

ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES

УДК 621.311.153

DOI 10.20535/1813-5420.1.2022.259179

Калінчик В.П., канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000 - 0003- 4028- 0185

Мейта О.В., канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0002-4132-5202

Калінчик В.В., канд. техн. наук, ORCID 0000 - 0003- 3931- 646X

Чуняк Ю.М., ORCID 0000 - 0002- 4506 – 912X

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

АДАПТИВНІ МОДЕЛІ ПРОГНОЗУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ ВИРОБНИЧИХ СПОЖИВАЧІВ

В статті досліджуються моделі та методи прогнозування електричного навантаження. Показано, що на даний час відомі наступні методи управління електроспоживанням: по миттєвій нормі; по ідеальній нормі; управління по прогнозній величині; управління з використанням усередненої потужності на рухомому інтервалі часу (метод «рухомого вікна»). Показано, що кращою представляється орієнтація на ті методи, які засновані на дослідженні прогнозних оцінок, що складають вихідну інформацію для прийняття рішень з управління. Основною вимогою, що пред'являються до систем реального часу є: достатньо висока точність оперативного прогнозування та простота алгоритмів, що забезпечує мінімальний час рішення; робота в умовах невизначеної і недостатньої інформації, забезпечення стійкості управління. Проведено аналіз робіт, присвячених питанням прогнозування процесів систем управління електроспоживанням промислових підприємств. Показано, що автоматизовані системи управління пред'являють специфічні вимоги до математичних методів прогнозу через малу вивченості природи прогнозованого параметра, малого обсягу звітної статистики та недостатньої достовірності вихідної інформації і найбільш точно відповідає таким вимогам, адаптивний підхід до конструювання методів. Адаптивний підхід дозволяє вирішувати проблему адекватності методу об'єкту прогнозування і з точки зору простоти реалізації і часу розрахунків на перше місце слід поставити адаптивні методи прогнозування і, в першу чергу, метод експоненціального згладжування. Експоненціальне згладжування, розглянуте у даній роботі в якості прогнозної моделі, дозволяє виявити неадекватність моделі реальному процесу і наблизити оцінку детермінованої основи процесу до дійсної, тобто зменшити помилку прогнозу. Однак для цього необхідний час, який збільшується із зростанням зміни коефіцієнтів моделі. У зв'язку з цим виникає завдання регулювання швидкості реакції прогнозованої моделі на зміну її коефіцієнтів. Розглянуто і проаналізовано ряд методів автоматичного регулювання параметра згладжування: еволюційний метод адаптації, методи з використанням слідкуючого сигналу, методи адаптації параметра шляхом, оптимізація з використанням градієнтного згладжування. Показано, що метод адаптації використанням слідкуючого сигналу простий і особливо цінний для моделювання рядів з короткою історією. З причини своєї простоти, цей метод особливо зручний там, де прогнози робляться за допомогою засобів обчислювальної техніки. Дослідження даної моделі прогнозування на статистичних даних, отриманих на різних підприємствах показали, що модель адаптується до реальних даних вже на 4-6 кроці прогнозування і далі помилка прогнозу не перевищує 2%. Аналіз адаптивних моделей прогнозування 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 існуючих раніше якісних співвідношень параметрів прогнозованої системи. При наявності стрибка дуже важливо оцінити чи викликано дане відхилення перешкодою чи воно сталося 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 параметра згладжування. Однак ця модель сильно схильна до впливу перешкод. Для усунення зазначеної обставини запропонована модифікована процедура корекції параметрів моделі прогнозування. Процедура основана на введенні логічного оператора, який заснований на аналізі суперечливості прогнозів і накладає додаткові обмеження на зміну параметра згладжування і на величини вихідної статистики. Проведені експериментальні дослідження розглянутих моделей.

Ключові слова: електричне навантаження, управління, прогноз, адаптивні моделі, експоненціальне згладжування.

Вступ. Управління електричним навантаженням промислових об'єктів за рахунок виділених споживачів-регуляторів стає важливим у вирівнюванні графіків навантажень енергосистем і відповідно підвищення техніко-економічних показників.

На промислових підприємствах, як правило, можливе дискретне відключення виділених навантажень споживачів-регуляторів. Можливість плавної зміни потужності навантажень зустрічається досить рідко. Диспетчерське або автоматичне управління електроспоживанням підприємства передбачає відключення певної величини навантаження при загрозі перевищення заданого максимуму і відновлення навантаження при зникненні такої загрози. Встановлено три черги відключення: першу становлять найменш потрібні з технологічної та іншої точок зору споживачі; другу - навантаження, що відключають із найменшим збитком для підприємства, і третю - навантаження допустимі для відключення з погляду технологічного процесу. Можуть бути й інші варіанти, які допустимі індивідуально для кожного підприємства.

На даний час відомі наступні методи управління електроспоживанням: по миттєвій нормі; по ідеальній нормі; управління по прогнозній величині; управління з використанням усередненої потужності на рухомому інтервалі часу (метод "рухомого вікна").

Системи управління із прогнозом вважаються найкращими, так як вони забезпечують найбільш повне використання заданого максимуму потужності та енергії.

Метою роботи є аналіз та вибір із відомих методів прогнозування електричного навантаження найбільш підходящого для вирішення задачі управління електроспоживанням.

Аналіз методів прогнозування електроспоживання. Будь-який метод управління містить два основних етапи: етап визначення можливих величин і етап вироблення і реалізації керуючих впливів. Кращою представляється орієнтація на ті методи, які засновані на дослідженні прогнозних оцінок, що складають вихідну інформацію для прийняття рішень з управління.

Принцип управління по прогнозу показаний на рисунку 1.

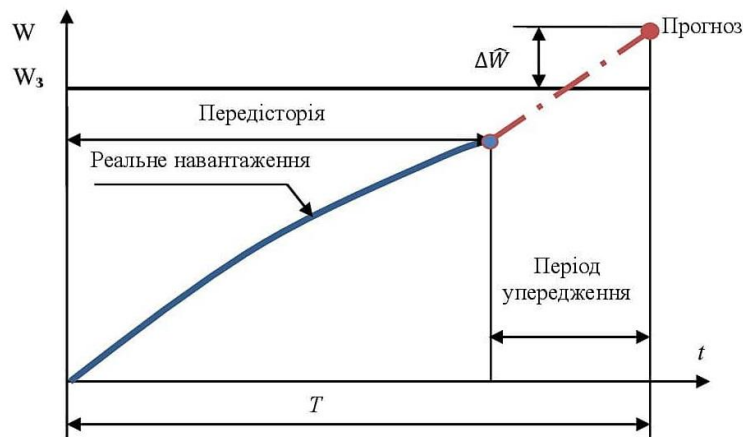


Рисунок 1 – Управління електроспоживанням по прогнозу

Основною вимогою, що пред'являються до систем реального часу є: достатньо висока точність оперативного прогнозування та простота алгоритмів, що забезпечує мінімальний час рішення; робота в умовах невизначеної і недостатньої інформації, забезпечення стійкості управління.

У вітчизняній та зарубіжній літературі є значний обсяг робіт, присвячених питанням прогнозування процесів систем управління електроспоживанням промислових підприємств. В аналізованих літературних джерелах використовуються різні математичні методи прогнозування.

Так, в роботі [1-4] при прогнозуванні процесів застосований статистичний метод з використанням лінійної множинної регресії. У роботі [5] прогнозування випадкового процесу здійснено на основі розкладання його в гармонійний ряд і застосування фільтра Калмана з урахуванням кореляції між шумами в моделі.

Імовірнісні методи моделювання при прогнозуванні застосовані в [6,7]. В роботі [8] при прогнозуванні використаний метод спектрального аналізу. Для 10 хвилинного короткострокового прогнозування з інтервалом попередження 5хвилин в роботах [9-12] використовуються авторегресійних і динамічні моделі з застосуванням фільтра Калмана.

Метод рухомої середньої для короткострокового прогнозування застосований в [10].

Для прогнозування часових рядів у роботі [13] використовується метод Бокса-Дженкінса. При цьому довжина передісторії становить більше 70 рівнів часового ряду, для модифікованого методу - до 25

значень. Потрібно відзначити, що і модифікований метод досить складний і вимагає великого обсягу обчислень при його реалізації.

У роботі [14] застосовано метод селекції для прогнозування часових рядів. Визначено клас у складі 58 моделей, що найбільш повно відображають динаміку зміни параметра. Даний метод забезпечує високу точність прогнозування. Однак він не може задовольняти системам реального часу за швидкістю, обсягом пам'яті та складності.

Алгоритми прогнозування на базі байєсівських процедур розглядаються в [15]. Для зниження викидів використовуються окремі процедури і алгоритм управління ними базується на методах прогнозування в темпі процесу.

Процедура розпізнавання образів використовується для прогнозу в [16]. Принцип складання прогнозу полягає в тому, що знаходиться середнє арифметичне значення з тих значень, які увійшли до результуючий клас. Зазначена процедура ефективна тільки для здійснення прогнозів з глибокої передісторією з використанням потужних засобів обчислювальної техніки.

У роботах [3,9,17] прогнозування ведеться з урахуванням метеорологічних і виробничих факторів, враховуються сезонні зміни параметрів. При цьому, використовуються методи гармонічного аналізу, рухомої середньої, експоненціального згладжування, авторегресійних моделі.

Для короткострокового прогнозу в роботі [18] застосовано поліноміальні моделі. Застосуванню методу експоненціального згладжування присвячені роботи [19-25].

Якість прогнозу за методом експоненціального згладжування істотно залежить від вибору постійної згладжування. З одного боку, для збільшення ваги найбільш пізніх спостережень необхідно підвищувати величину постійної згладжування. З іншого боку, для зменшення впливу перешкод постійна згладжування повинна бути малою. Видно, що ці дві вимоги знаходяться у протиріччі. Це протиріччя усувається при використанні адаптивних методів короткострокового прогнозування.

Як показано в [26-28], автоматизовані системи управління пред'являють специфічні вимоги до математичних методів прогнозу внаслідок малої вивченості природи прогнозованого параметра, малого обсягу звітної статистики та недостатньою достовірності вихідної інформації.

Найбільш точно відповідає вимогам, які пред'являються до оперативних систем прогнозу, адаптивний підхід до конструювання методів. Адаптивний підхід дозволяє вирішувати проблему адекватності методу об'єкту прогнозування [28].

Метод екстраполяції звичайних регресійних кривих вже містить певний елемент адаптивності, коли з кожним новим отриманням даних параметри регресійних кривих перераховуються. Через досить великий проміжок часу може бути замінений навіть тип кривої. Однак у таких моделях ступінь адаптації незначна. Швидкість адаптація можна збільшити за допомогою вагових коефіцієнтів, що зменшуються геометрично. Однак громіздкий перерахунок параметрів регресійних кривих з отриманням кожної нової точки вимагає повторного залучення у процедуру обчислень всього обсягу інформації, що веде до значного збільшення обсягу оперативної пам'яті обчислювального пристрою.

Застосування динамічних моделей для вирішення завдань поставлених у цій роботі важко в силу їх великої складності і необхідності досить значних статистичних даних.

Застосування оптимальних фільтрів для прогнозування (фільтри Вінера-Хопфа, Калмана) пов'язане з громіздкими обчислювальними операціями і необхідністю зберігання значного обсягу статистичних даних.

Прогнозування з використанням поліномів певної міри не може адекватно відобразити досліджуваний процес. У зв'язку з цим необхідно, щоб обрана модель дозволяла, як можна точніше описувати поточні дані про процес і могла бути перебудована при зміні процесу в часі, тобто модель прогнозу повинна адаптуватися по ходу зміни процесу.

При оперативному прогнозі необхідна ступінь чутливості методу до різного роду змін прогнозованого показника.

Переваги тих чи інших методів прогнозування [29] визначаються в основному часовими характеристиками програм і точністю прогнозів. При цьому можна показати [30], що адаптивний метод фільтра Калмана, експоненціальне згладжування, метод авторегресії для одновимірних процесів зводяться один до одного, і можна знайти відповідні співвідношення між дисперсією шуму динаміки в марківській моделі і в моделі авторегресії та параметром згладжування в методі експоненціального згладжування. Тому точність названих методів навряд чи буде істотно відрізнятися [30]. Тим часом з точки зору простоти реалізації і часу розрахунків на перше місце слід поставити адаптивні методи прогнозування і, в першу чергу, метод експоненціального згладжування, що узгоджується з дослідженнями проведеними в роботах [19-25].

Використання експоненціального згладжування для прогнозування електроспоживання. Експоненціальне згладжування засноване на тому, що прогнозоване значення функції може бути виражено рядом Тейлора [31]:

$$x_{t+\tau} = \sum_{k=0}^n \frac{\tau^k \cdot x_t^{(k)}}{k!} = \sum_{k=0}^n \frac{\tau^k \cdot a_{k+1}}{k!}. \quad (1)$$

Експоненціальна середня довільного p -го порядку визначається як

$$S_t^{[p]} = \alpha \cdot S_t^{[p-1]} + \beta \cdot S_{t-1}^{[p]}, \quad (2)$$

де $\beta = 1 - \alpha$, $p = 1, 2, \dots, n$, $S_0^{[1]}, S_0^{[2]}, \dots, S_0^{[n]}$ – початкові значення експоненціальних середніх.

Виходячи з фундаментальної теореми експоненціального згладжування і прогнозування, доведеною Р. Брауном і Р. Майером [20], коефіцієнти a_0, a_1, \dots, a_{n+1} прогнозуючого полінома пов'язані з експоненціальними середніми співвідношенням

$$\tilde{S}_t = M \cdot \tilde{a}_t \quad (3)$$

де \tilde{S}_t – вектор-стовпець розміром $(p \times 1)$ згладжених значень параметра, \tilde{a}_t – вектор-стовпець розміром $[(n+1) \times 1]$ коефіцієнтів в розкладанні Тейлора, M – матриця розміром $[p \times (n+1)]$.

Вектор невідомих коефіцієнтів з урахуванням (3) знаходиться за формулою

$$\tilde{a}_t = M^{-1} \cdot \tilde{S}_t \quad (4)$$

де M^{-1} – матриця, зворотна матриці M .

При прогнозуванні процесів системи управління охороною праці передбачається, що тренд представляється поліномом і спостерігається при наявності шуму, тобто

$$x_t = \hat{x}_\tau(t) + \varepsilon_t \quad (5)$$

де ε_t – білий шум, а прогнозна модель має вигляд

$$\hat{x}_\tau(t) = \sum_{i=0}^n \hat{a}_i t^i \quad (6)$$

Оцінки невідомих коефіцієнтів \hat{a}_i поліноміальної моделі знаходять з виразу (6).

Якість прогнозуючої моделі в значній мірі визначається її точністю, яка є мірою адекватності майбутнього процесу з його оцінкою. Враховуючи, що спостереження за реальним процесом проводиться в умовах перешкод, вірогідність отримання абсолютного точного прогнозу дуже мала. У зв'язку з цим вводиться область прогнозованих значень процесу

$$\hat{W}_j - t_q \sqrt{D(\delta)} \leq W_j \leq \hat{W}_j + t_q \sqrt{D(\delta)}, \quad (7)$$

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

Адаптація параметра згладжування. При правильно обраній прогнозній моделі, що відповідає детермінованій основі процесу, математичне очікування помилок прогнозу при нульовому математичному очікуванні перешкоди дорівнює нулю. Проте вигляд апріорно обраної моделі не завжди відповідає дійсному. Крім того, можливі такі зміни коефіцієнтів моделі, при яких може виникнути ситуація, коли за час, поки система забезпечить оцінку новій основі процесу з необхідною точністю, з'являється неприпустимо великі помилки прогнозу [32].

Експоненціальне згладжування, розглянуте у даній роботі в якості прогнозної моделі, дозволяє виявити неадекватність моделі реальному процесу і наблизити оцінку детермінованої основи процесу до дійсної, тобто зменшити помилку прогнозу. Однак для цього необхідний час, який збільшується із зростанням зміни коефіцієнтів моделі. У зв'язку з цим виникає завдання регулювання швидкості реакції прогнозованої моделі на зміну її коефіцієнтів.

Відомо ряд методів автоматичного регулювання параметра згладжування: методи з використанням слідкуючого сигналу, методи адаптації параметра шляхом еволюції [31], оптимізація з використанням градієнтного згладжування [33].

Суть еволюційного методу адаптації, запропонованого У. Чоу, полягає в тому, що використовується три значення параметра: високе, нормальне, низьке, тобто:

$$0,05 \leq \alpha - h, \quad \alpha, \quad \alpha + h \leq 0,95, \quad (8)$$

де $h=0,05$ – крок еволюції параметра; α – нормальне значення параметра; $(\alpha - h)$ – низьке значення параметра; $(\alpha + h)$ – високе значення параметру.

Ці значення спочатку вибираються довільно, а потім модифікуються в міру просування моделі у часі. Недоліком методу У. Чоу є те, що на кожному кроці обчислюються три прогнози, в результаті кількість даних оброблюваних системою значно збільшується. При цьому швидкість адаптації незначна.

Метод градієнтного експоненціального згладжування заснований на градієнтному пошуку мінімального середньоквадратичного відхилення (СКВ). Якщо СКВ $E[e^2(t)]$ представлено як функція від α , то можна обчислити градієнт

$$\nabla = \frac{\partial E[e^2(t)]}{\partial \alpha}, \quad (9)$$

де $e(t) = x(t) - \hat{x}(t)$ – помилка прогнозу.

Постійну згладжування $\hat{\alpha}$ можна модернізувати як

$$\hat{\alpha}(t+1) = \hat{\alpha}(t) - \mu \nabla, \quad (10)$$

де $\mu > 0$ – постійна згладжування.

Формула (10) і представляє собою метод градієнтного пошуку.

Умова (9) визначає вибір α , при цьому передбачається, що якщо $|\alpha|$ близько до 1, то значення $\mu \leq 0$, а конвергенція - повільна.

До недоліків даного методу варто віднести досить громіздкий обсяг обчислень.

Метод прогнозування з використанням слідкуючого контрольного сигналу для адаптації параметра згладжування, запропонований Д. Трігом і А. Лічом [34,35].

Вироблення керуючого впливу засновано на розрахунку слідкуючого сигналу помилки згладжування. $Q(t)/\Delta(t)$. Згладжені помилки прогнозу $Q(t)$ і абсолютне відхилення $\Delta(t)$ визначаються з виразів:

$$Q(t) = \gamma \cdot e(t) + (1 - \gamma) \cdot Q(t - 1), \quad (11)$$

$$\Delta(t) = \gamma|e(t)| + (1 - \gamma)\Delta(t - 1), \quad (12)$$

де $e(t)$ – помилка прогнозу; γ – згладжуюча константа.

Очевидно, що слідкуючий сигнал $Q(t)/\Delta(t)$ укладений між -1 і $+1$.

Для введення "автоматичного" зворотного зв'язку пропонується в якості постійної згладжування використовувати модуль слідкуючого сигналу, тобто

$$\alpha(t) = \left| \frac{Q(t)}{\Delta(t)} \right|. \quad (13)$$

Стратегія такої адаптації заснована на тому, що збільшення постійної згладжування здійснюється, коли слідкуючий сигнал, збільшуючись, підвищує значення останнього, з часового ряду параметра, що дозволяє системі швидко реагувати на зміну процесу і стежити за новим сигналом. Таким чином, має місце негативна зворотній зв'язок.

Розглянутий метод адаптації простий і особливо цінний для моделювання рядів з короткою історією. З причини своєї простоти, цей метод особливо зручний там, де прогнози робляться за допомогою засобів обчислювальної техніки. Дослідження даної моделі прогнозування на статистичних даних, отриманих на різних підприємствах [35] показали, що модель адаптується до реальних даних вже на 4-6 кроці прогнозування і далі помилка прогнозу не перевищує 2%. Тому інтервал випередження на один крок повинен бути $\Delta t = (T - \theta)/4 \div 6$.

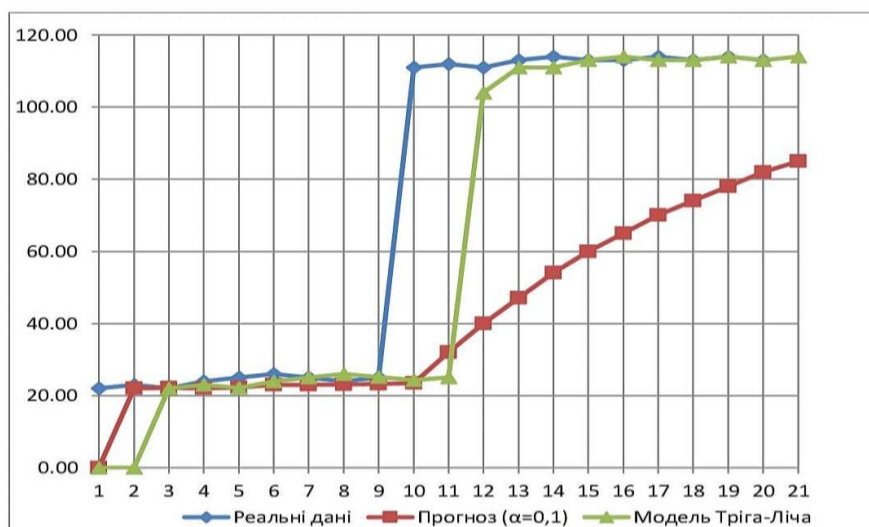


Рисунок 2 – Результати прогнозування електричного навантаження за моделями експоненціального згладжування без адаптації α і з адаптацією α (модель Тріга-Ліча)

На рисунку 2 показані результати прогнозування електричного навантаження. Дослідження показали, що середньоквадратична помилка (СКП) прогнозування із застосуванням моделі без адаптації для $\alpha=0,1$ становить $e^2 = 42$ тоді як СКП із застосуванням моделі з адаптацією α становить $e^2 = 18$, що підтверджує перевагу останньої.

Модифікована процедура адаптації параметрів моделі прогнозування. Аналіз адаптивних моделей прогнозування 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 існуючих раніше якісних співвідношень параметрів прогнозованої системи. При наявності стрибка дуже важливо оцінити викликано дане відхилення перешкодою чи воно сталося 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 параметра α . Однак ця модель сильно схильна до впливу перешкод.

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

Поява стрибка призводить до великих помилок (позитивних) прогнозу, що в свою чергу веде до збільшення $Q(t)$ і $\Delta(t)$ і, як наслідок, до збільшення параметра $\alpha(t)$. Проте при появі великих негативних помилок, згладжена помилка прогнозу $Q(t)$ за абсолютною величиною зменшується і в результаті визначений параметр $\alpha(t)$ може виявитися навіть менше попереднього. Тому реакція моделі на зміну $\alpha(t)$ сповільнюється. Вказана обставина може бути усунена шляхом використання адаптивних моделей для сезонних даних [36]. Однак такі моделі прийнятні лише для даних з відомим параметром циклу.

Для усунення зазначеної обставини запропонована модифікована процедура корекції параметрів моделі прогнозування.

Процедура основана на введенні логічного оператора $\nabla(t)$, який накладає додаткові обмеження на зміну параметра $\alpha(t)$ і на величини вихідної статистики, тобто на величини $Q(t)$ і $\Delta(t)$.

Для нормального закону розподілу розкид прогнозованих параметрів визначається відповідно до вираження (10). Дані далеко віддалені від середнього значення вважаються абсолютно випадковими або вказують на зміну характеру розвитку процесу.

Відповідно до [32] суперечливим вважається прогноз, для якого виконується нерівність

$$|x(t) - \hat{x}(t)| > \beta \sqrt{\bar{e}^2(t)}, \quad (14)$$

де β – табличний коефіцієнт, $\bar{e}^2(t)$ – середньоквадратична помилка прогнозу.

Проте критерій (31) при визначенні суперечливості прогнозу не завжди може дати позитивний результат особливо при прогнозуванні стрибків. Наявність стрибків представляє собою перехід системи з одного стійкого стану в інше. Причому вихідну інформацію для прогнозування таких процесів слід отримувати з систем більш низького рівня. Це означає, що на окремих ділянках при наявності стрибків допускається зміна параметрів моделі прогнозування у відповідних межах.

Відповідно до [32] на початку вихідної статистики слід використовувати функції з запізнілих аргументом, тобто критерій суперечливості прогнозів набуде вигляду.

$$|x(t) - \hat{x}(t)| > \beta \sqrt{\bar{e}^2(t-1)}. \quad (15)$$

Стрибок в параметрах прогнозуючої системи розглядається як втрата стійкості системи і перехід її до нового стійкого стану.

Показником стійкості прогнозуючої системи слід вважати отримання несуперечливих прогнозів. Індикатором суперечливості прогнозу, його якості є середньоквадратична помилка.

В адаптивних моделях прогнозу середньоквадратична помилка є основою для переходу прогнозуючої системи з одного стійкого стану в інше. Однак як статистику показник $\bar{e}^2(t)$ для нестійких станів системи слід виключити. Тобто для всіх k суперечливих прогнозів в якості статистики слід приймати $\bar{e}^2(t-k)$.

Суть розглянутої процедури модифікації параметра згладжування α полягає в наступному. Для визначення згладженої помилки прогнозу $Q(t)$ і згладженого абсолютного відхилення $\Delta(t)$ вводиться додатковий вираз доповнений логічним оператором $\nabla(t)$.

$$\nabla(t) = \begin{cases} 1, \text{ якщо } |e(t)| \leq \beta \sqrt{\bar{e}^2(t-1)}, \\ 0, \text{ якщо } |e(t)| > \beta \sqrt{\bar{e}^2(t-1)}. \end{cases} \quad (16)$$

Причому в процесі адаптації моделей параметри $Q(t)$ і $\Delta(t)$ обчислюються з урахуванням логічного оператора $\nabla(t)$. Після отримання $k+1$ -го несуперечливого прогнозу оператор $\nabla(t)$ виключається з розрахунків.

На рисунку 3 показані результати прогнозування електричного навантаження за моделями Тріга – Ліча і модифікованою моделлю адаптації α . Дослідження показали, що модель Тріга – Ліча адаптується до реальних даних на 4-5 кроці прогнозування, модифікована модель адаптується до реальних даних вже на 2 кроці, причому середньоквадратична помилка (СКП) прогнозування із застосуванням моделі Тріга – Ліча $e^2 = 28$ тоді як СКП із застосуванням модифікованої моделі становить $e^2 = 17$.

Ефективність адаптивної моделі прогнозування електричного навантаження за модифікованою моделлю адаптації α підтверджена дослідженнями проведеними в роботах [37,38].



Рисунок 3 – Результати прогнозування електричного навантаження за моделями Тріга-Ліча і модифікованою моделлю адаптації α

Висновки.

На підставі проведеного аналізу показано, що будь-який метод управління містить два основних етапи: етап визначення можливих величин і етап вироблення і реалізації керуючих впливів. Кращою представляється орієнтація на ті методи, які засновані на дослідженні прогнозних оцінок, що складають вихідну інформацію для прийняття рішень із управління. Показано, що автоматизовані системи управління пред'являють специфічні вимоги до математичних методів прогнозу через малу вивченості природи прогнозованого параметра, малого обсягу звітної статистики та недостатньої достовірності вихідної інформації і найбільш точно відповідає таким вимогам, адаптивний підхід до конструювання методів прогнозування. Адаптивний підхід дозволяє вирішувати проблему адекватності методу об'єкту прогнозування і, з точки зору простоти реалізації і часу розрахунків, на перше місце слід поставити адаптивні методи прогнозування і, в першу чергу, метод експоненціального згладжування.

Список використаної літератури

1. Винославский В.Н. Прогнозирование электропотребления производственных объектов / В.Н. Винославский, А.В. Праховник, А.Ф. Бондаренко // Энергетика и электрификация. – 1974. - № 5. - С. 30-31.
2. Лапинский Г.С. Однофакторные регрессионные модели прогнозирования электропотребления промышленных предприятий / Г.С. Лапинский, З.Р. Майрансаев // Известия ЮФУ. -2013. - № 5. – с. 241-246
3. Freire R. Z. Development of regression equations for predicting energy and hygrothermal performance of buildings/ Roberto Z. Freire, Gustavo H.C. Oliveira, Nathan Mendes // Energy and Buildings. – 2008. - № 40. – p. 810–820.
4. Валь, П.В. Прогнозирование электропотребления с использованием авторегрессионного метода / П.В. Валь, А.С.Торопов // Сборник трудов XVI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии». – Томск: ТПУ, 2010. – С. 23-24.
5. Щербина Ю.В. Прогнозирование случайных процессов на основе разложения в гармонический ряд и применения фильтра Калмана с учетом корреляции между шумами в модели/ Щербина Ю.В., Николов Д.А. // Автоматика. – 1978. - № 5. С. 48-55.
6. Шаталов В.И. Краткосрочное прогнозирование суммарной энергетической нагрузки энергосистемы с учетом метеорологических факторов: Автореферат дисс... канд. техн. наук. – Новосибирск. – 1976. – 24 с.
7. Вагин Г.Я. Динамическое прогнозирование электропотребления дуговых сталеплавильных печей/ Вагин Г.Я., Лоскутов А.В., Редькин Е.В. // Межвузовский сборник научных трудов «Электрооборудование промышленных установок». – Горький: ГПИ. 1989. – С. 12 – 18.
8. Chow J.C. A preliminary algorithm for determining the order of a linear stochastic dynamic system/ Chow J.C. // IEEE Paper No. 75 – 5. – P. 518 – 520.

9. Galliana F.D. Identification of stochastic electric load model from physical data/ Galliana F.D., Handschin E., Frechter A.R. // IEEE Transaction on Automatic Control. – Vol. Ac – 19. – No. 6. – 1974. – P. 887 -893.
10. Keyhany A One – step – ahead load forecasting for on line application / Keyhany A., El – Abiad A. // IEEE Paper No. C 75 027 – 8. – P. 1 – 7.
11. Mehra K.K. On the identification of variances and adaptive Kalman filtering / Mehra K.K.// IEEE Transaction on Automatic Control. – Vol. Ac – 19. – No. 2. – 1970. – P. 175 - 181.
12. Sharma K.L.S. An application of non – linear adaptive estimation theory in short – term load prediction/ Sharma K.L.S., Mahalanabis A.K. // IEEE Paper No. C 74 333 – 1. – P. 1 – 7.
13. Праховник А.В. Прогнозирование параметров режимов электропотребления различных иерархических уровней энергетики / Праховник А.В., Розен В.П. // Труды конференции «Методы и средства управления электропотреблением». – Киев: Знание. – 1992. – С. 22 – 24.
14. Архиреева И.Н. Применение метода селекции для прогнозирования временных рядов электропотребления/ Архиреева И.Н., Литвинов Ю.Г., Суднова В.В. // Труды конференции «Методы и средства управления электропотреблением». – Киев: Знание. – 1992. – С. 26 – 27.
15. Розен В.П. Алгоритм управления электрической нагрузкой энергетических и производственных систем/ Розен В.П. // Труды 2-й международной конференции «Управление энергосистемами». – Львів: Taxis . – 1997 (1) – С.33-35.
16. Застосування предмету розпізнавання образів в системах управління електричним навантаженням/ Калінчик В.П., Розен В.П., Танітовська О.Д., Яшуніна О.С.; НТУУ „КПІ” Н.-д. ін-т автоматики та енергетики „Енергія”. – Київ, 2010. – 37 с.: іл.: – Бібліогр.: 15 назв. – Укр. – Деп. в ДНТБ України 18.05.2010 № 25- Ук- 2010.
17. Gupta P.C. Adaptive short term forecasting of hourly loads using weather information/ Gupta P.C., Yamada K.// IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems. – Vol. Pas. – 91. – 1972. – P. 2085 - 2094.
18. Andersen, F.M. Long term forecasting of hourly electricity consumption in local areas / F.M. Andersen, H.V. Larsen, R.B. Gaardstrup // Applied Energy. – 2013. – № 110. – P. 147-162.
19. Brown R.G. Smoothing, forecasting and prediction of discrete time series / R.G. Brown // Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, 1963. – 468 p.
20. Brown R.G. The fundamental theorem of exponential smoothing/ R.G. Brown, R.F. Meyer/ // Operation research. - 1961. - Vol.9. - № 5. – p. 673–685.
21. Holt C.C. Forecasting trends and seasonals by exponentially weighted moving averages / C.C. Holt // O.N.R. Memorandum 52, Carnegie Inst. of Technology. - 1957. - № 2
22. Прогнозирование показателей энергопотребления, генерации и стоимости полученной энергии/ Калінчик В.П., Кокорина М.Т.: НТУУ „КПІ” Н.-и. ін-т автоматики та енергетики «Енергія». – Киев, 2013. – 14 с.: іл. – Бібліогр.: 7 назв. – Рус. – Деп. в ГНТБ України 22.07.13, № 35– Ук 2013.
23. Калінчик В.П., Федосенко Н.Н. Адаптивные модели прогнозирования электрической нагрузки/ НТУУ „КПІ” Н.-и. ін-т автоматики та енергетики «Енергія». – Киев, 2010. – 15 с.: – Рус. – Деп. в ГНТБ України 15.03.2010, № 4-Ук – 2010/
24. Forecasting of RES generation indicators. [Kalinchyk, V., Buravliova, M., Pobihailo, V., Borychenko, O., Kalinchyk, V. //2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology, KhPI Week 2021 - Conference Proceedingsthis link is disabled](#), 2021, стр. 445–448
25. В.П. Калінчик. Застосування статистичних методів прогнозування для планування електроспоживання/ В.П. Калінчик, В.В. Калінчик, Д.О. Мельник, К.А. Василенко. //Матеріали ХХVІ Міжнародної науково-практичної інтернет - конференції «Проблеми та перспективи розвитку сучасної науки в країнах Європи та Азії» – Переяслав-Хмельницький. – 2020.- С.167-169
26. Ивахненко А.Г. Предсказание случайных процессов /Ивахненко А.Г., Лапа В.Г.// Киев: Наукова думка. – 1971. – 416 с.
27. Редкозубов С.А. Статистические методы прогнозирования в АСУ/ Редкозубов С.А.// М.: Энергоиздат. – 1981. – 152 с.
28. Uri N.D. Peak load forecasting using an adaptive mode /Uri N.D. // Eng. Opt. – 1979. – Vol. 4 – P. 57 – 63.
29. Автоматизированная система оперативно-диспетчерского управления электроэнергетическими системами / О.Н.Войтов, Н.В.Воронов, А.З. Гамм др. / Под ред . М.Н.Розанова и В.А.Семенова . – Новосибирск: Наука. – 1986. – 205 с.
30. Оценивание состояния в электроэнергетике / А.З Гамм, Л.Н.Герасимов, И.И.Голуб и др. / Под ред Ю.Н.Руденко. – М.: Наука. – 1983. – 308 с.
31. Лукашин Ю. П. Адаптивные методы краткосрочного прогнозирования временных рядов / Ю. П. Лукашин// М.: Финансы и статистика, 2003. – 415 с. - ISBN 5-279-02740-5
32. Чуев Ю.В. Прогнозирование количественных характеристик процессов/ Чуев Ю.В., Михайлов Ю.Б., Кузьмин В.И./ М.: Сов. радио. – 1975. – 400 с.

33. Feuer A. Forecasting With Adaptive Gradient Exponential Smoothing / Feuer A. // The bell system technical journal. – Vol. 62. – 1983. – No. 8. – P. 2561 – 2580.
34. Trigg D.W. Exponential smoothing with an adaptive response rate/ Trigg D.W., Leach A.G. // Oper. Res. Quart. – 1967. – Vol. 18. – No. 1.
35. Калінчик В.П. Адаптивний підхід до прогнозування та управління електроспоживанням/ Калінчик В.П. // Вісник УБЕНТЗ. – 1999. - № 1. – С. 52 – 55.
36. Lijesen D.P. Adaptive forecasting of hourly load based and load measurement and weather information /Lijesen D.P., J. Rosing.// IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems. – Vol. Pas. – 90. No.4. – 1971.
37. Калінчик В.П., Калінчик І.В. Прогнозування електричного навантаження промислових об'єктів/ Нац. техн. ун-т України «Київ. політехн. ін-т». - Київ. 2009.- 7 с.:іл. – Укр.. – Деп. В ДНТБ України 12.10.09, № 92-Ук – 2009.
38. В.П. Калінчик. Комбіновані моделі прогнозування електроспоживання / Калінчик, Л.І. Несен, В.В. Калінчик// Збірник наукових праць. Матеріали XVI Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції «Проблеми та перспективи розвитку сучасної науки в країнах Європи та Азії» – Переяслав-Хмельницький. – 2019.- С.133-135.

V.P. Kalinchyk, Ph.D., ORCID 0000-0003-4028-0185

O.V. Meita, Ph.D., ORCID 0000-0002-4132-5202

V.V. Kalinchyk, Ph.D., ORCID 0000-0003-3931-646X

Yu.M. Chunyak, ORCID 0000-0002-4506-912X

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

ADAPTIVE MODELS OF ELECTRIC LOAD FORECASTING OF PRODUCTION CONSUMERS

The article investigates models and methods of electric load forecasting. It is shown that the following methods of power consumption control are currently known: instantaneous norm; at the ideal rate; management on the forecast value; control with the use of average power on a moving time interval ("moving window" method). It is shown that it is better to focus on those methods that are based on the study of forecast estimates, which are the source information for management decisions. The main requirements for real-time systems are: high accuracy of operational forecasting and simplicity of algorithms, which provides a minimum solution time; work in conditions of uncertain and insufficient information, ensuring the stability of management. 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 automated control systems have specific requirements for mathematical forecasting methods due to little study of the nature of the forecast parameter, small amount of reporting statistics and insufficient reliability of source information and most accurately meets such requirements, adaptive approach to method design. The adaptive approach allows to solve the problem of adequacy of the method of the object of forecasting and from the point of view of simplicity of realization and time of calculations in the first place it is necessary to put adaptive methods of forecasting and, first of all, the method of exponential smoothing. Exponential smoothing, considered in this paper as a predictive model, allows to identify the inadequacy of the model to the real process and to bring the estimate of the determined basis of the process closer to the real one, ie to reduce the prediction error. However, this requires time, which increases with increasing changes in the coefficients of the model. In this regard, there is a problem of regulating the reaction rate of the predicted model to changes in its coefficients. A number of methods of automatic adjustment of the smoothing parameter are considered and analyzed: the evolutionary method of adaptation, methods using the tracking signal, methods of adapting the parameter by, optimization using gradient smoothing. It is shown that the method of adaptation using the tracking signal is simple and especially valuable for modeling series with a short history. Due to its simplicity, this method is especially convenient where predictions are made using computer technology. Studies of this model of forecasting on statistical data obtained at various enterprises have shown that the model adapts to real data at step 4-6 of forecasting and then the forecast error does not exceed 2%. Analysis of adaptive forecasting models based on the method of exponential smoothing showed their high efficiency and good adaptability to changes in the process of electricity consumption. 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 the previously existing qualitative relationships of the parameters of the projected system. If there is a jump, it is very important to assess whether the deviation is caused by an obstacle or whether it is due to a change in the predicted process. If the changes are caused by an obstacle, it must be filtered out. If the deviations are caused by a change in the model, then the current process data are of the greatest value. From the point of view of fast working off of abrupt change the model of exponential smoothing with high value of the smoothing parameter is rather effective. However, this model is highly susceptible to interference. To eliminate this circumstance, a modified procedure for correcting

the parameters of the forecasting model is proposed. The procedure is based on the introduction of a logical operator, which is based on the analysis of inconsistencies in the forecasts and imposes additional restrictions on changes in the smoothing parameter and the values of the original statistics. Experimental studies of the considered models are carried out.

Keywords: *electrical load, control, forecast, adaptive models, exponential smoothing.*

References

1. Vinoslavsky V.N. Forecasting of electricity consumption of production facilities / V.N. Vinoslavsky, A.B. Prakhovnik, A.F. Bondarenko // *Energy and electrification*. - 1974. - № 5. - p. 30-31.
2. Lapinsky G.S. One-factorial regression models of forecasting of the power consumption of the industrial enterprises / G.S. Lapinsky, Z.R. Mirantsaev // *Izvestiya YuFU*. -2013. - № 5. - p. 241-246
3. Freire R. Z. Development of regression equations for predicting energy and hygrothermal performance of buildings/ Roberto Z. Freire, Gustavo H.C. Oliveira, Nathan Mendes // *Energy and Buildings*. – 2008. - № 40. – p. 810–820.
4. Val P.V. Forecasting of electricity consumption using the autoregressive method / P.V. Val, A.S. Toropov // *Proceedings of the XVI International scientific-practical conference of students, graduate students and young scientists "Modern technology and technology"*. - Tomsk: TPU, 2010. - p. 23-24.
5. Shcherbina Yu.V. Prediction of random processes based on harmonic series decomposition and application of Kalman filter taking into account the correlation between noise in the model / Shcherbina Yu.V., Nikolov DA // *Automation*. - 1978. - № 5. p. 48-55.
6. Shatalov V.I. Short-term forecasting of the total energy load of the power system taking into account meteorological factors: Abstract of the dissertation. tech. Science. - Novosibirsk. - 1976. - 24 p.
7. Vagin G.Ya. Dynamic forecasting of power consumption of arc steelmaking furnaces / Vagin G.Ya., Loskutov A.V., Redkin E.V. // *Interuniversity collection of scientific works "Electrical equipment of industrial installations"*. - Bitter: GPI. 1989. - p. 12 - 18.
8. Chow J.C. A preliminary algorithm for determining the order of a linear stochastic dynamic system/ Chow J.C. // *IEEE Paper No. 75 – 5 . – P. 518 – 520*. Chow J.C. A preliminary algorithm for determining the order of a linear stochastic dynamic system/ Chow J.C. // *IEEE Paper No. 75 – 5 . – P. 518 – 520*.
9. Galliana F.D. Identification of stochastic electric load model from physical data/ Galliana F.D., Handschin E., Frechter A.R. // *IEEE Transaction on Automatic Control*. – Vol. Ac – 19. – No. 6. – 1974. – P. 887 -893.
10. Keyhani A. One – step – ahead load forecasting for on line application / Keyhani A., El – Abiad A. // *IEEE Paper No. C 75 027 – 8. – P. 1 – 7*.
11. Mehra K.K. On the identification of variances and adaptive Kalman filtering / Mehra K.K.// *IEEE Transaction on Automatic Control*. – Vol. Ac – 19. – No. 2. – 1970. – P. 175 - 181.
12. Sharma K.L.S., Mahalanabis A.K. An application of non – linear adaptive estimation theory in short – term load prediction/ Sharma K.L.S., Mahalanabis A.K. // *IEEE Paper No. C 74 333 – 1. – P. 1 – 7*.
13. Prakhovnik A.V. Forecasting the parameters of power consumption modes of different hierarchical levels of energy / Prakhovnik A.V., Rosen V.P. // *Proceedings of the conference "Methods and tools for power management."* - Kyiv: Knowledge. - 1992. - p. 22 - 24.
14. Archireeva I.N. Application of selection method for forecasting time series of power consumption / Archireeva I.N., Litvinov Yu.G., Sudnova V.V. // *Proceedings of the conference "Methods and tools for power management."* - Kyiv: Knowledge. - 1992. - p. 26 - 27.
15. Rosen V.P. Algorithm for controlling the electrical load of energy and production systems / Rosen V.P. // *Proceedings of the 2nd International Conference "Energy Management"*. - Lviv: Tacis. - 1997 (1) - P.33-35.
16. Kalinchyk V.P., Rozen V.P., Tanitovska O.D., Yashunina O.S.; NTUU "KPI" N.-d. Institute of Automation and Energy "Energy". - Kyiv, 2010. - 37 p. : ill. : - Bibliography: 15 titles. - Ukr. - Dep. in the State National Security Service of Ukraine 18.05.2010 № 25- UK-2010..
17. Gupta P.C. Adaptive short term forecasting of hourly loads using weather information/ Gupta P.C., Yamada K.// *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*. – Vol. Pas. – 91. - 1972. – P. 2085 - 2094.
18. Andersen, F.M. Long term forecasting of hourly electricity consumption in local areas / F.M. Andersen, H.V. Larsen, R.B. Gaardstrup // *Applied Energy*. – 2013. – № 110. – P. 147-162.
19. Brown R.G. Smoothing, forecasting and prediction of discrete time series / R.G. Brown // *Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, 1963. – 468 p.*
20. Brown R.G. The fundamental theorem of exponential smoothing/ R.G. Brown, R.F. Meyer // *Operation research*. - 1961. - Vol.9. - № 5. – p. 673–685.
21. Holt C.C. Forecasting trends and seasonals by exponentially weighted moving averages / C.C. Holt // *O.N.R. Memorandum 52, Carnegie Inst. of Technology*. - 1957. - № 2

22. Forecasting of indicators of energy consumption, generation and cost of the received energy / Kalinchik V.P., Kokorina M.T.: NTUU "KPI" N.-i. Institute of Automation and Energy "Energy". - Kyiv, 2013. –14 p. : ill. - Bibliogr. : 7 titles. - Rus. - Dep. in GNTB of Ukraine 22.07.13, № 35– Uk 2013.
23. Kalinchik V.P., Fedosenko N.N. Adaptive models of electric load forecasting / NTUU "KPI" N.-i. Institute of Automation and Energy "Energy". - Kyiv, 2010. –15 p. : - Ruc. - Dep. in GNTB of Ukraine 15.03.2010, № 4-Uk - 2010/
24. Forecasting of RES generation indicators. Kalinchyk, V., Buravliova, M., Pobihailo, V., Borychenko, O., Kalinchyk, V. // 2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology, KhPI Week 2021 - Conference Proceedings [this link is disabled](#), 2021, стр. 445–448
25. V.P. Kalinchik. Application of statistical forecasting methods for electricity consumption planning / V.P. Kalinchik, V.V. Kalinchik, D.O. Мельник, К.А. Vasylenko. // Proceedings of the XXVI International Scientific and Practical Internet Conference "Problems and Prospects for the Development of Modern Science in Europe and Asia" - Pereyaslav-Khmelnysky. - 2020.- p.167-169
26. Ivakhnenko A.G. Prediction of random processes/ Ivakhnenko A.G., Lapa V.G.//Kyiv: Scientific opinion. - 1971. - 416 p.
27. Redkozubov S.A. Statistical forecasting methods in ACS / Redkozubov S.A. //M.: Energoizdat. - 1981. - 152 p.
28. Uri N.D. Peak load forecasting using an adaptive model/ Uri N.D. // Eng. Opt. – 1979. – Vol. 4 – P. 57 – 63.
29. Automated system of operational and dispatch control of electric power systems / O.N. Voitov, N.V. Voronov, A.Z. Gamm et al. / Ed. M.N. Rozanova and V.A. Semenova. - Novosibirsk: Science. - 1986. - 205 p.
30. Assessment of the state in the power industry / A.Z. Gamm, L.N. Gerasimov, I.I. Golub, etc. / Edited by Yu.N. Rudenko. - M.: Science. - 1983. - 308 p.
31. Lukashin Yu. P. Adaptive methods of short-term forecasting of time series / Yu. P. Lukashin. //Moscow: Finance and Statistics, 2003. - 415 p. - ISBN 5-279-02740-5
32. Chuev Yu.V., Mikhailov Yu.B., Kuzmin VI Forecasting quantitative characteristics of processes / Chuev Yu.V., Mikhailov Yu.B., Kuzmin VI //M.: Sov. radio. - 1975. - 400 p.
33. Feuer A. Forecasting With Adaptive Gradient Exponential Smoothing / Feuer A.// The bell system technical journal. – Vol. 62. – 1983. – No. 8. – P. 2561 – 2580.
34. Trigg D.W. Exponential smoothing with an adaptive response rate/ Trigg D.W., Leach A.G. // Oper. Res. Quart. – 1967. – Vol. 18. – No. 1.
35. Kalinchik V.P. Adaptive approach to forecasting and management of electricity consumption // Bulletin of UBENTZ. - 1999. - № 1. - p. 52 - 55.
36. Lijesen D.P. Adaptive forecasting of hourly load based and load measurement and weather information Lijesen D.P., J. Rosing.// IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems. – Vol. Pas. – 90. No.4. – 1971.
37. Kalinchik V.P., Kalinchik I.V. Forecasting the electrical load of industrial facilities / Nat. tech. University of Ukraine "Kyiv. Polytechnic Inst. - Kyiv. 2009.- 7 pp. : ill. - Ukr .. - Dep. In the State Scientific Library of Ukraine on October 12, 2009, № 92-Uk - 2009.
38. V.P. Kalinchik, L.I. Nessen, V.V. Kalinchik. Combined models of electricity consumption forecasting / Collection of scientific papers. Proceedings of the XVI International Scientific and Practical Internet Conference "Problems and Prospects for the Development of Modern Science in Europe and Asia" - Pereyaslav-Khmelnysky. - 2019.- p.133-135.

Надійшла 20.02.2022
Received 20.02.2022