

**В.П. КАЛІНЧИК, О.В. МЕЙТА, В.А. ПОБІГАЙЛО, В.В. КАЛІНЧИК, О.В. БОРИЧЕНКО,
А.М. КОПЧИКОВ**

УЗАГАЛЬНЕНА МОДЕЛЬ АДАПТИВНОГО ПРОГНОЗУВАННЯ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ ВИРОБНИЧИХ ОБ'ЄКТІВ

В статті досліджуються методи прогнозування електричного навантаження виробничих об'єктів. Показано, що найкращою є орієнтація на методи управління електроспоживанням, які засновані на дослідженні прогнозних оцінок, що становлять вихідну інформацію для прийняття рішень з управління. Показано, що основними вимогами, що пред'являються до прогнозних моделей, є досить висока точність прогнозування і простота алгоритмів. Показано, що в автоматизованих системах управління електроспоживання, внаслідок малої вивченості природи прогнозованого процесу, недостатньої достовірності вихідної інформації, найбільш доцільним є адаптивний підхід до конструювання моделей прогнозування. Адаптивні методи прогнозування і, в першу чергу, метод експоненціального згладжування слід поставити на перше місце з точки зору простоти реалізації і часу розрахунків. В роботі отримана узагальнена модель оперативного прогнозування електроспоживання, яка легко трансформується в модель експоненціального згладжування і може бути розширена для використання інших (крім поліноміальних) функцій. Показано, що стосовно до процесів з детермінованими поліноміальними основами узагальнена модель оперативного прогнозування дає той же результат, що і експоненціальне згладжування.

Ключові слова: електроспоживання, прогнозування, метод експоненціального згладжування, адаптивні методи прогнозування.

**V.P. KALINCHUK, O.V. MEITA, V.A. POBIGAYLO, V.V. KALINCHUK, O.V. BORYCHENKO,
O.M. KOPCHIKOV**

GENERALIZED MODEL OF ADAPTIVE FORECASTING OF ELECTRICITY CONSUMPTION MODES OF PRODUCTION FACILITIES

The article examines the methods of forecasting the electrical load of production facilities. It is shown that it is best to focus on the methods of power consumption management, which are based on the study of forecast estimates, which are the initial information for making management decisions. It is shown that the main requirements for forecasting models are fairly high accuracy of forecasting and simplicity of algorithms. It is shown that in automated power consumption management systems, due to the lack of study of the nature of the forecasted process, insufficient reliability of the source information, the most appropriate is an adaptive approach to the construction of forecasting models. Adaptive forecasting methods and, first of all, the method of exponential smoothing should be put first in terms of ease of implementation and calculation time. In the work, a generalized model of operational forecasting of electricity consumption was obtained, which is easily transformed into an exponential smoothing model and can be extended to use other (except polynomial) functions. It is shown that in relation to processes with deterministic polynomial bases, the generalized model of operational forecasting gives the same result as exponential smoothing.

Key words: power consumption, forecasting, exponential smoothing method, adaptive forecasting methods.

Вступ. Будь-який метод управління електроспоживанням містить два основні етапи: етап визначення величини можливого перевищення поточного електроспоживання над заданим та етап вироблення та реалізації керуючих впливів, спрямованих на ліквідацію загрози перевищення. Найкращою є орієнтація на ті методи, які засновані на дослідженні прогнозних оцінок, що становлять вихідну інформацію для прийняття рішень з управління.

Основною вимогою до систем реального часу є: досить висока точність оперативного прогнозування і простота алгоритмів, що забезпечує мінімальний час вирішення; робота в умовах невизначеної та недостатньої інформації; забезпечення стійкості керування.

В автоматизованих системах управління електроспоживання, внаслідок малої вивченості природи прогнозованого процесу, недостатньої достовірності вихідної інформації, найбільш доцільним є адаптивний підхід до конструювання моделей прогнозування [1-4]. Адаптивні методи прогнозування і, в першу чергу, метод експоненціального згладжування слід поставити на перше місце з точки зору простоти реалізації і часу розрахунків, що узгоджується з дослідженнями проведеними в роботах [5-10].

Метою роботи є формування узагальненої моделі адаптивного прогнозування електроспоживання виробничих об'єктів.

Викладення основного матеріалу. Представимо прогнозоване значення процесу в точці $(t+\Delta t)$ в вигляді

$$\hat{x}(t+\Delta t) = \tilde{f}_i^T(\Delta t)\hat{a}_i(t), \quad (1)$$

де $\hat{a}_i(t)$ – оцінка невідомих коефіцієнтів моделі $a_i(t)$.

У цьому випадку час для розрахунку значень функції $f_i(t)$ відраховується відносно поточного спостереження [7], тобто $f_i(t-j-t) = f_i(-j)$.

Оцінки коефіцієнтів $\hat{a}_i(t)$ знаходимо з умови мінімуму «зваженої» суми квадратів

$$\sum_{j=0}^l \omega_j^2 [x(t-j) - \tilde{f}^T(-j)\hat{a}(t)]^2 = \min. \quad (2)$$

Оцінки $\hat{a}(t)$, коли всі спостереження беруться з однаковою вагою, представляються у вигляді [8]

$$\hat{a} = c^{-1}B\bar{x}, \quad (3)$$

де \bar{x} – вектор-стовпець розміром $(W \times l)$ спостережень прогнозованого процесу, $B = \|f_{ij}\|$ – матриця розміром $(n \times l)$ значень елементів вектора $\tilde{f}(t)$ при різних t (в даному випадку $t=-j$), n – кількість функцій, N – кількість спостережень, а C – матриця, яка визначається

$$C = BB^T = \sum_{j=1}^N \tilde{f}(-j)\tilde{f}^T(-j). \quad (4)$$

Введемо в розгляд діагональну матрицю ваги W . Вираз (2) у матричному вигляді буде

© В.П. Калінчик, О.В. Мейта, В.А. Побігайло, В.В. Калінчик, О.В. Бориченко, А.М. Копчиков, 2023

$$\hat{e}^T W^2 e = (\bar{x}^T W - \hat{a}^T B W)(\bar{x}^T W - \hat{a}^T B W)^T, \quad (5)$$

де $\hat{e}(-j)$ похибка прогнозу, $\hat{e}(-j) = x(-j) - \hat{x}(-j)$.

Знаходження часткових похідних виразів (5) по \hat{a} приводить до системи лінійних рівнянь

$$\hat{a}^T B W W^T B^T = \hat{x}^T W W^T B^T, \quad (6)$$

звідки

$$\hat{a} = \bar{x}^T W W^T B^T F^{-1}, \quad (7)$$

де

$$F = B W W^T B^T = \sum_{j=1}^N \omega_j \bar{f}(-j) \bar{f}^T(-j). \quad (8)$$

Зробимо операцію трансформування виразу (7)

$$\hat{a} = F^{-1} B W^2 \bar{x}, \quad (9)$$

Вираз (9) представляє собою аналог виразу (3) з ваговими коефіцієнтами ω .

F^{-1} – елементи матриці F , що стоять на перетині i -го рядка і k -го стовпця представляються

$$F_{ik}(t) = \sum_{j=0}^t \omega_j^2 f_i(-j) f_k(-j). \quad (10)$$

Позначимо у виразі (9)

$$\bar{q} = B W^2 \bar{x}, \quad (11)$$

що представляє собою вектор стовпець розміром $(n \times 1)$, i -а складова якого має вигляд

$$q_i(t) = \sum_{j=0}^t \omega_j^2 f_i(-j) x(t-j). \quad (12)$$

Враховуючи, що коефіцієнти ω_j^2 та β^i в експоненціальному згладжуванні є вагою поточних спостережень, замінимо (10) і (11) у вигляді:

$$F_{ik}(t) = \sum_{j=0}^t \beta^j f_i(-j) f_k(-j), \quad (13)$$

$$q_i(t) = \sum_{j=0}^t \beta^j f_i(-j) x(t-j). \quad (14)$$

Вектор невідомих коефіцієнтів \hat{a} в цьому випадку оцінюється виразом

$$\hat{a}(t) = F^{-1}(t) \bar{q}(t), \quad (15)$$

а точковий прогноз в точці $(t+\Delta t)$ визначається

$$\hat{x}(t+\Delta t) = \bar{f}^T(\Delta t) \hat{a}(t) = \bar{f}^T(\Delta t) F^{-1}(t) \bar{q}(t). \quad (16)$$

Розглянута модель прогнозування є адаптивним згладжуванням в силу адаптації матриці $F(t)$ до наявної статистики.

Враховуючи зміну відліків, відповідні формули для визначення $F(t)$ і $\bar{q}(t)$ будуть визначатися з виразів:

$$F(t) = \sum_{j=0}^t \beta^j \bar{f}(-j) \bar{f}^T(-j) = F(t-1) + \beta^t \bar{f}^T(-t), \quad (17)$$

$$\bar{q}(t) = \bar{f}(0)x(t) + \sum_{j=0}^t \beta^j \bar{f}(-j)x(t-j). \quad (18)$$

Відомо [8], що поліноміальні, тригонометричні, експоненціальні функції, їх суми та добутки мають властивість

$$\bar{f}(t+1) = L \bar{f}(t), \quad (19)$$

де L – перехідна матриця розміром $(n \times n)$, а

$$\bar{f}(t) = L^{-1} \bar{f}(t+1).$$

Використовуючи (12) запишемо

$$\bar{q}(t-1) = \sum_{j=0}^{t-1} \beta^j f(-j)x(t-j-1). \quad (20)$$

Помножуючи обидві частини рівняння (19) на L^j , і враховуючи, що $f(-j-1) = L^{-1} f(-j)$, отримаємо

$$L^{-1} \bar{q}(t-1) = \sum_{j=0}^{t-1} \beta^j f(-j-1)x(t-j-1). \quad (21)$$

Помножуючи обидві частини отриманого виразу на ваговий коефіцієнт β так щоб

$$\sum_{j=0}^{t-1} \beta \beta^j \bar{f}(-j-1)x(t-j-1) =$$

$$= \sum_{j=1}^t \beta \bar{f}(-j)x(t-j),$$

і виходячи із виразу (17), отримаємо

$$q(t) = \bar{f}(0)x(t) + \beta L^{-1} \bar{q}(t-1). \quad (22)$$

Показано [6], що в усталеному режимі стан матриці $F(t)$ не залежить від часу тобто

$$F(t) = F(t-1) = const, \quad (23)$$

а коефіцієнти моделі розраховуються по формулі

$$\hat{a}(t) = F^{-1} \bar{q}(t), \quad (24)$$

а модель прогнозування (16) представляється у виді

$$\hat{x}(t+\Delta t) = \bar{f}^T(\Delta t) \hat{a}(t) = \bar{f}^T(\Delta t) F^{-1} \bar{q}(t) = \bar{\varphi}^T(\Delta t) \bar{q}(t) \quad (25)$$

де $\bar{\varphi}^T(\Delta t)$ – вектор-стовпець розміром $(n \times 1)$ коефіцієнтів, що залежить тільки від часу упередження. Даний коефіцієнт розраховується заздалегідь.

В [6-8] показано, що стосовно до процесів з детермінованими поліноміальними основами модель прогнозування (25) дає той же результат, що і експоненціальне згладжування.

Розглянемо лінійну модель прогнозу. Для зазначеної моделі

$$\bar{f}(t) = \begin{bmatrix} 1 \\ t \end{bmatrix}. \quad (26)$$

Відповідно до (13) та враховуючи, що $\beta = 1 - \alpha$ матриця $F(t)$ представляється у вигляді

$$F(t) = \sum_{j=0}^t \beta^j \begin{bmatrix} 1 & -j \\ -j & j^2 \end{bmatrix} = (1 - \beta^{t+1}) \begin{bmatrix} \frac{1}{\alpha} & -\frac{\beta}{\alpha^2} \\ -\frac{\beta}{\alpha^2} & \frac{\beta(1+\beta)}{\alpha^2} \end{bmatrix}. \quad (27)$$

Зворотна матриця $F^{-1}(t)$ для $N=(t+1)$ спостережень буде

$$F^{-1}(t) = \frac{\alpha^4}{\beta(1-\beta^N)} \begin{bmatrix} \frac{\beta(1-\beta)}{\alpha^3} & \frac{\beta}{\alpha^2} \\ \frac{\beta}{\alpha^2} & \frac{1}{\alpha} \end{bmatrix}. \quad (28)$$

Вектор $\bar{q}(t)$ відповідно до (14) визначається у вигляді

$$\bar{q}(t) = \sum_{j=0}^{N-1} \beta^j x(t-j) \bar{f}(-j) = \begin{bmatrix} \sum_{j=0}^{N-1} \beta^j x(t-j) \\ -\sum_{j=0}^{N-1} \beta^j j x(t-j) \end{bmatrix}. \quad (29)$$

Із [6] для N спостережень значення експоненціальних середніх $S_t^{(1)}$ і $S_t^{(2)}$ можна записати у вигляді

$$\left. \begin{aligned} S_t^{(1)} &= \alpha \sum_{j=0}^N \beta^j x(t-j) + \beta^N S_0^{(1)} \\ S_t^{(2)} &= \alpha^2 \sum_{j=0}^{N-1} (j+1) \beta^j x(t-j) + \beta^N (N+1) S_0^{(2)} \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

З урахуванням (30) вираз (29) запишеться у вигляді

$$\bar{q}(t) = \begin{bmatrix} \frac{1}{\alpha} (S_t^{(1)} - \beta^N S_0^{(1)}) \\ \frac{1}{\alpha^2} [\alpha (S_t^{(1)} - \beta^N S_0^{(1)}) + \beta^N (N+1) S_0^{(2)} - S_t^{(2)}] \end{bmatrix}. \quad (31)$$

Тоді, із виразу (15) коефіцієнт моделі

$$a'(t) = F^{-1}(t) \bar{q}(t) = \begin{bmatrix} \hat{a}_0(t) \\ \hat{a}_1(t) \end{bmatrix} = \frac{1}{1-\beta^N} \begin{bmatrix} 2S_t^{(1)} - S_t^{(2)} - 2\beta^N S_0^{(1)} + \beta^N (N+1) S_0^{(2)} \\ \alpha (S_t^{(1)} - S_t^{(2)}) - \beta^{N-1} S_0^{(1)} + \alpha \beta^{N-1} (N+1) S_0^{(2)} \end{bmatrix} \quad (32)$$

При досить великому часі спостережень t

$$\hat{a} = \begin{vmatrix} \hat{a}_0 \\ \hat{a}_1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 2S_t^{(1)} - S_t^{(2)} \\ \alpha (S_t^{(1)} - S_t^{(2)}) \end{vmatrix} \quad (33)$$

Вираз (33) точно збігається з виразом, наведеним у [3, 4, 6] для визначення коефіцієнтів у моделі експоненціального згладжування. Постійна згладжування β (або ваговий коефіцієнт) вибирається аналогічно постійному згладжуванню при експоненціальному згладжуванні.

Висновок. В роботі отримана узагальнена модель оперативного прогнозування, яка легко трансформується в модель експоненціального згладжування і може бути розширена для використання інших (крім поліноміальних) функцій.

Список літератури

1. Редкозубов С.А. Статистические методы прогнозирования в АСУ/ Редкозубов С.А. – М.: Энергоиздат, 1981. – 152 с.
2. Uri N.D. Peak load forecasting using on adaptive model / Uri N.D. - Eng. Opt. – 1979. – Vol.4. – p. 57 – 63.
3. Калінчик В. Модель адаптивного прогнозування режимів електроспоживання / Калінчик В./ Вісник ДУ „Львівська політехніка” – Проблеми економії енергії, - 1999, - № 2, С. 46 – 49.
4. В.П. Калінчик. Адаптивний підхід до прогнозування та управління електроспоживанням/ В.П. Калінчик, А.Л. Васильцов/ Управління енерговикористанням. Збірка доповідей. – Альянс за збереження енергії. – К.2002. – С. 425 -429.
5. В.П. Калінчик. Застосування статистичних методів прогнозування для планування електроспоживання/ В.П. Калінчик, В.В. Калінчик, Д.О. Мельник, К.А. Василенко/ Матеріали XXVI Міжнародної науково-практичної інтернет - конференції «Проблеми та перспективи розвитку сучасної науки в країнах Європи та Азії» – Переяслав-Хмельницький. – 2020.- С.167-169
6. Лукашин Ю. П. Адаптивные методы краткосрочного прогнозирования временных рядов/Лукашин Ю. П./ М.: Финансы и статистика, 2003. – 416 с.
7. Brown R.G. Smoothing, forecasting and prediction of discrete time series / R.G. Brown // Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, 1963. – 468 p.
8. Чуев Ю.В. Прогнозирование количественных характеристик процессов/ Чуев Ю.В., Михайлов Ю.Б., Кузьмин В.И. - М.: Сов. Радио, 1975. – 400 с.

Відомості про авторів / About the authors

Калінчик Василь Прокопович (Kalinchuk Vasyil Prokopovich) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України КПІ ім. Ігоря Сікорського, доцент кафедри електропостачання; м. Київ; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4028-0185>.

Мейта Олександр Вячеславович (Meita Aleksandr Vyacheslavovich) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації електромеханічних та мехатронних комплексів, Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» м. Київ; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4132-5202>.

Побігало Віталій Анатолійович (Pobigaylo Vitaliy Anatolievich) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України КПІ ім. Ігоря Сікорського, доцент кафедри електропостачання; м. Київ; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2673-7329>, e-mail: pobigaylo@gmail.com

Калінчик Віталій Васильович (Kalinchuk Vitaliy Vasylovych) – кандидат технічних наук, Національний технічний університет України КПІ ім. Ігоря Сікорського, старший викладач кафедри охорони праці та промислової та цивільно безпеки; м. Київ; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3931-646X>.

Бориченко Олена Володимирівна (Borychenko Olena Volodimirivna) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України КПІ ім. Ігоря Сікорського, доцент кафедри електропостачання; м. Київ; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6127-2945>; e-mail: borichenko_olena@ukr.net

Копчиків Олександр Миколайович (Korchikov Olexandr Mikolaievich) – Національний технічний університет України КПІ ім. Ігоря Сікорського, аспірант кафедри електропостачання; м. Київ.

9. В.П. Калінчик, О.В. Мейта, В.В. Калінчик, Ю.М. Чуняк. Адаптивні моделі прогнозування електричного навантаження виробничих споживачів// Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2022. - № 1. – С.46-56.
10. Forecasting of RES generation indicators. Kalinchuk, V., Buravliova, M., Pobihailo, V., Borychenko, O., Kalinchuk, V. 2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology, KhPI Week 2021 - Conference Proceedingsthis link is disabled, 2021, p. 445–448.

References (transliterated)

1. Redkozubov S.A. Statisticheskie metody prognozirovaniya v ASU. M.: Energoizdat, 1981. 152 p.
2. Uri N.D. Peak load forecasting using on adaptive model. Uri N.D. Eng. Opt. 1979. Vol.4. Pp. 57-63.
3. Kalinchik V. Model adaptivnogo prognozuvannya rezhimiv elektrospozhi-vannya. Visnik DU „Lvivska politehnika”. Problemi ekonomiyi energii, 1999, No 2, Pp. 46-49.
4. Kalinchik V.P., Vasilcov A.L.. Adaptivnij pidhid do prognozuvannya ta upravlinnya elektrospozhi-vannya. Upravlinnya energovikor-istanniam. Zbirka dopovidej. – Alyans za zberzhennya energii. Kiev. 2002. Pp. 425-429.
5. Kalinchik V.P., Kalinchik V.V., Melnik D.O., Vasilenko K.A. Zastosuvannya statistichnih metodiv prognozuvannya dlya planuvannya elektrospozhi-vannya. Materiali HHVI Mizhnarodnoyi naukovopraktichnoyi internet - konferenciyi «Problemi ta perspektivi rozvitku suchasnoyi nauki v krayinah Yevropi ta Aziji». Pereyaslav-Hmelnickij. 2020. Pp. 167-169
6. Lukashin Yu. P. Adaptivnye metody kratkosrochnogo prognozirovaniya vremennyh ryadov. M.: Finansy i statistika, 2003. 416 p.
7. Brown R.G. Smoothing, forecasting and prediction of discrete time series. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, 1963. 468 p.
8. Chuev Yu.V., Mihajlov Yu.B., Kuzmin V.I. Prognozirovanie kolichestvennyh harakteristik processov, M.: Sov. Radio, 1975. 400 p.
9. Kalinchik V.P., Mejta O.V., Kalinchik V.V., Chunyak Yu.M.. Adaptivni modeli prognozuvannya elektrichnogo navantazhennya vi-robnichih spozhivachiv. Energetika: ekonomika, tehnologiyi, ekologiya. 2022. No 1. Pp.46-56.
10. Kalinchuk, V., Buravliova, M., Pobihailo, V., Borychenko, O., Kalinchuk, V. Forecasting of RES generation indicators. 2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology, KhPI Week 2021 - Conference Proceedingsthis link is disabled, 2021, Pp. 445–448.

Надійшла (received) 27.03.23