

**ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ**

Рибальченко Тарас Вячеславович

УДК 004.032.26

**ПРОГНОЗУВАННЯ ПРОЦЕСІВ СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА
ОСНОВІ ШТУЧНИХ НЕЙРО-ФАЗЗИ МЕРЕЖ**

05.13.23 – системи та засоби штучного інтелекту

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2011

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Харківському національному університеті радіоелектроніки Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України.

Науковий керівник – доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Попов Сергій Віталійович,
Харківський національний університет радіоелектроніки,
головний науковий співробітник проблемної науково-
дослідної лабораторії автоматизованих систем управління.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Алексієв Володимир Олегович,
Харківський національний автомобільно-дорожній
університет, професор кафедри мехатроніки
автотранспортних засобів;

доктор технічних наук, професор
Тевяшев Андрій Дмитрович,
Харківський національний університет радіоелектроніки,
завідувач кафедри прикладної математики.

Захист відбудеться «___» _____ 2011 р. о ____ на засіданні спеціалізованої вченої ради Д64.052.01 в Харківському національному університеті радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, пр. Леніна, 14.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Харківського національного університету радіоелектроніки, за адресою: 61166, м. Харків, пр. Леніна, 14.

Автореферат розісланий «___» _____ 2011 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

С.Ф. Чалий

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Істотні труднощі при використанні відомих методів прогнозування процесів електроспоживання виникають у випадку, коли частина оброблюваної інформації задана не в кількісній, а в порядковій або номінальній шкалах вимірювання, наприклад, «холодно – тепло – спекотно», «сильний – слабкий» вітер, «дощ – сніг – туман – без опадів» і таке інше. Крім того, споживання електроенергії у великих розподілених електроенергетичних системах (ЕЕС) залежить досить складним чином від множини факторів, що впливають, серед яких найбільш сильний вплив мають: споживання електроенергії в попередні періоди, пора року, погодні умови, день тижня, особливі події (наприклад, свята, перенесення робочих днів, регламентні роботи в енергосистемі й таке інше). Урахування апріорної інформації про форму впливу різних факторів, а також про структуру самих процесів електроспоживання при синтезі прогнозуючих моделей є запорукою високої якості одержуваних прогнозів і вимагає відповідної модифікації цих моделей та створення нових спеціалізованих предикторів. Також досить часто виникає задача прогнозування взаємозалежних часових рядів, що описують процеси споживання електроенергії в різних, зв'язаних між собою елементах однієї енергосистеми, а також процеси споживання різних видів енергії: електричної, теплової, природного газу на одній території. Прогнозування кожного такого процесу може виконуватися незалежно від інших, однак факт їх взаємозв'язку дозволяє враховувати взаємний вплив для підвищення якості прогнозування. У цьому випадку взаємозв'язані часові ряди, що описують ці процеси, доцільно розглядати як один багатовимірний часовий ряд і провадити його прогнозування за допомогою спеціалізованих методів багатовимірного прогнозування.

Подолати названі труднощі можна за рахунок використання спеціалізованих штучних нейронних (ШНМ) і нейро-фаззі мереж (НФМ), що враховують специфіку оброблюваних часових рядів і процесів електроспоживання, що їх генерують. Такі мережі також вимагають нових, удосконалених методів навчання для повного використання своїх можливостей. Таким чином, на сьогоднішній день актуальною є наукова задача розробки нових інтелектуальних методів прогнозування процесів споживання електроенергії, що враховують специфіку цих процесів і взаємозв'язків між ними.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана в рамках держбюджетних НДР №214 «Синтез методів обробки інформації за умов невизначеності на основі самонавчання і м'яких обчислень» (№ДР 0107U003028), №245 «Еволюційні гібридні системи обчислювального інтелекту зі змінною структурою для інтелектуального аналізу даних» (№ДР 0110U000458). В рамках вказаних НДР здобувачем як виконавцем на посаді старшого наукового співробітника розроблено нові архітектури штучних нейронних і нейро-фаззі мереж та методи їхнього навчання для прогнозування процесів електроспоживання.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є синтез нових нейромережних методів прогнозування процесів споживання електроенергії, що враховують

специфіку цих процесів і взаємозв'язків між ними. Досягнення поставленої мети здійснюється шляхом розв'язання таких основних задач:

- аналіз існуючих методів прогнозування процесів споживання електроенергії;
- розробка спеціалізованих ШНМ і методів їх навчання для середньо- і довготермінового прогнозування процесів споживання електроенергії;
- розробка спеціалізованих нейро-фаззі мереж і методів їх навчання для короткотермінового прогнозування процесів споживання електроенергії;
- розробка нейромережових методів прогнозування взаємозалежних процесів споживання електроенергії;
- розв'язання за допомогою розроблених методів тестових і реальних задач прогнозування процесів споживання електроенергії.

Об'єкт дослідження: процеси споживання електроенергії.

Предмет дослідження: методи прогнозування процесів споживання електроенергії на основі нейронних й нейро-фаззі мереж.

Методи дослідження: теорія штучних нейронних мереж, що дозволила синтезувати нові архітектури ШНМ; теорія оптимізації й лінійна алгебра, що дозволили вдосконалити методи навчання ШНМ; теорія нечіткої логіки, що дозволила обробляти дані, задані в порядковій і номінальній шкалах вимірювання; імітаційне моделювання, яке підтвердило достовірність одержаних теоретичних результатів; математична статистика, що дозволила дослідити результати експериментів.

Наукова новизна одержаних результатів. До нових, одержаних особисто автором, належать такі результати:

- вперше запропоновано архітектуру локально-рекурентної нейронної мережі для довготермінового прогнозування процесів електроспоживання, що відрізняється наявністю першого прихованого шару, який реалізує нелінійні моделі авто-регресії – ковзного середнього різних порядків, що дає можливість автоматичного вибору й відстеження порядку прогнозованого процесу;
- вперше запропоновано нейромережовий метод прогнозування тренд-сезонних процесів споживання електроенергії, який відрізняється паралельною обробкою гармонійних компонент, що дає можливість прогнозувати процес з апіорі відомою фіксованою кількістю гармонійних компонент;
- вперше запропоновано нейромережовий метод прогнозування полігармонійних процесів споживання електроенергії, який відрізняється послідовною обробкою гармонійних компонент, що дає можливість прогнозувати процес з апіорі невідомою та змінною у часі кількістю гармонійних компонент;
- удосконалено метод навчання спеціалізованих нейро-фаззі мереж для короткотермінового прогнозування процесів споживання електроенергії, який відрізняється застосуванням регуляризатора при виборі шагу пошуку, що дозволяє уникнути «паралічу» мережі;
- удосконалено метод навчання нейронної мережі зустрічного поширення, який відрізняється застосуванням стратегії «переможець одержує більше» з використанням біполярної функції сусідства, що дозволяє підвищити точність прогнозування електроспоживання у вузлах електроенергетичної системи.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблені в дисертаційній роботі архітектури й методи навчання ШНМ і НФМ дозволяють у різних аспектах підвищити ефективність розв'язання задач прогнозування процесів електроспоживання й можуть застосовуватися при розв'язання конкретних задач як окремо, так і в сукупності.

ШНМ, НФМ і методи їх навчання використані при розв'язанні задач прогнозування споживання електроенергії в оперативно-інформаційних комплексах (ОІК) і автоматизованих системах диспетчерського управління (АСДУ), які розробляє і впроваджує ТОВ «Хартеп», що підтверджено актом від 07.06.2010 р. Використання розроблених здобувачем методів дозволило точніше врахувати взаємозв'язки між електроспоживанням у вузлах ЕЕС і підвищити точність настроювання параметрів нейромоделей, що в цілому призвело до підвищення точності прогнозування в порівнянні із застосовуваними раніше методами й зменшенню економічних втрат, що виникають внаслідок похибок прогнозування.

Методи прогнозування на базі НФМ використані в задачі «Прогноз навантаження» ОІК АСДУ Західної енергосистеми ДП НЕК «Укренерго», що підтверджено актом від 30.06.2010 р. Це призвело до значного підвищення точності прогнозування й підвищення ефективності розв'язання задачі «Вибір складу енергоблоків», що в свою чергу підвищило економічні показники роботи генеруючого обладнання.

Також результати дисертаційної роботи, пов'язані із синтезом архітектур НФМ і методів їх навчання для розв'язання задач обробки часових рядів в умовах невизначеності, впроваджені в навчальний процес на кафедрі штучного інтелекту Харківського національного університету радіоелектроніки при підготовці курсів «Нейромережеві методи обчислювального інтелекту» і «Інтелектуальні системи керування й діагностики», які читаються студентам спеціальності «Інтелектуальні системи прийняття рішень», що підтверджено актом від 03.06.2010 р., і в науководослідні роботи Харківського національного університету радіоелектроніки, що підтверджено актом від 23.06.2010 р.

Особистий внесок здобувача. Основні положення і результати дисертаційної роботи одержані автором самостійно. У публікаціях, написаних у співавторстві, авторові належить: [1] – архітектура локально-рекурентної ШНМ, [2, 9, 10] – удосконалений метод навчання спеціалізованої НФМ із прямою передачею інформації, [3] – нейромережевий метод прогнозування полігармонійних процесів споживання електроенергії, [4, 12] – удосконалений метод навчання спеціалізованої НФМ Елмана, [5, 11] – удосконалений метод навчання спеціалізованої ШНМ, [6] – удосконалений метод навчання ШНМ зустрічного поширення, [7] – удосконалений метод навчання гібридної НФМ для короткострокового прогнозування взаємозалежних процесів споживання електроенергії, [8] – нейромережевий метод прогнозування тренд-сезонних процесів споживання електроенергії.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на Міжнародній науково-технічній конференції «Автоматизація: проблеми, ідеї, рішення» (Севастополь, 2007); 3rd International Computer Science Symposium in Russia «Computer Science – Theory and Applications» (Москва, Росія, 2008); 4th International IEEE Conference «Intelligent

Systems» (Варна, Болгарія, 2008); 54 Internationales Wissenschaftliches Kolloquium (Ільменау, Німеччина, 2009), 82-му засіданні Всеросійського наукового семінару «Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики» (Ялта, 2010).

Публікації. Результати наукових досліджень викладено в 12 друкованих працях, з них 8 публікацій у виданнях, що входять до переліку ВАК України: 4 статті в журналах, 4 статті в наукових збірках, 4 публікації в працях наукових конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, що містять основні результати, додатку і списку використаних джерел. Загальний обсяг дисертації складає 161 сторінку (з них 126 – основного тексту), 58 рисунків, 5 таблиць, 13 окремих сторінок займають рисунки, 1 додаток на 5 сторінках, список використаних джерел, що включає 161 найменування та займає 17 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету і задачі дослідження, наукову новизну і практичне значення одержаних результатів. Наведено відомості про впровадження результатів роботи, апробацію, особистий внесок здобувача та публікації.

У **першому розділі** виконано огляд стану проблеми прогнозування процесів споживання електроенергії. Відзначена складність цих процесів, їх нестаціонарність, залежність від множини різнорідних факторів, що істотно утруднює їхнє прогнозування. Проаналізовано роботу ЕЕС як складних систем, функціонування яких залежить від багатьох економічних, соціальних, технічних, погодних і інших факторів. Показано, що внаслідок особливості електроенергії як товару, який неможливо зберігати без втрат, ефективне функціонування ЕЕС докорінно залежить від розв'язання задач прогнозування процесів споживання електроенергії на різні інтервали часу (від 1 години до декількох років наперед).

Проведено детальний аналіз задачі прогнозування процесів споживання електроенергії, яка традиційно поділяється на три типи залежно від горизонту прогнозування: короткотермінове (до 1 тижня), середньотермінове (від 1 тижня до 1 року), довготермінове (більш 1 року). Виявлено основні властивості процесів електроспоживання, виділено й описано фактори, що впливають на них, частина з яких задана в порядковій і номінальній шкалах вимірювання. Відзначено наявність в аналізованих часових рядах пропущених і аномальних спостережень. Розглянуто існуючі підходи до розв'язання задачі прогнозування процесів споживання електроенергії. Показано, що на різних горизонтах прогнозування найбільш ефективні різні методи: для короткотермінового прогнозування найчастіше застосовуються метод подібного дня, регресійний аналіз, метод Бокса-Дженкінса, експертні системи, а також методи штучного інтелекту, такі як штучні нейронні мережі, нечітка логіка тощо; для середньо- і довготермінового прогнозування кращі результати забезпечують економетричні й статистичні методи.

Виділено недоліки існуючих методів прогнозування й показано, що всі вони не враховують повною мірою виявлені особливості розв'язуваної задачі. Зроблено висновок, що, незважаючи на те, що в більшості випадків за інших рівних умов нейронні й нейро-фаззі мережі забезпечують кращу якість прогнозування в порівнянні з іншими розглянутими методами, залишається широке поле для їхнього вдосконалення. На основі проведеного аналізу визначені задачі дослідження, що полягають у розробці спеціалізованих ШНМ, НФМ і методів їх навчання для розв'язання задач прогнозування окремих і взаємозв'язаних процесів споживання електроенергії, а також розв'язанні з їхньою допомогою тестових і реальних задач.

У **другому розділі** запропоновано архітектуру локально-рекурентної нейронної мережі для довготермінового прогнозування процесів електроспоживання, а також нейромережеві методи прогнозування тренд-сезонних і полігармонійних процесів споживання електроенергії.

Розв'язано задачу прогнозування нестационарних процесів споживання електроенергії за умов структурної невизначеності. Запропоновано архітектуру локально-рекурентної нейронної мережі (рис. 1), засновану на багатомодельному підході, яка містить множину нелінійних моделей авторегресії – ковзного середнього різних порядків, об'єднаних в ансамбль. Запропоновано методи навчання цієї архітектури.

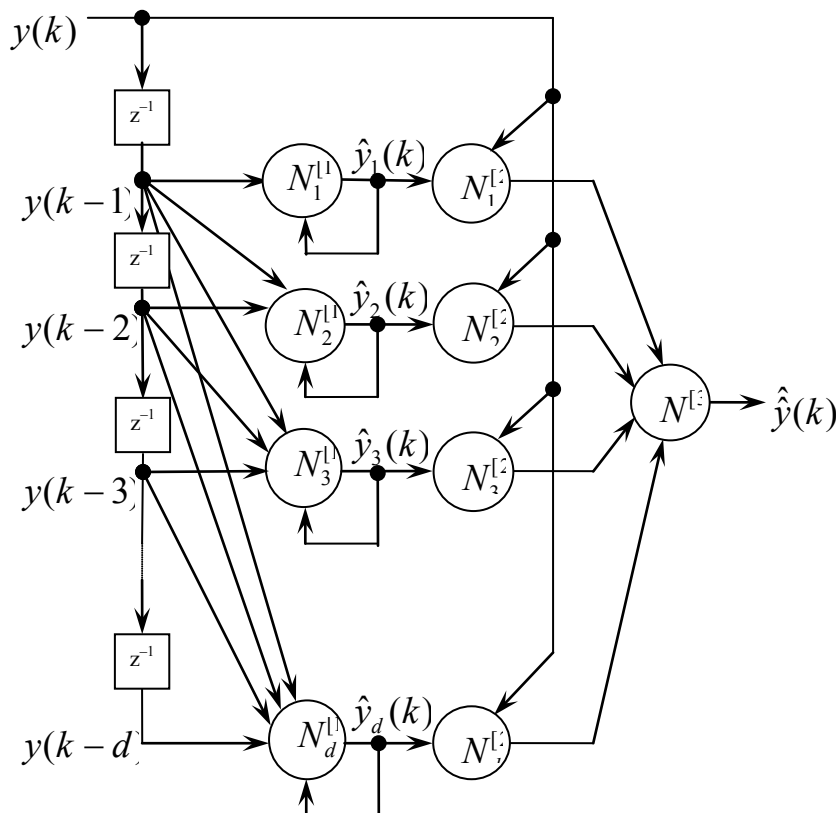


Рис. 1. Архітектура прогнозуючої ШНМ

Розв'язано задачу прогнозування процесів споживання електроенергії, що містять трендові й сезонні компоненти, (рис. 2).

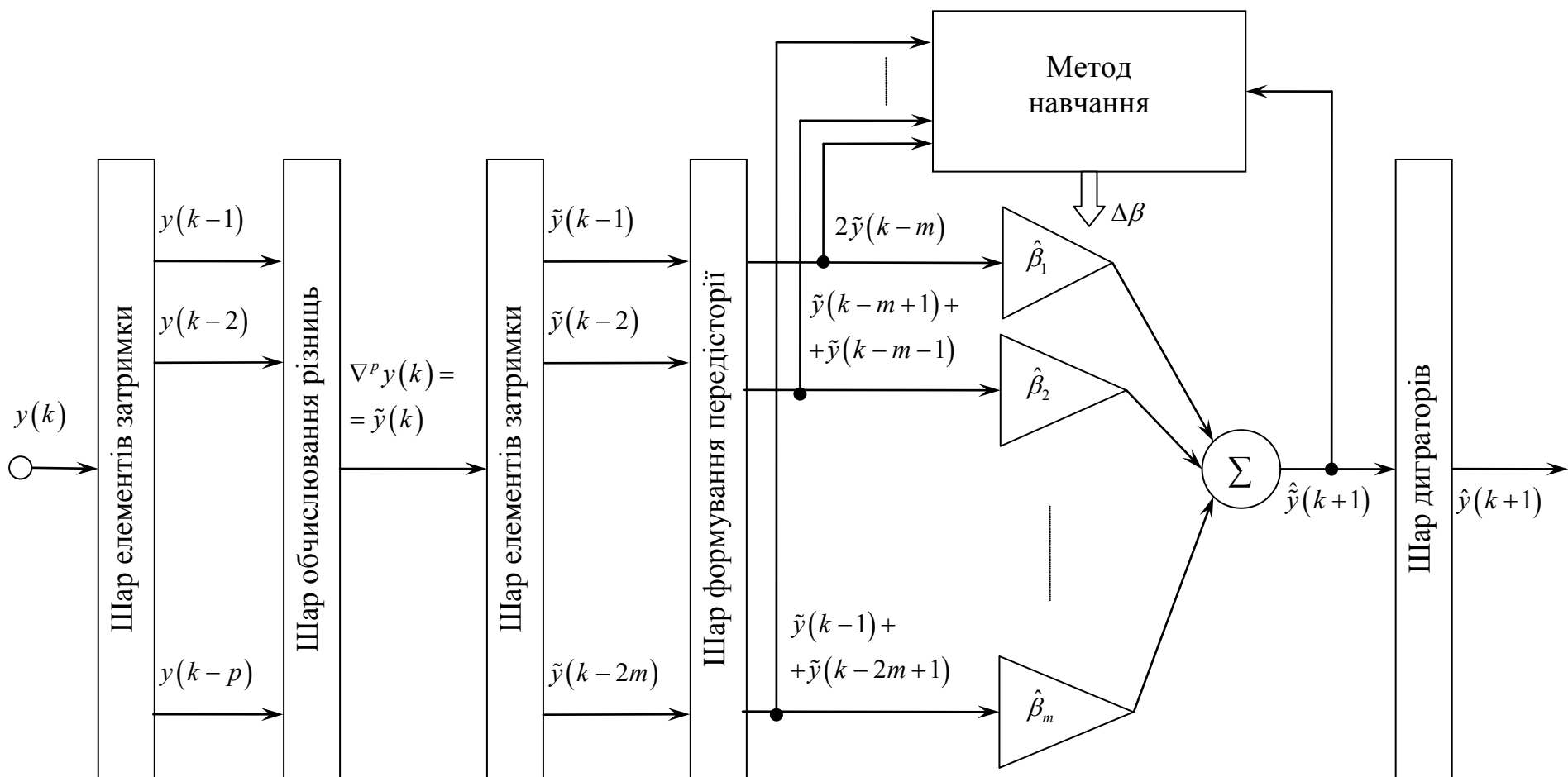


Рис. 2. Штучна нейронна мережа для прогнозування тренд-сезонних часових рядів

Використано багатоетапну схему, що включає в себе виділення поліноміального тренда й наперед заданої кількості гармонійних компонент з невідомими параметрами. Запропоновано нейромережеву реалізацію цього підходу й відповідний метод навчання:

$$\begin{cases} \hat{\beta}(N+1) = \hat{\beta}(N) + \\ + r_1^{-1}(N+1) \left(\tilde{y}(N+1) - \tilde{y}(N-2m+1) - \hat{\beta}^T(N) Y(N+1) \right) Y(N+1), \\ r_1(N+1) = \alpha r_1(N) + \|Y(N+1)\|^2. \end{cases} \quad (1)$$

Для випадку, коли кількість гармонійних компонент апіорі невідома й може мінятися в процесі спостереження, запропоновано альтернативну нейромережеву схему оцінювання (рис. 3), засновану на послідовному їхньому виділенні, яка навчається за допомогою методу (2).

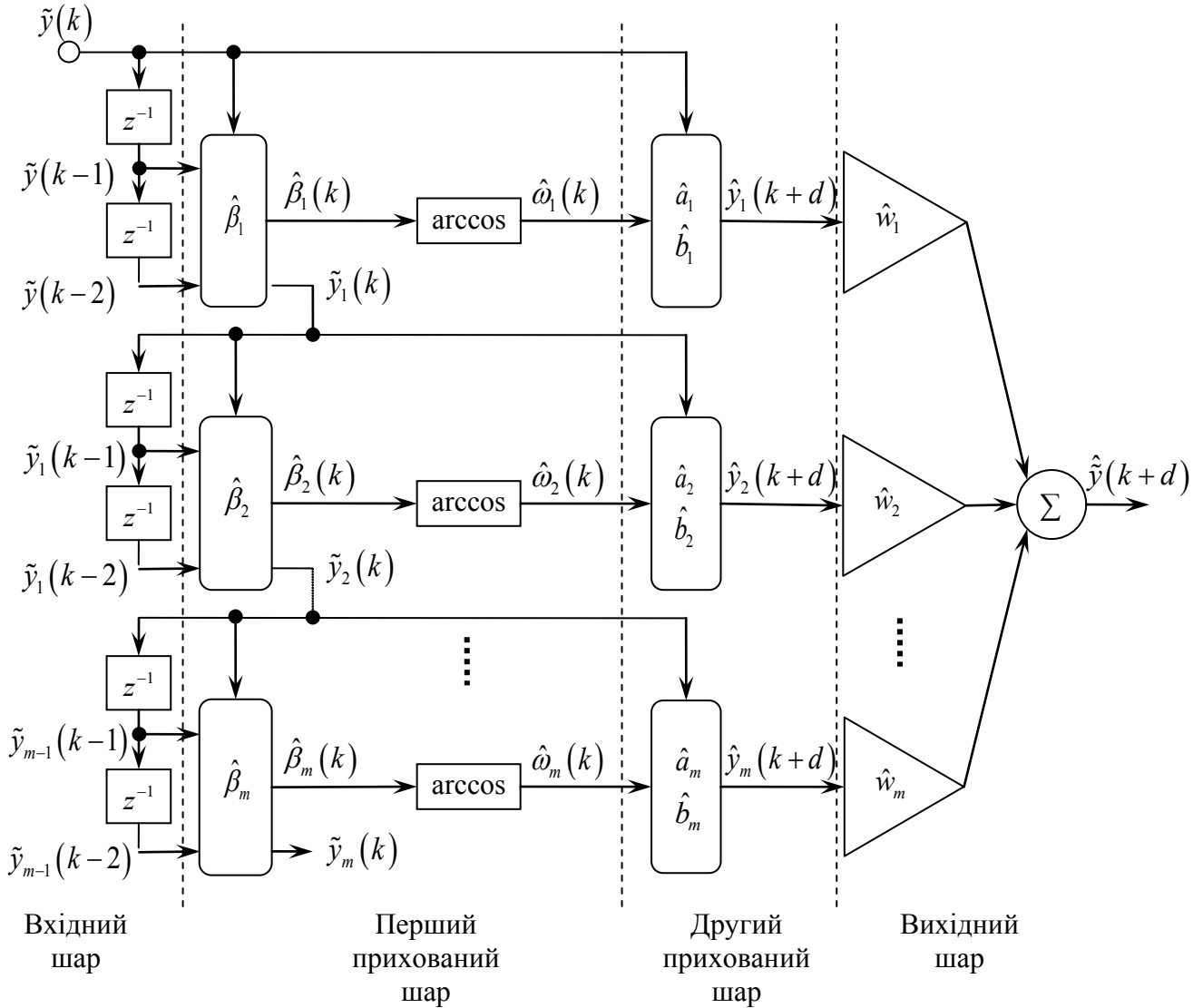


Рис. 3. Спеціалізована ШНМ для аналізу періодичних компонент

$$\begin{cases} \hat{\beta}_m(k+1) = \hat{\beta}_m(k) + r_m^{-1}(k+1)(\tilde{y}_{m-1}(k+1) - \tilde{y}_{m-1}(k-1) - 2\hat{\beta}_m(k)\tilde{y}_{m-1}(k))2\tilde{y}_{m-1}(k), \\ r_m(k+1) = \alpha r_m(k) + 4\tilde{y}_{m-1}^2(k), \\ \hat{\omega}_m(k+1) = \arccos \hat{\beta}_m(k+1) \\ (\hat{a}_m(k+1), \hat{b}_m(k+1))^T = (\hat{a}_m(k), \hat{b}_m(k))^T + R_m^{-1}(k+1)(\tilde{y}_{m-1}(k+1) - \hat{a}_m(k)\cos \hat{\omega}_m(k+1)(k+1) - \\ \hat{b}_m(k)\sin \hat{\omega}_m(k+1)(k+1)(\cos \hat{\omega}_m(k+1)(k+1), \sin \hat{\omega}_m(k+1)(k+1))^T, \\ R_m(k+1) = \alpha R_m(k) + 1. \end{cases} \quad (2)$$

В **третьому розділі** удосконалено метод навчання спеціалізованих нейро-фаззі мереж для короткотермінового прогнозування процесів споживання електроенергії.

Розв'язано задачу короткотермінового прогнозування процесів споживання електроенергії за допомогою нейро-фаззі мережі з прямою передачею інформації (рис. 4), що реалізує нелінійну модель авторегресії з зовнішніми входами із скінченною пам'яттю. Розглянуто порядок функціонування цієї НФМ і методи її навчання на основі процедури зворотного поширення похибки.

Аналіз цієї процедури навчання, однак, показує, що вона різко втрачає швидкість на ділянках сигмоїди близьких до нуля чи одиниці, у крайньому випадку це призводить до «паралічу» мережі. Для уникнення цих недоліків запропоновано удосконалений метод навчання, що має вигляд

$$w(k+1) = w(k) - \eta \delta(k+1)x(k) + \rho \Delta w(k), \quad (3)$$

де $w(k)$ – вагові коефіцієнти, що настроюються;

$\eta = \text{const} > 0$ – параметр кроку пошуку;

$\delta(k+1)$ – локальна похибка;

$x(k)$ – вхідні сигнали нейрона;

$1 > \rho \geq 0$ – параметр регуляризації;

$\Delta w(k) = w(k) - w(k-1)$.

Під час просування через «плато» цільової функції $E(k+1)$, коли компоненти $\delta(k+1)$ малі і практично не змінюються від кроку до кроку, (3) можна переписати у вигляді

$$\Delta w_i(k+1) = -\eta \frac{\partial E(k+1)}{\partial w_i(k)} + \rho \Delta w_i(k) \approx -\frac{\eta}{1-\rho} \cdot \frac{\partial E(k+1)}{\partial w_i(k)}, \quad (4)$$

звідки витікає, що шляхом варіювання параметру регуляризації ρ можна добитися збільшення швидкості збіжності.

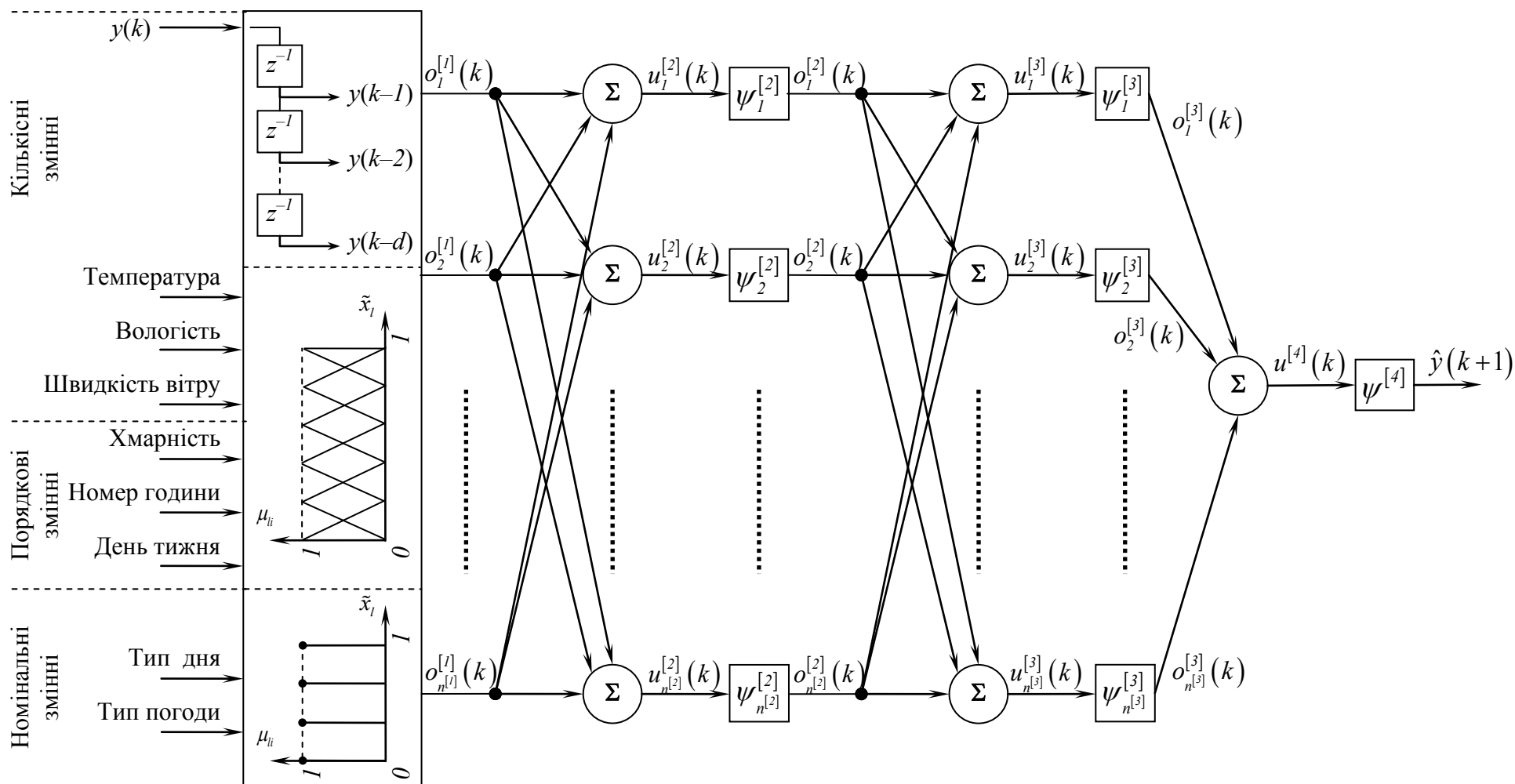


Рис. 4. Архітектура НФМ для короткотермінового прогнозування часових рядів електроспоживання

У **четвертому розділі** запропоновано удосконалений метод навчання нейронної мережі зустрічного поширення.

Розв'язано задачу прогнозування взаємозалежних процесів споживання електроенергії, що виникає у великих розподілених енергосистемах. Використана спеціалізована нейро-фаззі мережа, що складається з нейро-фаззі елементів і динамічних нейронів (рис. 5). Описано функціонування даної мережі, а для її навчання застосовано процедури (3), (4), запропоновані в попередньому розділі.

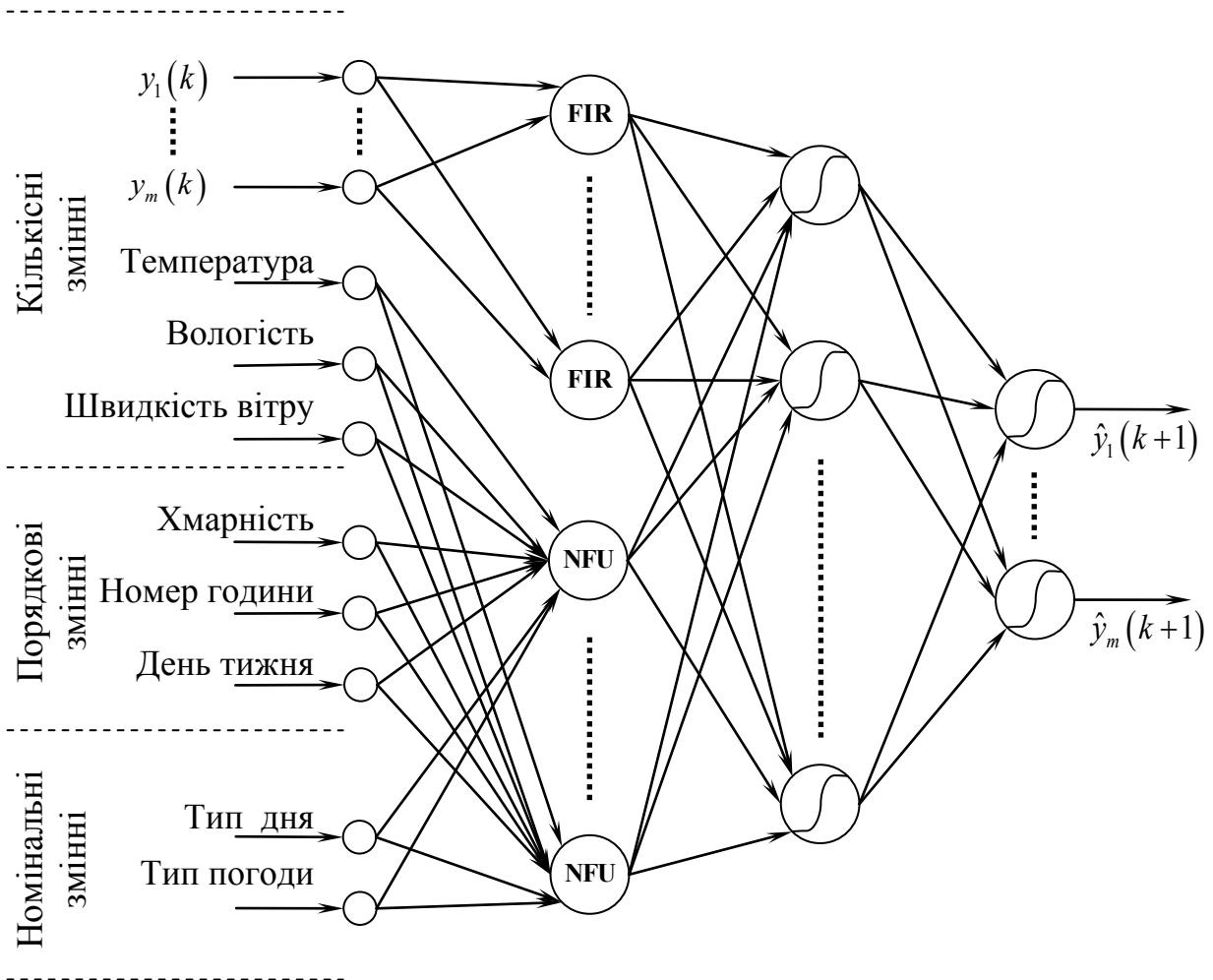


Рис. 5. Архітектура спеціалізованої гібридної НФМ для прогнозування взаємозалежних процесів споживання електроенергії

Розв'язано задачу прогнозування електроспоживання у вузлах ЕЕС на основі нейронної мережі зустрічного поширення (рис. 6).

З метою підвищення точності апроксимації прихований шар мережі пропонується навчати не на основі стратегії «переможець одержує все», а використовуючи більш гнучку стратегію кооперації «переможець одержує більше» з використанням біполярної функції сусідства. Тоді загальне правило навчання нейромережі можна записати у вигляді

$$\begin{cases} w_i^K(k+1) = w_i^K(k) + \eta_w(k) \lambda_i(k) (y_{NOD}(k) - w_i^K(k)), i = 1, 2, \dots, h; \\ v^G(k+1) = v^G(k) + \eta_v(k) u(k) \odot (y(k) I_h - v^G(k)), \end{cases} \quad (5)$$

де $w_i^K(k)$ – параметри, що настраюються, i -го нейрона першого прихованого шару;

$\eta_w(k)$ – параметр кроку пошуку першого прихованого шару;

$-1 \leq \lambda_i(k) \leq 1$ – значення функції сусідства для i -го нейрона щодо нейрона-«переможця»;

$y_{NOD}(k) = (y_1(k), y_2(k), \dots, y_Q(k))^T$;

$v^G(k)$ – параметри, що настраюються, другого прихованого шару;

$\eta_v(k)$ – параметр кроку пошуку другого прихованого шару;

$\odot$ – символ прямого (Скотова) добутку;

I_h – $(h \times 1)$ -вектор, що складається з одиниць.

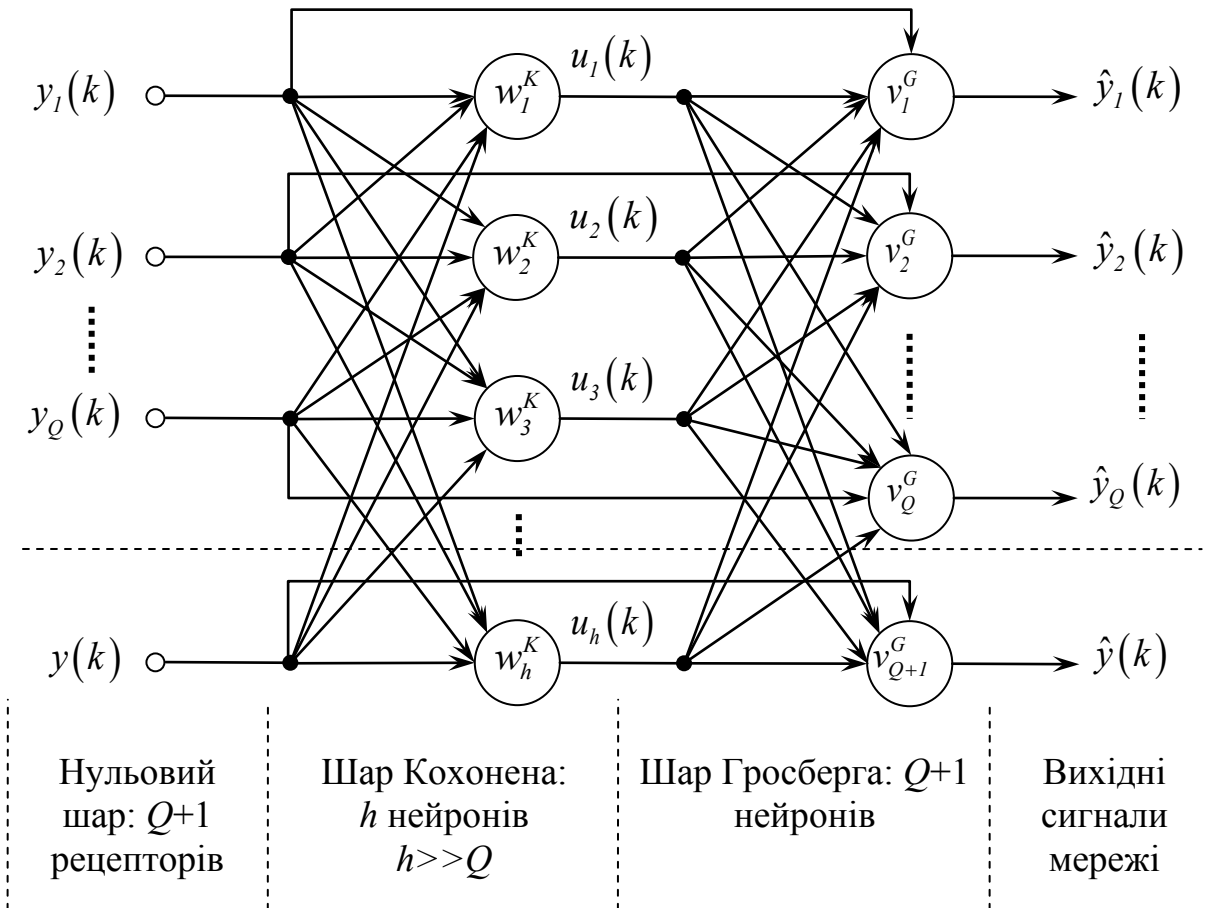


Рис. 6. Двонаправлена нейронна мережа зустрічного поширення в задачі прогнозування електроспоживання у вузлах ЕЕС

У п'ятому розділі проведено імітаційне моделювання запропонованих у роботі методів прогнозування процесів споживання електроенергії на основі спеціалізованих нейронних і нейро-фаззі мереж, а також розв'язано практичні задачі прогнозування електроспоживання в Західній енергосистемі (ЗЕС) ДП НЕК «Укренерго».

Проведено експериментальну апробацію запропонованих методів середньо- і довготермінового прогнозування електроспоживання, показано їхню працездатність і перевагу над відомими підходами.

Розв'язано задачу короткотермінового прогнозування споживання електроенергії в ЗЕС за допомогою спеціалізованої НФМ із прямою передачею інформації, здатної безпосередньо обробляти дані, задані в порядковій і номінальній шкалах вимірювання, а також враховувати апріорну інформацію про властивості різних факторів, що впливають на процеси електроспоживання. Навчання НФМ проводилося за допомогою традиційного й запропонованого в роботі вдосконаленого методу, який забезпечив кращу якість роботи НФМ (таблиця 1).

Таблиця 1

Похибки прогнозування
на 24 години наперед на перевіірчній вибірці (MAPE)

	Авторегресія	НФМ, стандартне навчання	НФМ, вдосконалене навчання
Західна енергосистема	4.12384%	3.41522%	3.29505%
Львівська область	5.76531%	5.0282%	4.50631%
Івано-Франківська область	5.70943%	4.85789%	4.27775%
Рівенська область	4.73023%	4.40514%	4.15225%
Волинська область	6.02316%	5.62911%	5.27072%
Закарпатська область	6.89455%	6.46487%	6.24689%

Розв'язано задачу прогнозування взаємозв'язаних процесів електроспоживання в п'ятих областях України, що входять у ЗЕС, за допомогою спеціалізованої НФМ, реалізованої на базі нейро-фаззі елементів і динамічних нейронів із скінченною імпульсною характеристикою, яка навчалася запропонованим удосконаленим методом. Урахування взаємозв'язків між прогнозованими часовими рядами дозволило підвищити точність прогнозування й зменшити число параметрів НФМ, що настроюються, у результаті чого знижуються вимоги до об'єму пам'яті й часу навчання.

Розв'язано задачу прогнозування електроспоживання у вузлах ЕЕС на основі ШНМ зустрічного поширення. Застосування запропонованого вдосконаленого методу навчання на основі стратегії кооперації «переможець одержує більше» дозволило підвищити точність розв'язання задачі в порівнянні із загальноприйнятим методом (таблиця 2).

Таблиця 2

Похибки оцінок електроспоживання на перевірочній вибірці (MAPE)

	Пропорцій- ний розподіл	Інверсія бага- тошарового персептрона	Мережа зустріч- ного поширення, стандартне навчання	Мережа зустрічного поширення, вдосконалене навчання
Львівська область	4.78276%	4.81054%	4.72304%	4.50268%
Івано-Франківська область	6.97868%	6.91785%	6.63641%	6.57779%
Ровенська область	7.20955%	7.20514%	7.20206%	6.95148%
Волинська область	8.07118%	7.62911%	7.10017%	7.04104%
Закарпатська область	9.66795%	8.46487%	6.58510%	6.32911%

У додатку наведено акти про впровадження результатів дослідження в ТОВ «Хартеп», Західній енергосистемі ДП НЕК «Укренерго», а також в учбовий процес і науково-дослідні роботи Харківського національного університету радіоелектроніки.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі представлено результати, що є відповідно до поставленої мети розв'язком актуальної науково-технічної задачі розробки нових інтелектуальних методів прогнозування процесів споживання електроенергії, які враховують специфіку цих процесів і взаємозв'язків між ними. Проведені дослідження дозволяють зробити такі висновки.

1. Проведено аналіз процесів споживання електроенергії та існуючих методів їх прогнозування, виявлено їхні недоліки, які полягають у неповному використанні доступної апіорної інформації про процеси, що прогнозуються. На основі результатів аналізу поставлено задачу дослідження.

2. Запропоновано архітектуру локально-рекурентної ШНМ для довготермінового прогнозування процесів електроспоживання, де перший прихований шар містить нелінійні моделі авторегресії – ковзного середнього різних порядків, краща з яких автоматично вибирається у вихідному шарі мережі. Розглянуто алгоритм навчання для кожного типу нейронів мережі. Роботу запропонованої ШНМ промодельовано на синтетичних і реальних даних електроспоживання, проведено порівняння з відомими методами прогнозування, яке показало перевагу запропонованого підходу. Цей підхід дає можливість автоматичного вибору й відстеження порядку прогнозованого процесу у випадку відсутності апіорної інформації про його структуру.

3. Запропоновано нейромережевий метод прогнозування тренд-сезонних процесів споживання електроенергії, в якому спочатку виключається трендова компонента, а потім апіорі відома фіксована кількість гармонійних компонент

обробляється в паралельному режимі. Проведено імітаційне моделювання даного методу на реальних щорічних даних електроспоживання. Метод дозволяє прогнозувати процес з апіорі відомою фіксованою кількістю гармонійних компонент.

4. Запропоновано нейромережевий метод прогнозування полігармонійних процесів споживання електроенергії, у якому гармонійні компоненти виділяються послідовно, що дає можливість прогнозувати апіорі невідому, змінну в часі кількість гармонійних компонент у процесі. Імітаційне моделювання на реальних даних споживання електроенергії підтвердило працездатність і ефективність розробленого методу. Перевагою методу є можливість прогнозувати процес з апіорі невідомою та змінною у часі кількістю гармонійних компонент.

5. Удосконалено метод навчання спеціалізованих НФМ для короткотермінового прогнозування процесів споживання електроенергії. За рахунок запровадження регуляризатора стало можливим збільшити швидкість навчання на «плато» цільової функції й уникати «паралічу» мережі, що в цілому підвищило якість її навчання. З використанням даного методу вирішено реальну задачу короткотермінового прогнозування електроспоживання в Західній енергосистемі ДП НЕК «Укренерго», отримані прогнози виявилися точнішими, ніж обчислені за допомогою методів, що застосовувалися раніше.

6. У роботі вдосконалено метод навчання ШНМ зустрічного поширення за рахунок застосування стратегії «переможець одержує більше» з використанням біполярної функції сусідства, у результаті чого підвищується якість кластеризації в першому прихованому шарі мережі, що дозволяє підвищити точність прогнозування процесів електроспоживання у вузлах електроенергетичної системи. Ефективність методу доведено експериментально на реальних даних електроспоживання Західної енергосистеми ДП НЕК «Укренерго».

7. Результати дисертаційної роботи впроваджені та використовуються в ТОВ «Хартеп» і Західній енергосистемі ДП НЕК «Укренерго», а також у навчальному процесі на кафедрі штучного інтелекту Харківського національного університету радіоелектроніки, і в науково-дослідній роботі Харківського національного університету радіоелектроніки.

8. Застосування всього комплексу запропонованих інтелектуальних методів призвело до підвищення ефективності розв'язання задач прогнозування процесів споживання електроенергії на інтервалах від 1 години до декількох років. Отримані теоретичні результати було досліджено експериментально на синтетичних і реальних даних, де вони показали свою перевагу над відомими, широко застосовуваними у світовій практиці методами. Виконано практичне впровадження розроблених методів, що підтверджено відповідними актами.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Плисс И. П. Нейросетевое прогнозирование нестационарных временных рядов энергопотребления в условиях структурной неопределенности / Плисс И. П., Попов С. В., Рыбальченко Т. В. // Світлотехніка та електроенергетика. – 2008. – № 3(15). – С. 41-48.

2. Краткосрочное прогнозирование потребления электроэнергии на основе искусственной многослойной нейро-фаззи сети / Бодянский Е. В., Попов С. В., Рыбальченко Т. В., Титов Н. Н. // Энергетика и электрификация. – 2008. – № 9. – С. 37-43.
3. Бодянский Е. В. Оперативное прогнозирование потребления электроэнергии на основе нейросетевого анализа гармонических компонент / Бодянский Е. В., Попов С. В., Рыбальченко Т. В. // Складні системи і процеси. – 2009. – № 1. – С. 54-60.
4. Модифицированная рекуррентная нейронная сеть Элмана в задаче краткосрочного прогнозирования потребления электроэнергии / Плисс И. П., Попов С. В., Рыбальченко Т. В., Слипенченко Е. В. // Світлотехніка та електроенергетика. – 2009. – № 2(18). – С. 79-87.
5. Бодянский Е. В. Выявление влияния температуры воздуха на потребление электроэнергии с помощью нейросетевых технологий / Бодянский Е. В., Попов С. В., Рыбальченко Т. В. // Збірник наукових праць Національного гірничого університету. – 2008. – № 31. – С. 169-173.
6. Плисс И. П. Прогнозирование узловых нагрузок электроэнергетической системы на основе нейронной сети встречного распространения / Плисс И. П., Попов С. В., Рыбальченко Т. В. // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Дніпропетровськ : 2008. – Т. 2, № 3(56). – С. 186-190.
7. Гибридная нейро-фаззи сеть для краткосрочного прогнозирования взаимосвязанных процессов потребления электроэнергии / Бодянский Е. В., Попов С. В., Рыбальченко Т. В., Титов Н. Н. // Праці Інституту електродинаміки НАН України. – 2008. – Вип. 21. – С. 13-22.
8. Плисс И. П. Прогнозирование тренд-сезонных временных рядов потребления электрической энергии с помощью искусственных нейронных сетей / Плисс И. П., Попов С. В., Рыбальченко Т. В. // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Дніпропетровськ : 2008. – № 5(58). – С. 150-160.
9. Бодянский Е. В. Адаптивное краткосрочное прогнозирование энергопотребления с помощью искусственной нейронной сети / Бодянский Е. В., Попов С. В., Рыбальченко Т. В. // «Автоматизация: проблемы, идеи, решения» : Материалы международной научно-технической конференции. – Севастополь, 2007. – С. 17-18.
10. Bodyanskiy Ye. Multilayer neuro-fuzzy network for short term electric load forecasting / Bodyanskiy Ye., Popov S., Rybalchenko T. // Computer Science – Theory and Applications: Third International Computer Science Symposium in Russia, CSR 2008, Proceedings. – Moscow, 2008. – P. 339-348.
11. Bodyanskiy Ye. Feedforward Neural Network with a Specialized Architecture for Estimation of the Temperature Influence on the Electric Load / Bodyanskiy Ye., Popov S., Rybalchenko T. // Proc. 4th Int. IEEE Conf. Intelligent Systems. – Varna, Bulgaria, 2008. – Vol. I. – P. 7-14-7-18.

12. Neuro-Fuzzy Elman Network for Short-Term Electric Load Forecasting [Електронний ресурс] / Bodyanskiy Ye., Otto P., Popov S., Rybalchenko T. // Proc. 54th International Scientific Colloquium. – Ilmenau, Germany, 2009. – 1 електрон. накопичувач (Flash Drive). – 6 p.

АНОТАЦІЯ

Рибальченко Т.В. Прогнозування процесів споживання електроенергії на основі штучних нейро-фаззі мереж. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.23 – системи та засоби штучного інтелекту. – Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, 2011.

В роботі запропоновано архітектуру локально-рекурентної ШНМ для довготермінового прогнозування процесів електроспоживання, де перший прихований шар містить нелінійні моделі авторегресії – ковзного середнього різних порядків, краща з яких автоматично вибирається у вихідному шарі мережі. Запропоновано нейромережевий метод прогнозування тренд-сезонних процесів споживання електроенергії, у якому спочатку виключається трендова компонента, а потім апіорі відома фіксована кількість гармонійних компонент обробляється в паралельному режимі. Запропоновано нейромережевий метод прогнозування полігармонійних процесів споживання електроенергії, в якому гармонійні компоненти виділяються послідовно, що дає можливість прогнозувати апіорі невідому та змінну в часі кількість гармонійних компонент у процесі. Удосконалено метод навчання спеціалізованих НФМ для короткотермінового прогнозування процесів споживання електроенергії. За рахунок запровадження регуляризатору стало можливим збільшити швидкість навчання на «плато» цільової функції й уникати «паралічу» мережі, що в цілому підвищило якість її навчання. Удосконалено метод навчання ШНМ зустрічного поширення за рахунок використання стратегії «переможець одержує більше» з використанням біполярної функції сусідства, у результаті чого підвищується якість кластеризації в першому прихованому шарі мережі, що дозволяє підвищити точність прогнозування процесів електроспоживання у вузлах електроенергетичної системи. Ефективність запропонованих методів доведена експериментально на реальних даних електроспоживання Західної енергосистеми ДП НЕК «Укренерго».

Ключові слова: нейронна мережа, нейро-фаззі мережа, функція належності, метод навчання, прогнозування споживання електроенергії.

АННОТАЦИЯ

Рыбальченко Т.В. Прогнозирование процессов потребления электроэнергии на основе искусственных нейро-фаззи сетей. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.23 – системы и средства искусственного интеллекта. – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, 2011.

Диссертационная работа посвящена решению актуальной научной задачи разработки новых интеллектуальных методов прогнозирования процессов потребления электроэнергии, учитывающих специфику этих процессов и взаимосвязей между ними.

В работе предложена архитектура локально-рекуррентной ИНС для долгосрочного прогнозирования процессов электропотребления, где первый скрытый слой содержит нелинейные модели авторегрессии – скользящего среднего различных порядков, лучшая из которых автоматически выбирается в выходном слое сети. Рассмотрен алгоритм обучения для каждого типа нейронов сети. Работа предложенной ИНС промоделирована на синтетических и реальных данных электропотребления, проведено сравнение с известными методами прогнозирования, показавшее преимущество предложенного подхода.

Предложен нейросетевой метод прогнозирования тренд-сезонных процессов потребления электроэнергии, в котором сначала исключается трендовая компонента, а затем априори известное фиксированное количество гармонических компонент обрабатывается в параллельном режиме. Проведено имитационное моделирование данного метода на реальных ежегодных данных электропотребления.

Предложен нейросетевой метод прогнозирования полигармонических процессов потребления электроэнергии, в котором гармонические компоненты выделяются последовательно, что дает возможность прогнозировать априори неизвестное, изменяющееся во времени количество гармонических компонент в процессе. Имитационное моделирование на реальных данных потребления электроэнергии подтвердило работоспособность и эффективность разработанного метода.

Усовершенствован метод обучения специализированных НФС для краткосрочного прогнозирования процессов потребления электроэнергии. За счет введения регуляризатора стало возможным увеличить скорость обучения на «плато» целевой функции и избежать «паралича» сети, что в целом повысило качество ее обучения. С использованием данного метода решена реальная задача краткосрочного прогнозирования электропотребления в Западной энергосистеме ГП НЭК «Укрэнерго», полученные прогнозы оказались точнее вычисленных с помощью ранее применявшихся методов.

В работе усовершенствован метод обучения ИНС встречного распространения за счет использования стратегии «победитель получает больше» с использованием биполярной функции соседства, в результате чего повышается качество кластеризации в первом скрытом слое сети, что позволяет повысить точность прогнозирования процессов электропотребления в узлах электроэнергетической системы. Эффективность метода доказана экспериментально на реальных данных электропотребления Западной энергосистемы Украины.

Результаты диссертационной работы внедрены в ООО «Хартэп» и Западной энергосистеме ГП НЭК «Укрэнерго», а также в учебный процесс на кафедре искусственного интеллекта Харьковского национального университета радиоэлектроники, и в научно-исследовательские работы Харьковского национального университета радиоэлектроники.

Применение всего комплекса предложенных интеллектуальных методов позволяет повысить эффективность решения задач прогнозирования процессов потребления электроэнергии на интервалах от 1 часа до нескольких лет. Полученные теоретические результаты были исследованы экспериментально на синтетических и реальных данных, где показали свое преимущество перед известными, широко применяемыми в мировой практике методами. Выполнено практическое внедрение разработанных методов, что подтверждено соответствующими актами.

Ключевые слова: нейронная сеть, нейро-фаззи сеть, функция принадлежности, метод обучения, прогнозирование потребления электроэнергии.

ABSTRACT

Rybalchenko T.V. Electric load forecasting based on artificial neuro-fuzzy networks. – Manuscript.

The thesis for the candidate's (Ph.D.) degree in technical sciences, specialty 05.13.23 – Artificial Intelligence Systems and Tools. – Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, 2011.

A locally recurrent ANN architecture for long-term electric load forecasting is proposed, where the first hidden layer contains nonlinear autoregressive – moving average models of various orders, the best of which is automatically selected in the output layer of the network. A neural network method for the trend-seasonal electric load forecasting is proposed, which initially excludes the trend component, and then a priori fixed number of harmonic components is processed in parallel. A neural network forecasting method for polyharmonic energy consumption processes is proposed, where the harmonic components are treated sequentially, which makes it possible to forecast a priori unknown, time-varying number of harmonic components in the process. Learning methods for the specialized NFN for short-term electric load forecasting are improved. Introducing a regularization term, it is possible to increase the learning rate on “plateaus” of the objective function and to avoid “paralysis” of the network that generally improved the quality of its learning. An improved learning method for the counterpropagation ANN is proposed that uses the “winner takes more” strategy with bipolar neighborhood function, resulting in a higher quality of clustering in the first hidden layer of the network, which enables more accurate forecasting of electric load in the power grid nodes. The effectiveness of the proposed methods is proved experimentally on real data from the Western Power System of Ukraine.

Key words: neural network, neuro-fuzzy network, membership function, learning method, electric load forecasting.

