consumption process for a linear model is proposed, which is based on determining the variance of the forecast error.

Keywords: electricity consumption, forecasting, accuracy, interval forecasting, forecast error variance. .

References

1. S. V. Buryi. Assessment of methods for forecasting electricity consumption by enterprises using the example of a coal mine/ S. V. Buryi, V. V. Khalimov// Scientific Works of VNTU. – 2014. - No. 2. Pp. 1-4.
2. N. Rapatsky. Classification of methods for forecasting electricity consumption/ . N. Rapatsky// Effective use of energy: status and prospects: collection of scientific works of the III All-Ukrainian Student Scientific and Practical Conference (November 9, 2023). – P. 340-342.
3. Storozhilova G. I. Influence of model parameters on the accuracy of electricity consumption forecasting at energy market facilities / G. I. Storozhilova, Ya. M. Demchik // Energy: economics, technologies, ecology: scientific journal. – 2016. – No. 3 (45). – P. 15–21.
4. Boiko S. M. Features of forecasting energy consumption levels in the conditions of distribution electrical networks of iron ore enterprises / S. M. Boiko, I. O. Sinchuk, A. P. Sinolitsy, E. O. Nesmashny, O. V. Dozorenko // Mining Herald. - 2019. - Issue 105. - P. 24-29
5. Determination of the dispersion of errors in the predicted values of the electricity consumption process / Kalinchik V. P., Galileiska A. N., Kalinchik I. V., Litvin T. I.; NTUU “KPI” NDI “Energiya.” – Kyiv, 2010. – 7 p.: ill. – Bibliography: 5 titles. – Ukrainian. – Deposited in the State Scientific and Technical Library of Ukraine on 15.03.2010, No. 2 – Uk 2010..

Надійшла: 04.11.2025

Received: 04.11.2025