

В.П. КАЛІНЧИК, В.А. ПОБІГАЙЛО, В.В. КАЛІНЧИК, О.В. МЕЙТА, О.В.БОРИЧЕНКО

КОМБІНОВАНІ МОДЕЛІ ПРОГНОЗУВАННЯ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ

В статті досліджуються моделі та методи прогнозування електричного навантаження. Показано, що серед відомих методів управління електроспоживанням перевага надається тим, які базуються на використанні прогнозних оцінок. Проведено аналіз робіт, присвячених питанням прогнозування процесів систем управління електроспоживанням промислових підприємств. Показано, що за основу для оперативного прогнозування навантажень систем електропостачання промислових підприємств доцільно використовувати адаптивні моделі. Аналіз адаптивних моделей прогнозування електроспоживання на основі методу експоненціального згладжування показав їх високу ефективність і хорошу пристосованість до змін процесу електроспоживання. Показано, що найбільшу складність при прогнозуванні представляють випадки стрибкоподібних змін у розвитку процесу. Стрибкоподібні зміни процесу можуть призвести до порушення раніше існуючих якісних співвідношень параметрів прогнозованої системи. Якщо стрибок представляє собою перехід прогнозованої системи з одного стійкого стану в інше, то модель експоненціального згладжування з корекцією постійної згладжування має найкращу пристосованість до такого роду змінам. У той же час зміни типу "імпульс" відпрацьовуються моделлю з певною затримкою, що призводить до збільшення середньоквадратичної помилки прогнозу. Тому реакція моделі на зміну сповільнюється. Для усунення зазначеної обставини пропонується процедура прогнозування на основі комбінованих моделей. В роботі розглянуто дві моделі комбінованого прогнозування - комбінована модель спільної обробки результатів прогнозування і комбінована модель селективного типу. Проведені експериментальні дослідження розглянутих моделей.

Ключові слова: електроспоживання, управління, прогноз, адаптивні моделі, комбіновані моделі.

V.P. KALINCHUK, V.A. POBIGAYLO, V.V. KALINCHUK, O.V. MEITA, O.V. BORYCHENKO

COMBINED MODELS OF ELECTRICITY CONSUMPTION

The article investigates models and methods of electric load forecasting. It is shown that among the known methods of power consumption management, preference is given to those based on the use of forecast estimates. The analysis of works devoted to the issues of forecasting the processes of power consumption management systems of industrial enterprises is carried out. It is shown that it is expedient to use adaptive models as a basis for operative forecasting of loads of power supply systems of industrial enterprises. Analysis of adaptive models of electricity consumption forecasting based on the method of exponential smoothing showed their high efficiency and good adaptability to changes in the process of electricity consumption. It is shown that the greatest difficulty in forecasting are cases of abrupt changes in the development of the process. Abrupt changes in the process can lead to a violation of pre-existing qualitative relationships of the parameters of the projected system. If the jump is the transition of the predicted system from one steady state to another, the model of exponential smoothing with correction of the constant smoothing has the best adaptability to this kind of change. At the same time, changes of the "pulse" type are worked out by the model with a certain delay, which leads to an increase in the standard error of the forecast. Therefore, the model's response to change slows down. To eliminate this circumstance, a forecasting procedure based on combined models is proposed. The paper considers two models of combined forecasting - a combined model of joint processing of forecasting results and a combined model of selective type. Experimental studies of the considered models are carried out.

Keywords: power consumption, control, forecast, adaptive models, combined models.

Вступ. В міру становлення і розвитку ринкових відносин в електроенергетиці поступово стане неможливим адміністративне примушення споживачів до підтримання необхідних для енергетики режимів використання електроенергії. В зв'язку з чим управління електроспоживанням за рахунок регулювання потужності споживачів-регуляторів [1-3] стає важливим фактором зменшення навантажень промислових підприємств. Як показали дослідження [1, 3], серед відомих методів управління електроспоживанням перевага надається тим, які базуються на використанні прогнозних (випереджуючих) оцінок. За основу для оперативного прогнозування навантажень систем електропостачання промислових підприємств доцільно використовувати адаптивні моделі [1, 4], що узгоджується із даними приведеного в [5] аналізу різних методів оперативного прогнозування. Аналіз методів прогнозування електроспоживання. На даний момент налічується більше 100 класів моделей прогнозування [6]. При чому, частина моделей і відповідних методів відносяться до окремих підходів прогнозування. Всі методи прогнозування поділяються на дві групи: інтуїтивні та формалізовані [7].

Інтуїтивне прогнозування застосовується в тих завданнях, коли об'єкт прогнозування або занадто простий, або, навпаки, дуже складний, тому неможливо врахувати вплив зовнішніх факторів.

Формалізовані методи можуть бути розділені на статистичні та структурні моделі прогнозування.

Суть статистичних моделей полягає в тому, що аналітично задаються як зовнішні фактори, так і функціональна залежність між майбутніми та фактичними значеннями часового ряду. Статистичні моделі представлені такими групами і використовуються в роботах:

- регресійні моделі. У роботах [8-10] регресійні моделі застосовані для прогнозування електричного навантаження енергосистеми, виробничих об'єктів і будівель.

- авторегресійні моделі. Даний метод використовується для короткострокового прогнозування електроспоживання в оперативному циклі з інтервалом попередження 5÷10 хвилин в роботах [11, 12].

- моделі експоненціального згладжування. Дані моделі були розроблені незалежно Хольтом і Брауном в середині ХХ століття [13, 14]. Метод експоненціального згладжування використовується в роботах [15-17] для прогнозування річного електроспоживання промислових підприємств, енергосистем.

Як показано [4], за основу для оперативного прогнозування електричного навантаження доцільно використовувати адаптивні методи експоненціального згладжування.

Метою роботи є обґрунтування адаптивного комбінованого підходу до прогнозування для вирішення задачі управління електроспоживанням.

Викладення основного матеріалу. Аналіз адаптивних моделей прогнозування електроспоживання на основі методу експоненціального згладжування показав їх високу ефективність і хорошу пристосованість до змін процесу електроспоживання.

Найбільшу складність при прогнозуванні представляють випадки стрибкоподібних змін у розвитку процесу. Стрибкоподібні зміни процесу можуть призвести до порушення раніше існуючих якісних співвідношень параметрів прогнозованої системи. При наявності стрибка дуже важливо оцінити викликано дане відхилення перешкодою або воно відбулося внаслідок зміни прогнозованого процесу. Якщо зміни викликані перешкодою, то необхідно її відфільтрувати. Якщо ж відхилення викликані зміною моделі, то поточні дані про процес представляють найбільшу цінність.

З точки зору швидкого відпрацювання стрибкоподібної зміни досить ефективною є модель експоненціального згладжування з високим значенням постійної згладжування. Однак ця модель сильно піддається впливу перешкод.

Якщо стрибок представляє собою перехід прогнозованої системи з одного стійкого стану в інше, то модель експоненціального згладжування з корекцією постійної згладжування має найкращу пристосованість до такого роду змінам. У той же час зміни типу "імпульс" відпрацьовуються моделлю з певною затримкою, що призводить до збільшення середньоквадратичної помилки прогнозу.

Поява стрибка призводить до більших помилок (позитивних) прогнозу, що в свою чергу веде до збільшення постійної згладжування. Однак при появі великих негативних помилок, згладжена помилка прогнозу по абсолютній величині зменшується і в результаті визначений параметр згладжування може виявитися навіть менше попереднього. Тому реакція моделі на зміну сповільнюється. Вказану обставину можна усунути шляхом усунути шляхом використання адаптивних моделей для сезонних даних [18]. Однак такі моделі прийняті тільки для даних з відомим параметром циклу.

Для усунення зазначеної обставини пропонується процедура прогнозування на основі комбінованих моделей. Комбіновані прогнози засновані на спільній обробці результатів прогнозування, отриманих різними математичними методами. Створення комбінованих математичних прогнозів у ряді випадків дозволяє підвищити точність прогнозу, а іноді є єдиним способом досягнення поставленого завдання [19].

У даній роботі розглядаються дві моделі комбінованого прогнозування.

Комбінована модель спільної обробки результатів прогнозування формується у вигляді

$$\hat{x}(t) = \sum_{i=1}^n \omega_i \hat{x}_i(t), \quad (1)$$

де $\hat{x}(t)$ – прогноз виконаний i -ю прогнозуючою системою ($i=1, \dots, n$), ω_i – вагові коефіцієнти i -ї прогнозуючої системи.

Причому $\sum_{i=1}^n \omega_i = 1$ – умова необхідна для вико-

нання умов незміщеності прогнозу (1).

З виразу (1) видно, що завдання отримання прогнозу зводиться до задачі відшукування коефіцієнтів ω_i , які забезпечують мінімальне значення дисперсії помилки комбінованого прогнозу.

Значення вагових коефіцієнтів ω_i отримуємо із виразу

$$\omega_i = \left(|e_i| \sum_{i=1}^n |1/e_i| \right)^{-1}, \quad (2)$$

Розглянемо приклад прогнозування за моделлю (1). В якості базових моделей використано наступних три моделі виду

$$\hat{x}_i(t) = \hat{a}_i = \alpha_i x(t) + (1 - \alpha_i) S_i(t-1),$$

В яких $\alpha_1=0,1$; $\alpha_2=0,5$; $\alpha_3=0,9$, тобто:

$$\hat{x}_1(t) = 0,1x(t) + 0,9S_1(t-1),$$

$$\hat{x}_2(t) = 0,5x(t) + 0,5S_2(t-1) = 0,5(x(t) + S_2(t-1))$$

$$\hat{x}_3(t) = 0,9x(t) + 0,1S_3(t-1).$$

Якщо помилка прогнозу дорівнює нулю, то обчислення ω_i не провадиться, а приймається $\omega_i = 1$.

Іншою розглянутою комбінованою моделлю є адаптивна комбінована модель (АКМ) селективного типу [20]. В АКМ селективного типу на кожному кроці організовано автоматичний вибір по заданому критерію найкращої моделі з числа, що входять в базовий набір. Таким чином, адаптація відбувається за структурою моделі та за її параметрами.

Найкраща модель вибирається відповідно до заданого критерію селекції. Найкращою вважається та модель, яка дала мінімальну абсолютну помилку прогнозу поточного члену ряду. Важливим фактором в АКМ селективного типу є вибір критерію селекції. В [20] пропонується два таких критерії.

Критерій К. Перемикання на дану модель здійснюється тоді, коли К її останніх прогнозів є найкращими в порівнянні з прогнозами за іншими моделями, що входять в базовий набір АКМ.

Критерій В. Перемикання на дану модель здійснюється тоді, коли її експоненціально згладжений квадрат помилки прогнозування В мінімальний в порівнянні з аналогічним показником для інших моделей в базовому наборі АКМ.

Критерій В формується наступним чином

$$B_i = (1 - \alpha_b) \cdot B_{i-1} + \alpha_b \cdot e_t, \quad (3)$$

де $0 < \alpha_b \leq 1$ – параметр згладжування; e_t – помилка прогнозу, зробленого в момент t .

У табл. 1 наведено приклад прогнозування електроспоживання з застосуванням АКМ селективного типу, які включають в себе три найпростіші моделі експоненціального згладжування з перемиканням за критерієм В, табл. 1.

Таблиця 1.

№ з/п	X_i	$\alpha = 0,1$		$\alpha = 0,5$		$\alpha = 0,9$		АКМ
		$\hat{x}_r(t)$	B_i	$\hat{x}_r(t)$	B_i	$\hat{x}_r(t)$	B_i	
1	100	100	0	100	0	100	0	100
2	102	100	2,4	100	2,4	100	2,4	100
3	101	100,2	1,34	101	0,96	101,8	1,34	100,2
4	100	100,28	0,58	101	0,98	101,8	1,24	101
5	103	100,25	4,77	100,5	4,14	100,11	5,5	100,25
6	105	100,53	14	101,75	8	102,7	5,37	101,75
7	104	101	11	103,4	3,42	104,77	2,5	104,77
8	120	101,3	214,4	103,7	161	104,1	152,8	104,1
9	121	103,2	287	111,9	114,1	118,4	65,2	118,4
10	119	105	232	116,5	49,4	120,7	27,8	120,7
11	120	106,4	204	117,8	22,7	119,2	11,2	119,2
12	123	107,8	220	118,9	19,2	120	10	120
13	122	109,3	185	121	8,28	122,7	4,3	122,7
14	125	110,6	198	121,5	10,7	122,1	6,8	122,1
15	110	112	81,6	123,3	110,5	124,7	132,4	124,7
16	110	111,8	34,6	116,7	71,1	111,5	34,3	111,8
17	111	111,6	14,3	113,4	32	110,2	22,1	111,6
18	110	111,5	7,07	112,2	15,7	111	9,44	111,5
19	112	111,35	3,1	111,1	6,8	110,1	0	111,35
20	111	111,4	1,34	111,6	3	111,8	2,4	111,4

Виділені – прогноз по АКМ.

Для вказаного прикладу СКП $\bar{\epsilon}^2 = 26,4$, тоді як СКП для моделей експоненціального згладжування з адаптацією α $\bar{\epsilon}^2 = 42,3$.

Висновки. Кращою представляється орієнтація на методи управління електроспоживанням, які ґрунтуються на дослідженні прогнозних оцінок, що складають вихідну інформацію для прийняття рішень по управлінню. За основу для оперативного прогнозування навантажень систем електропостачання промислових підприємств доцільно використовувати адаптивні моделі і, зокрема, моделі експоненціального згладжування. Експериментальні дослідження показали, що застосування адаптивних комбінованих моделей в багатьох випадках при їх простоті дає очевидну перевагу перед іншими моделями

Список літератури:

1. Праховник А.В., Калінчик В.П., Карцелін Є.Р. Методи і засоби управління споживанням електричної енергії. *Proceedings of the International seminar "The Efficiency Use of Energy in Metallurgy"*, June 1999, Varna, Bulgaria, Pp. 374-383
2. Каханович В.С. Сравнение методов управления электропотреблением. *Изв. вузов СССР. Энергетика*. 1986. № 10. С.18-23.
3. Праховник А.В., Калінчик В.А. Управление электрическим навантаженням. *Управление энергоиспользования. Сборка доповідей. Альянс за збереження енергії*. К.: 2002. С. 225 -230.
4. Калінчик В.П., Васильцов А.Л. Адаптивный підхід до прогнозування та управління електроспоживанням. *Управление энергоиспользования. Сборка доповідей. Альянс за збереження енергії*. К.: 2002. С. 425 -429.
5. Калінчик В.П., Калінчик В.В., Мельник Д.О., Василенко К.А. Застосування статистичних методів прогнозування для планування електроспоживання. *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. Тихонов Э.Е. *Методы прогнозирования в условиях рынка: учебное пособие*. Невинномысск: Северо-Кавказский ГТУ, 2006. 221 с.
7. Чучуева И.А. *Модель прогнозирования временных рядов по выборке максимального подобия : дис. ... канд. тех. наук: 05.13.18*. Москва, 2012. 153 с.
8. Винославский В.Н., Праховник А.В., Бондаренко А.Ф. Прогнозирование электропотребления производственных объектов.

Энергетика и электрификация. 1974. № 5. С. 30-31.

9. Лапинский Г.С., Майрансаев З.Р. Однофакторные регрессионные модели прогнозирования электропотребления промышленных предприятий. *Известия ЮФУ*. 2013. № 5. С. 241-246.
10. Freire R. Z., Gustavo H.C. Oliveira, Nathan Mendes Development of regression equations for predicting energy and hydrothermal performance of buildings. *Energy and Buildings*. 2008. № 40. Pp. 810-820.
11. Валь П.В., Торопов А.С. Прогнозирование электропотребления с использованием авторегрессионного метода. *Сборник трудов XVI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии»*. Томск: ТПУ, 2010. С. 23-24.
12. Праховник А.В., Розен В.П., Дегтярев В.В. *Энергосберегающие режимы электроснабжения горнодобывающих предприятий*. Москва: Недра, 1985. 232 с.
13. Brown R.G. *Smoothing, forecasting and prediction of discrete time series*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, 1963. 468 p.
14. Brown R.G., Meyer R.F. The fundamental theorem of exponential smoothing. *Operation research*. 1961. Vol.9. № 5. Pp. 673-685.
15. Holt C.C. Forecasting trends and seasons by exponentially weighted moving averages. *O.N.R. Memorandum 52, Carnegie Inst. of Technology*. 1957. № 2.
16. Надтока И.И. *Развитие теории и методов моделирования и прогнозирования электропотребления на основе данных средств автоматизации учета и телеизмерений : дис. ... канд. тех. наук: 05.14.02*. Новочеркасск, 1998. 346 с.
17. Bindu R., Chindri M., Pop G.V. Day-Ahead Load Forecasting Using Exponential Smoothing. *Scientific Bulletin of the Petru Maior University of Tirgu Mures*. Vol. 6. 2009. Pp. 89-93.
18. Feuer A. Forecasting With Adaptive Gradient Exponential Smoothing. *The bell system technical journal*. Vol. 62. 1983. No. 8. P. 2561-2580.
19. Чуев Ю.В., Михайлов Ю.Б., Кузьмин В.И. *Прогнозирование количественных характеристик процессов*. Москва: Советское радио. 1975. 400 с.
20. Лукашин Ю.П. *Адаптивные методы краткосрочного прогнозирования временных рядов*. Москва: Финансы и статистика, 2003. 415 с.

References (transliterated):

1. Prakhovnyk A.V., Kalinchyk V.P., Karcelin Je.R. Metody i zasoby upravlinnja spozhyvannjam elektrichnoji energiji. *Proceedings of the International seminar "The Efficiency Use of Energy in Metallurgy"*, June 1999, Varna, Bulgaria, Pp. 374-383
2. Kahanovich V.S. Sravnenie metodov upravlenija elektropotrebleniem. *Izv. vuzov SSSR. Energetika*. 1986. no 10. Pp. 18-23.
3. Prakhovnyk A.V., Kalinchyk V.A. Upravlinnja elektrichnym navantazhennjam. *Upravlinnja energhovykorystannja. Zbirka dopovidej. Aljans za zberezhennja energhiji*. Kyiv: 2002. Pp. 225-230.
4. Kalinchyk V.P., Vasylyjcov A.L. Adaptivnyj pidkhd do proghnozuvannja ta upravlinnja elektrospozhyvannjam. *Upravlinnja energhovykorystannjam. Zbirka dopovidej. Aljans za zberezhennja energhiji*. Kyiv: 2002. Pp. 425-429.
5. Kalinchyk V.P., Kalinchyk V.V., Meljnyk D.O., Vasylenko K.A. Zastosuvannja statystychnykh metodiv proghnozuvannja dlja planuvannja elektrospozhyvannja. *Materialy KhKhVI Mizhnarodnoji naukovo-praktychnoji internet - konferenciji «Problemy ta perspektivy rozvytku suchasnoji nauky v krajinhakh Jevropy ta Aziji»*. Perejaslav-Khmelnjncykij. 2020. Pp. 167-169.
6. Tihonov Je.E. *Metody proghnozuvannja v uslovijah rynku: uchebnoe posobie*. Nevinnomysk: Severo-Kavkazskij GTU, 2006. 221 p.
7. Chuchueva I.A. *Model proghnozuvannja vremennyh rjadov po vyborke maksimal'nogo podobija : dis. ... kand. teh. nauk: 05.13.18*. Moskov, 2012. 153 p.
8. Vinoslavskij V.N., Prahovnik A.V., Bondarenko A.F. Proghnozuvanie jelektropotreblenija proizvodstvennyh ob'ektov. *Jenergetika i jelektifikacija*. 1974. no 5. Pp. 30-31.
9. Lapinskij G.S., Majransaev Z.R. Odnofaktornye regressiionnye modeli proghnozuvannja jelektropotreblenija promyshlennyh predprijatij. *Izvestija JuFU*. 2013. no 5. Pp. 241-246.
10. Freire R. Z., Gustavo H.C. Oliveira, Nathan Mendes Development of regression equations for predicting energy and hydrothermal performance of buildings. *Energy and Buildings*. 2008. no 40. Pp. 810-820.
11. Val' P.V., Toropov A.S. Proghnozuvanie jelektropotreblenija s ispol'zovaniem avtoregressiionnoho metoda. *Sbornik trudov XVI Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii studentov, aspirantov i molodyh uchenyh «Sovremennye tehnika i tehnologii»*.

- Tomsk: TPU, 2010. Pp. 23-24.
12. Prahovnik A.V., Rozen V.P., Degtjarev V.V. *Energoberegajushhie rezhimy elektroobzhenija gornodobyvajushhih predpriyatij*. Moskva: Nedra, 1985. 232 p.
 13. Brown R.G. *Smoothing, forecasting and prediction of discrete time series*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, 1963. 468 p.
 14. Brown R.G., Meyer R.F. The fundamental theorem of exponential smoothing. *Operation research*. 1961. Vol.9. no 5. Pp. 673–685.
 15. Holt C.C. Forecasting trends and seasonals by exponentially weighted moving averages. *O.N.R. Memorandum 52, Carnegie Inst. of Technology*. 1957. no 2.
 16. Nadtoka I.I. *Razvitie teorii i metodov modelirovanija i prognozirovanija jelektropotreblenija na osnove dannyh sredstv avtomatizacii ucheta i telezmerenij : dis. ... kand. teh. nauk: 05.14.02*. Novocherkassk, 1998. 346 p.
 17. Bindiu R., Chindri M., Pop G.V. Day-Ahead Load Forecasting Using Exponential Smoothing. *Scientific Bulletin of the Petru Maior University of Tirgu Mures*. Vol. 6. 2009. Pp. 89-93.
 18. Feuer A. Forecasting With Adaptive Gradient Exponential Smoothing. *The bell system technical journal*. Vol. 62. 1983. No. 8. P. 2561-2580.
 19. Chuev Ju.V., Mihajlov Ju.B., Kuz'min V.I. *Prognozirovanie kolichestvennyh harakteristik processov*. Moskva: Sovetskoe radio. 1975. 400 p.
 20. Lukashin Ju.P. *Adaptivnye metody kratkosrochnogo prognozirovanija vremennyh rjadov*. Moskva: Finansy i statistika, 2003. 415 p.

Поступила (received) 20.03.22

Відомості про авторів / About the Authors

Калінчик Василь Прокопович (Kalinchuk Vasyl Prokopovich) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України КПІ ім. Ігоря Сікорського, доцент кафедри електропостачання; м. Київ, тел.: (067) 209-87-26.

Побігайло 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; тел.: (097) 308-88-95.

Калінчик Віталій Васильович (Kalinchuk Vitaliy Vasilivich) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України КПІ ім. Ігоря Сікорського, доцент кафедри охорони праці та промислової життєдіяльності; м. Київ, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3931-646X>; тел.: (067) 209-87-26.

Бориченко Олена Володимирівна (Borychenko Olena Volodimirivna) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України КПІ ім. Ігоря Сікорського, доцент кафедри електропостачання; м. Київ; тел.: (066) 787-83-85.

Мейта Олександр Володимирович (Meita Aleksandr Vladimirovich) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації електромеханічних та мехатронних комплексів, Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» м. Київ; тел.: (097) 139-88-48.