

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України  
Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»

ВОРОНЕНКО ДМИТРО ІВАНОВИЧ



УДК 621.3.078.3

ПРОГНОЗУЮЧІ МОДЕЛІ  
ЗВ'ЯЗНОГО СПОЖИВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ РЕСУРСІВ ДЛЯ  
АВТОМАТИЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ РЕГІОНАЛЬНИМИ  
ЕНЕРГОСИСТЕМАМИ

Спеціальність 05.13.07 – автоматизація процесів керування

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків – 2011

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі електричних станцій Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України, м. Харків.

**Науковий керівник**

кандидат технічних наук,  
старший науковий співробітник  
**Махотіло Костянтин Володимирович**,  
Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»,  
виконуючий обов'язки завідувача  
кафедри електричних станцій

**Офіційні опоненти:**

доктор технічних наук, професор  
**Єфімов Олександр В'ячеславович**,  
Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»,  
завдувач кафедри парогенераторобудування

доктор технічних наук,  
старший науковий співробітник  
**Черненко Павло Олексійович**,  
Інститут електродинаміки НАН України,  
м. Київ, провідний науковий співробітник  
відділу №3

Захист відбудеться «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2012 р. о 14.30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.07 у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

Автореферат розісланий «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2012 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



Северин В. П.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Надійне, повне, якісне й екологічно безпечне задоволення потреб соціально-економічного розвитку всіх регіонів України в енергетичних ресурсах є важливим соціально-економічним завданням, рішення якого вимагає створення і впровадження сучасних систем автоматизованого управління регіональними енергосистемами. Такі системи необхідно створювати на основі моделювання енергоспоживання як найважливішої складової систем оперативного технологічного управління комплексами комунального енергопостачання.

В умовах стрімкого зростання споживання електро- та теплової енергії в побутовому секторі, що наближається до рівня промислового споживання, визначення оптимальних обсягів виробництва електроенергії стає усе більш складним завданням тому що побутові користувачі, на відміну від промислових, не підлягають адміністративним методам керування. При цьому саме зв'язне споживання електро- та теплової енергії в комунально-побутовому секторі (КПС), представленому на міському рівні компактно розташованими житловими масивами, є найбільш складним об'єктом прогнозування за кількістю і взаємозв'язаністю чинників впливу.

Аналіз вітчизняного і зарубіжного досвіду показує, що найбільш актуальною на даний момент є задача оптимального розподілення навантаги енергосистеми, для розв'язання якої потрібно вирішувати наступні задачі автоматизованого оперативного управління енергоспоживанням у КПС:

- інтелектуалізація оперативного управління комплексами комунального енергопостачання;
- підвищення якості прогнозування електро- і теплоспоживання в КПС на основі сучасних методів математичного моделювання;
- підготовка й отримання даних для створення інтелектуального ядра системи управління регіональною енергосистемою.

Значний внесок у розвиток методів розв'язання цих задач внесли такі вчені, як О. В. Кириленко, А.В. Праховник, Г. К. Вороновський, Л.М. Любчик, М.Е. Куссуль, Є.В. Бодянский, С. О. Сергєєв, П. О. Черненко, Д. Парк та інші.

Таким чином, створення інтелектуальних автоматизованих систем керування та синтез прогнозуючих моделей споживання енергоресурсів у комунально-побутовому секторі є актуальною науково-практичною задачею, вирішення якої дозволить запровадити перспективні підходи в оперативному управлінні енергозабезпеченням побутових споживачів та забезпечити компроміс між якістю та економічністю роботи регіональних енергопостачальних комплексів.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана на кафедрі електричних станцій НТУ «ХПІ» у відповідності з планом науково-дослідних робіт МОН України в межах держбюджетної теми «Контроль стану, діагностика та управління обладнанням ТЕЦ на основі інформаційних технологій» (ДР № 0106U005158), а також під час виконання НДР «Розробка алгоритмів управління температурними режимами теплоносія з метою енергозбереження при виробництві теплової енергії на ВАТ «Харківська

ТЕЦ-5» (м. Харків), у яких здобувач був виконавцем.

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є розробка комплексу прогнозуючих моделей зв'язного споживання енергетичних ресурсів у комунально-побутовому секторі для системи автоматизованого управління регіональною енергосистемою.

Для досягнення зазначеної мети поставлено такі задачі:

1) розробити методику синтезу прогнозуючих моделей зв'язного споживання електроенергії та тепла в комунально-побутовому секторі з використанням методів автоматичного визначення оптимальної архітектури моделей для удосконалення добового прогнозування енергоспоживання;

2) розробити методологію агрегованого подання метеоданих у вигляді багатоденних метеосценаріїв для підвищення якості роботи предиктивного ядра автоматизованої системи управління;

3) синтезувати моделі добового споживання електроенергії житловим масивом великого міста на прикладі м. Харкова та розробити на їх основі адаптивне прогнозує ядро автоматизованої системи управління регіональною енергосистемою;

4) розробити методи й алгоритми автоматизованого управління регіональною енергосистемою на основі комплексу прогнозуючих моделей зв'язного споживання енергетичних ресурсів для підвищення якості його експлуатації.

*Об'єктом дослідження* є процеси автоматизованого управління регіональними енергосистемами.

*Предметом дослідження* є прогнозує моделі зв'язного споживання енергетичних ресурсів у комунально-побутовому секторі.

**Методи дослідження.** Методи системного аналізу використовувались для розробки методики синтезу прогнозуючих моделей зв'язного споживання електроенергії та тепла в комунально-побутовому секторі, а також для розробки методології агрегованого подання метеоданих у вигляді багатоденних метеосценаріїв. Методи нейромережових інформаційних технологій моделювання, методи локальної оптимізації та методи кластерного аналізу – для синтезу моделей добового споживання електроенергії житловим масивом м. Харкова. Методи імітаційного моделювання та статистичного аналізу експериментальних даних – для оцінки точності та ефективності розроблених прогнозуючих моделей.

**Наукова новизна одержаних результатів.** Основний науковий результат дисертаційної роботи полягає в розробці комплексу прогнозуючих моделей для прогнозування зв'язного споживання електричної енергії в побутовому секторі під час опалювального сезону, що дозволяє покращити ефективність автоматизованого керування систем електропостачання.

Наукова новизна визначається наступними положеннями:

1. Вперше розроблений комплекс прогнозуючих моделей універсальної самонастрайовальної архітектури для автоматизованої системи управління регіональною енергосистемою на основі моделей добового зв'язного споживання енергетичних ресурсів, що забезпечує визначення оптимальних параметрів моделей.

2. Вперше запропонована і обґрунтована методологія комплексного агре-

гованого представлення метеоданих у вигляді типових метеосценаріїв на основі кластерного аналізу і карт Кохонена з самоорганізацією, що забезпечує максимально повне та компактне представлення метеоданих за декілька днів і підвищення точності прогнозування зв'язного споживання енергетичних ресурсів.

3. Одержали подальший розвиток методи і алгоритми побудови моделей добового зв'язного споживання електро- та теплової енергії в КПС в опалювальному сезоні, що відрізняються використанням нейромереж каскадної кореляції і збільшують точність прогнозування.

4. Одержали подальший розвиток методи налаштування параметрів штучних нейромереж з використанням вдосконаленого методу Левенберга-Марквардта, що дозволяє підвищити точність прогнозуючої моделі добового споживання електроенергії в комунально-побутовому секторі.

5. Вдосконалені алгоритми прогнозування добового енергоспоживання житловими масивами великого міста з використанням техніки прогнозування категорій, що забезпечує поліпшення надійності та точності автоматизованого управління енергосистемою під час опалювального сезону.

**Практичне значення одержаних результатів.** Для підвищення якості експлуатації енергетичного комплексу синтезовані прогнозуючі моделі до системи автоматизованого управління регіональною енергосистемою. Запропонована автоматизована система для підтримки прийняття рішень регіональним координаційним центром при управлінні та плануванні обсягів споживання електроенергії в комунально-побутовому секторі великого міста на прикладі м. Харкова. Створени алгоритми і програмні засоби для синтезу та аналізу прогнозуючих моделей добового енергоспоживання та для трансформації метеоданих у метеосценарії для використання в комплексі прогнозуючих моделей.

Розроблені прогнозуючі моделі, методи, алгоритми та програми для системи автоматизованого управління регіональною енергосистемою впроваджені у АК «Харківобленерго» (м. Харків) для проведення робіт із удосконалення методології планування обсягів електроенергії для побутових користувачів. Матеріали дисертації використовуються на кафедрі електричних станцій НТУ «ХП» в навчальному процесі при викладанні дисциплін «Сучасний математичний апарат енергетики» та «Облік та керування електроспоживанням».

**Особистий внесок здобувача.** Всі основні результати дисертації, які виносяться на захист, отримані здобувачем самостійно, серед них – методика синтезу прогнозуючих моделей зв'язного споживання електроенергії та тепла в комунально-побутовому секторі з використанням методів автоматичного визначення оптимальної архітектури моделей; методологія агрегованого подання метеоданих у вигляді багатоденних метеосценаріїв; результати синтезу моделі добового споживання електроенергії житловим масивом м. Харкова; методи й алгоритми автоматизованого управління регіональною енергосистемою на основі комплексу прогнозуючих моделей зв'язного споживання енергетичних ресурсів.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати роботи доповідались та обговорювались на: V Міжнародній науковій конференції «Проблеми інформатики і моделювання» (м. Харків, 2005); III Науково-технічній конфере-

нції «Інформаційні технології в енергетиці» (м. Київ, 2005); Науковому семінарі з міжнародною участю «Інформаційні технології в забезпеченні економічної безпеки держави» (м. Київ, 2005); XIII та XVIII Міжнародних науково-технічних конференціях «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (м. Харків, 2005, 2010); XVI Міжнародній конференції з автоматичного керування «Автоматика» (м. Чернівці, 2009).

**Публікації.** Результати дисертації опубліковані в 14 наукових працях, серед яких 6 – у наукових фахових виданнях України.

**Структура дисертації.** Дисертаційна робота складається із вступу, 4 розділів, висновків, додатків та списку використаних літературних джерел. Повний обсяг дисертації складає 162 сторінки, включаючи 42 рисунок по тексту, 35 таблиць по тексту, списку з 145 найменування використаних джерел на 16 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтована актуальність дослідження, сформульована мета і визначені основні задачі роботи, дається характеристика наукової новизни і практичної значущості одержаних результатів, містяться відомості про апробацію основних результатів роботи.

**Перший розділ** присвячено аналізу методів керування енергопостачанням регіональних енергосистем у комунально-побутовому секторі.

Структура комунально-побутового сектора в електроенергетичній системі міста Харкова представлена на рис. 1. Розглянуто функції електроенергетичної системи регіонального рівня стосовно міста Харкова, проаналізовано потоки постачання ПЕР та керуючі дії, що мають місце під час роботи регіональної електроенергетичної системи.

Виконано аналіз основних задач автоматизованого керування енергоспоживанням у комунально-побутовому секторі, розглянуто особливості концепції керування, заснованого на аналізі зв'язного споживання енергоресурсів з метою виявлення моментів виникнення їх надмірного споживання, що є індикатором ступеня дискомфорту побутових споживачів внаслідок погіршення якості тепlopостачання. Виконано аналіз практичного досвіду керування побутовими споживачами, виділені організаційні тенденції та проідентифіковані ті з них, які найбільш важливі для України з урахуванням сучасного стану регіональних і муніципальних енергосистем у нашій країні. Запропоновано і обґрунтовано підхід до вдосконалення ефективності та якості керування регіональними енергосистемами шляхом розробки і застосування прогнозуючих моделей на базі нейромережових інформаційних технологій.

Розглянуті математичні моделі та методи розв'язання задач прогнозування добового електроспоживання в комунально-побутовому секторі, а саме: класичні методи прогнозування, такі, як авторегресія, диференціальні рівняння та метод Калмана, а також прогнозування добового енергопопиту на основі штучних нейронних мереж. Визначені основні переваги і недоліки штучних нейронних мереж стосовно задач добового прогнозування енергоспоживання, а також

ступінь впливу цих недоліків на якість керування.

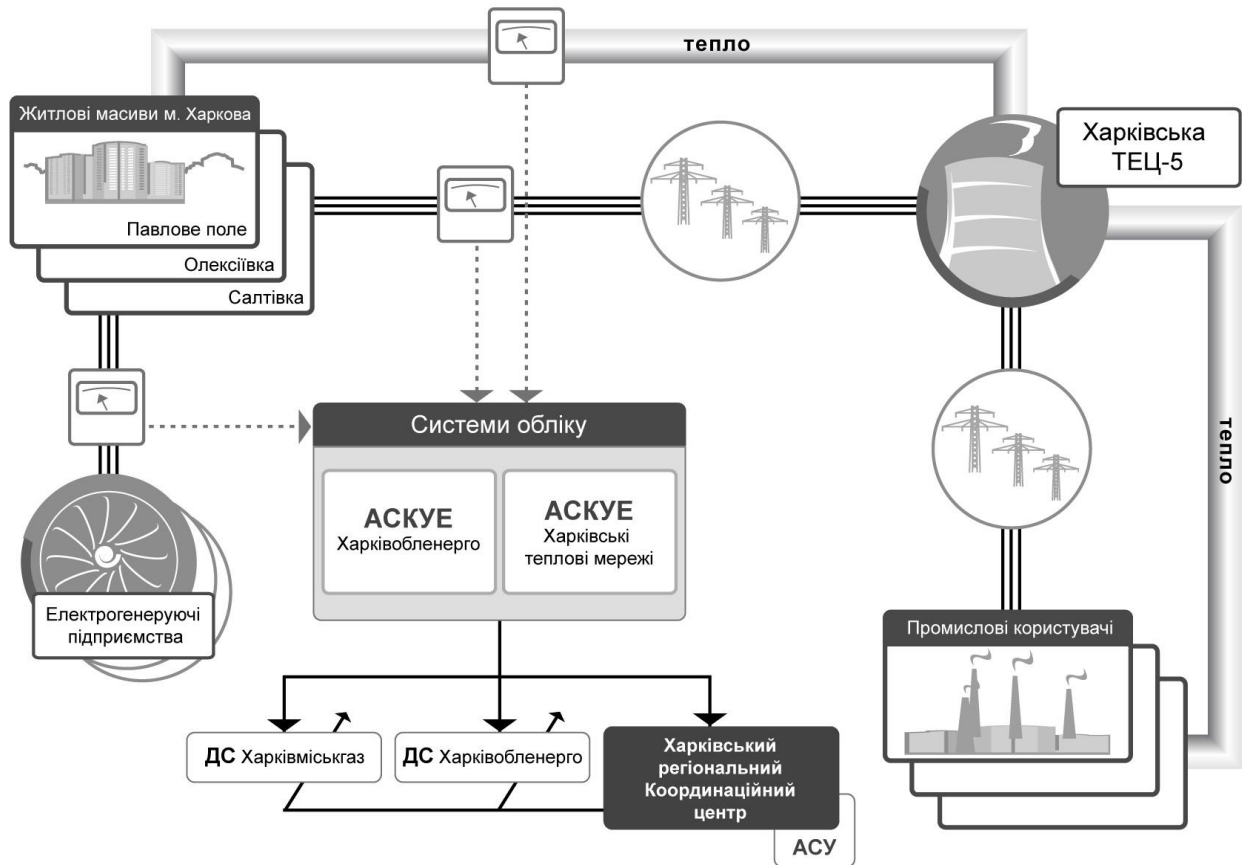


Рис. 1. Структура КПС в електроенергетичній системі Харкова

Виконаний аналіз інформаційних технологій та існуючих систем моніторингу якості енергопостачання побутових споживачів у реальному масштабі часу на прикладі реалізованої в місті Харкові системи моніторингу якості тепlopостачання, що охоплює тепловий район Харківської ТЕЦ-5 та створена колективом розробників під керівництвом чл.-кор. НАН України д.т.н. Г. К. Вороновським у 2000 р. на базі відомчої АСКУЕ, яка належить АК «Харківобленерго». Проаналізовані особливості інформаційних потоків, що виникають при використанні інформаційної системи моніторингу.

На основі аналізу задач автоматизованого керування енергоспоживанням у комунально-побутовому секторі обґрунтований напрямок досліджень дисертаційної роботи.

**Другий розділ** присвячено розробці методології покращення якості прогнозування енергоспоживання на основі нейромережових технологій.

Проведено порівняння прогнозуючих моделей штучних нейронних мереж (ШНМ) із радіальними базисними функціями (РБФ) та багатошарових перцептронів (БШП). Оскільки одним з недоліків БШП є необхідність експериментального визначення оптимальної кількості прихованих шарів і кількості нейронів в кожному прихованому шарі, а без встановлення оптимальної архітектури неможливе коректне порівняння нейромереж БШП і РБФ, проведено тестування багатошарових перцептронів із різною кількістю прихованих нейронів і вибір

найбільш ефективного варіанту.

Дві найкращі архітектури з 10 та 13 нейронами в одному прихованому шарі мали середню відносну помилку прогнозування 3%, порівняну з отриманою в роботі проф. Г. К. Вороновського помилкою при використанні РБФ мереж. З урахуванням наявності алгоритмів, які покращують узагальнювальну здатність багатшарових перцептронів, зроблений висновок про можливість подальшого зменшення помилки у разі обґрунтованого застосування БШП.

Для проведених досліджень використані дані з архівів Гідрометеоцентру м. Харкова, дані з архівів АСКУЕ «Харківобленерго», що діє з 90-х років та має більше 2000 вузлів обліку на фідерах міських підстанцій, а також дані про теплоспоживання різних районів міста Харкова, отриманих Харківською ТЕЦ-5 за декілька років спостережень.

Остаточна структура вхідного шару штучної нейронної мережі представлена в табл. 1 і забезпечує перетворення «вхід»-«вихід» вигляду

$$W_{k+1} = \text{NN}(\rho_{k+1}, \gamma_{k+1}, \underline{T}_{k+1}, \bar{T}_{k+1}, \underline{T}_k, \bar{T}_k, Q_{k+1}, Q_k, W_k). \quad (1)$$

Таблиця 1

### Структура вхідного шару штучної нейронної мережі

№	Найменування змінної	Позначення
1	Номер дня в півріччі світлового циклу	$\rho_{k+1}$
2	Тип дня тижня	$\gamma_{k+1}$
3	Прогноз мінімальної нічної температури на завтра	$\underline{T}_{k+1}$
4	Прогноз максимальної денної температури на завтра	$\bar{T}_{k+1}$
5	Мінімальна нічна температура поточної доби	$\underline{T}_k$
6	Максимальна денна температура поточної доби	$\bar{T}_k$
7	Плановане на завтра постачання тепла	$Q_{k+1}$
8	Споживання теплової енергії поточної доби	$Q_k$
9	Споживання електричної енергії поточної доби	$W_k$

Одним із недоліків БШП є необхідність пошуку оптимальної архітектури. Проте, існують нейронні мережі каскадної кореляції Фалмана, що самоконструюються, представлені на рис. 2, які забезпечують автоматичне визначення числа елементів прихованого шару в процесі навчання.

На кожному кроці навчання в нейронну мережу вставляється новий каскад між вихідними нейронами та попередніми каскадами і ваги з'єднуються так, як показано на рис. 2. Важливою особливістю алгоритму навчання таких ШНМ є використання перед градієнтним сходженням етапу максимізації коваріантності між виходом нейрона-кандидата і помилкою вихідного нейрона.

Щоб порівняти роботу нейронних мереж каскадної кореляції та роботу прямого перебору для пошуку оптимальної архітектури багатшарового перцептрона, проведена серія експериментів на двох різних наборах даних.



Експериментально встановлено, що часові й обчислювальні ресурси, потрібні для прямого перебору БШП, в 6-14 разів більше, ніж ресурси, необхідні для знаходження оптимальної архітектури за допомогою нейронної мережі каскадної кореляції Фалмана. Мережі каскадної кореляції програють БШП у крайніх оцінках помилки, але виявляються краще в середніх показниках точності. Кількість вхідних нейронів у мережі Фалмана більша, але натомість досягається одночасне розв'язання як задачі навчання, так і пошуку оптимальної архітектури, а також спостерігається економія обчислювальних ресурсів в 6-14 разів.

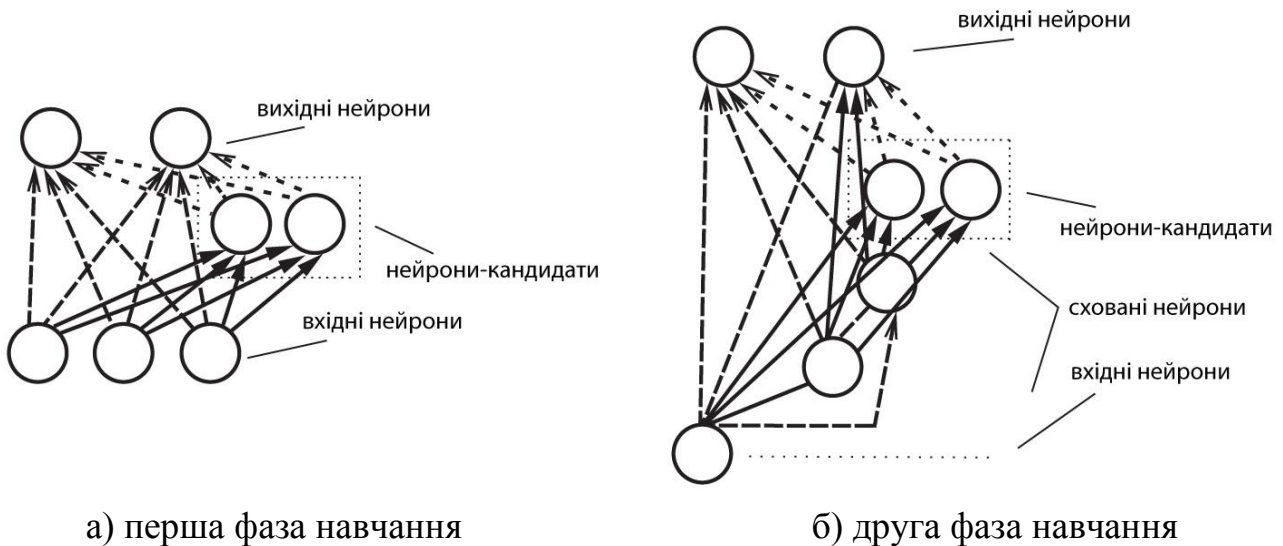


Рис. 2. Навчання нейронних мереж Фалмана

Для підвищення якості прогнозування з використанням ШНМ типу БШП, окрім класичного алгоритму зворотного поширення помилки, використаний алгоритм Quick Propagation, а також протестовані алгоритми навчання другого порядку: Conjugate Gradient Descent, Quasi-Newton, Quasi-Newton (limited memory) і Levenberg - Marquardt.

У результаті проведеного порівняння найбільш ефективним виявився алгоритм Левенберга-Марквардта. Проведені дослідження з поліпшення цього алгоритму навчання для забезпечення мінімізації помилки прогнозування зв'язного споживання електричної енергії та тепла в КПС. Однією з особливостей даного алгоритму є його чутливість до гладких локальних мінімумів. Для подолання цього недоліку розроблені і протестовані два евристичні підходи, які дозволяють уникнути «залипання» пошукового процесу в локальних мінімумах.

Оригінальний алгоритм Левенберга-Марквардта не дозволяє здійснювати кроків, що збільшують середню помилку. Перша евристика випадкового кроку примушує алгоритм здійснювати «ризиковані» кроки по поверхні помилки у випадковому напрямі з величиною кроку  $2\tau$ , що складається з постійної частки  $2\rho$ , та номеру кроку  $\tau$ , який забезпечує поступове збільшення довжини кроку, намагаючись таким чином «вискочити» з локального мінімуму

$$w_{m+\tau} = w_{m+\tau-1} + 2\tau\rho. \quad (2)$$

Друга евристика струсу вагів полягає в тому, щоб після досягнення лока-

льного мінімуму змінювати ваги нейронної мережі випадково на величину, меншу або рівну  $\theta$ ,

$$w_{m+1} = w_m + \theta w_m. \quad (3)$$

Величина  $\theta$  для даної предметної області була підібрана емпірично в результаті чисельних експериментів і встановлена рівною 0,05.

Результати тестування евристик (2) і (3) у вигляді значень середньоквадратичної помилки (СКП) наведені в табл. 2, яка доводить, що евристики підвищують вірогідність знаходження вдалих рішень.

Таблиця 2

### СКП прогнозування при використанні різних евристик

Тест №	Оригінальний алгоритм			Евристика випадкового кроку			Евристика струсу вагів		
	мін.	макс.	серед.	мін.	макс.	серед.	мін.	макс.	серед.
1	5,16	13,54	6,12	3,93	12,25	6,23	4,02	13,12	6,54
2	0,13	0,28	0,16	0,11	0,25	0,13	0,27	0,28	0,30
3	184,3	308,6	231,1	208,1	321,4	240,9	186,3	338,3	228,6
4	13,97	18,30	15,81	11,6	18,47	16,11	10,98	17,01	14,77
5	6,51	10,83	9,01	4,48	11,6	8,63	5,18	10,69	8,33

На рис. 3 приведені графіки порівняння фактичних  $W_{k+1}$  і прогнозних  $W_{k+1}^p$  значень для найкращої нейронної мережі (1), отриманої за допомогою поліпшеного алгоритму Левенберга-Марквардта для житлового масиву «Олексіївка» для 4-х опалювальних сезонів.

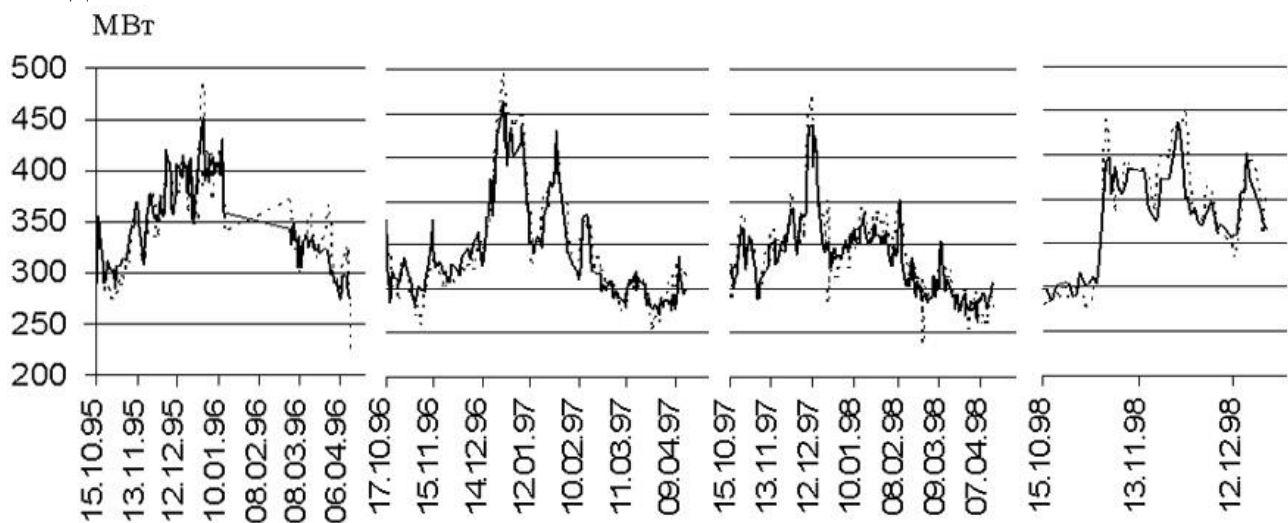


Рис. 3. Порівняння фактичних значень з прогнозами моделі

Для аналізу найкращої нейромережевої моделі були зібрані статистичні показники якості моделі для тренувального набору, наведені в табл. 3.

Таблиця 3

**Звідна таблиця абсолютних помилок (АП) та СКП моделі**

Набір	Значення	Факт, МВт	Прогноз, МВт	АП, МВт	СКП
Тренувальний набір	мін.	226	261	0,03	0
	макс.	546	503	101	0,36
	серед.	343	344	103	0,03

Також можна виділити ще одну статистично підтверджену особливість – велику важливість температури і погодних сценаріїв для якості роботи моделі. На основі емпіричних знань в енергетиці, а також на основі отриманих результатів, зроблено висновок, що для поліпшення якості прогнозу енергоспоживання необхідно детальніше оцінювати вплив погоди на якість прогнозу і вибирати найкращий формат представлення метеоданих.

У **третьому розділі** розроблена й обґрунтована методологія комплексного агрегованого представлення погодних даних у вигляді метеорологічних сценаріїв. Обґрунтування необхідності такого представлення метеоданих проведено за допомогою експериментів з додаванням до прогнозованої температури погрішності різного знаку і величини, що дозволило визначити міру впливу погрішності метеопрогнозу на помилку прогнозування добового енергоспоживання.

Для цих експериментів синтезовані 9 додаткових баз даних. У першій з них фактичний прогноз температури був змінений на 5% в позитивному напрямку, в другій – на 30%, в наступних шести базах даних – на 50%, 100%, –5%, –30%, –50%, –100% відповідно. Остання база даних була створена шляхом зміни фактичного прогнозу на випадкову величину в діапазоні від –100% до 100%.

У процесі тренування моделі використовувалися «правильні» значення, а в процесі тестування – «розхитані» значення прогнозу температури. Головний висновок експериментів наступний: різниця в знаку прогнозу переважно впливає на якість роботи нейронної мережі. Основний приріст помилки дає знак погрішності прогнозу. Якщо, наприклад, помилка прогнозу в ту ж сторону на 100% може погіршити точність прогнозу з 3% до 5%, тобто не більше, ніж в 1,7 рази, то зміна знаку при величині помилки усього на 5% збільшує погрішність з 3% до 14%, тобто в 4,7 рази.

Другий висновок, важливий для практики, – це дуже низька вірогідність прогнозу електроспоживання з помилкою більше 27%, навіть якщо прогноз погоди в 2 рази (на 100%) відрізнятиметься від дійсної температури. Таким чином, це значення максимально можливої погрішності можна вважати оцінкою максимального впливу метеопрогнозу на якість прогнозування енергоспоживання.

Для статистичного виявлення метеосценаріїв обґрунтовано використання карт Кохонена, що самоорганізуються, – одного з нових методів кластеризації.

Оскільки для практичних завдань регулювання енергопостачання важли-

віщою є зміна температури в порівнянні з поточним станом, чим її абсолютне значення, вирішено синтезувати базу даних на основі середньодобової температури  $T(t)$  та змін температури за останній день  $\Delta T(t)$  і два попередні дні  $\Delta T(t-1)$ ,  $\Delta T(t-2)$ .

При розбитті на 27 кластерів отримане найбільш детальне розбиття, представлене на рис. 4, яке і прийняте для подальшого аналізу.

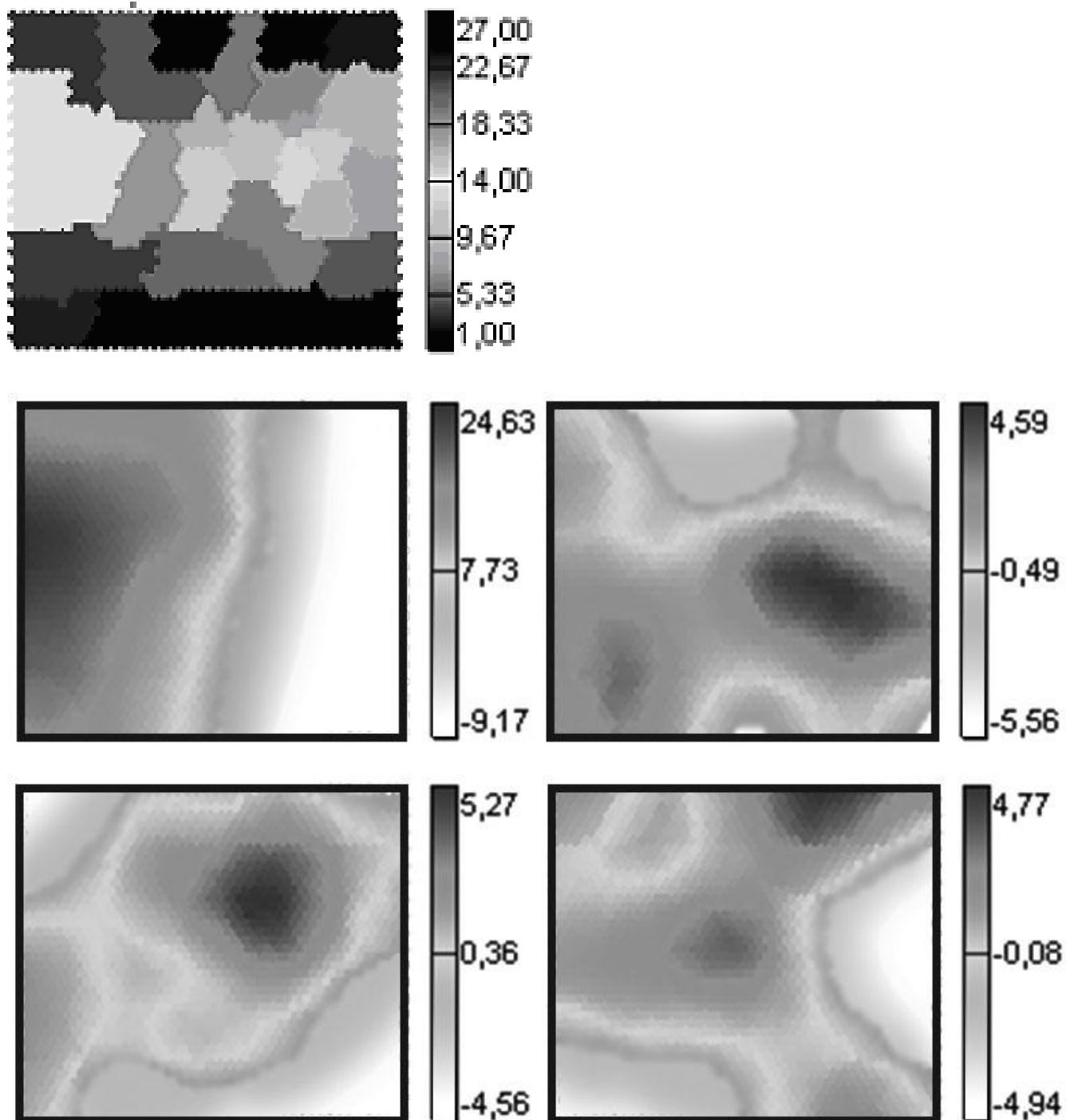


Рис. 4. Карта кластерів і карти ознак для  $T(t)$ ,  $\Delta T(t)$ ,  $\Delta T(t-1)$ ,  $\Delta T(t-2)$

Подальший пошук залежностей усередині кластера проводиться за допомогою аналізу відгуків, основним завданням якого є визначення експертних

знань з кластерного розбиття, зробленого статистичним методом.

Для кожного запису візуально проведений аналіз його одночасної приналежності до того або іншого кластеру й патерну зміни температури. У результаті аналізу отримано експертно значиме розбиття на 9 кластерів. Ці кластери визначили 9 базових метеосценаріїв поведінки погоди за трьома останніми днями.

Введено графічне та мнемонічне кодування метеосценаріїв, представлене в табл. 4. Щоб співвіднести безперервну зміну температури дискретним патернам, запропоновано обчислювати зміну середньодобової температури для двох суміжних днів. Якщо збільшення температури складає більше двох градусів, то наступний день вважається днем підвищення температури і в графічному відображенні йому відповідає зростаючий відрізок прямої. Якщо зменшення температури складає більше двох градусів, то наступний день вважається днем зниження температури і йому відповідає спадний відрізок. Якщо зміна температури не перевищить двох градусів, то температура приймається незмінною і їй відповідає горизонтальний відрізок. Якщо сценарій допускає будь-яку поведінку температури у перший день, то йому відповідає пунктирний горизонтальний відрізок. Проведено статистичний аналіз предикативної здатності метеосценаріїв.


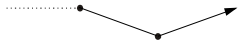
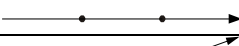

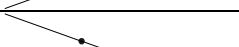

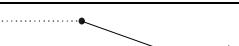
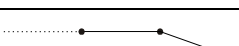
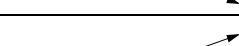
У **четвертому розділі** представлена практична інтеграція розроблених прогнозуючих моделей в автоматизовану систему керування регіональним енергопостачанням.

У поточних економічних та організаційних умовах на сучасних енергогенеруючих підприємствах України необхідно, щоб вихідний сигнал предиктора прямо інструктував автоматизовану систему або диспетчера про оптимальну послідовність дій. Для досягнення цієї мети запропоновано перейти від задачі регресії до задачі класифікації. У результаті предиктор генерує один з 9 ознаків-категорій, які вказують на спрямованість динаміки майбутньої зміни попиту на електроенергію, на випадок виникнення якої використовуються заздалегідь розроблені інструкції для диспетчера або запрограмовані керуючі дії автоматизованої системи.

Для підтвердження практичної значущості результатів роботи проведено порівняння точності отриманої категоріальної моделі з точністю моделі, яка

Таблиця 4

## Базові метеосценарії

№	Графічне відображення базового метеосценарію	Мнемонічне позначення
1		«А»
2		«V»
3		«-»
4		«/»
5		«\»
6		«F»
7		«L»
8		«T»
9		«J»

безпосередньо прогнозує числове значення енергоспоживання на завтра. Результати порівняння числової та категоріальної моделей наведені в табл. 5.

Таблиця 5

## Порівняння числової та категоріальної моделей

Категорія $\Delta W_C$	Відсоток вірно класифікованих записів перевірного набору		Відсоток вірно класифікованих записів повного набору	
	Числова модель	Категоріальна модель	Числова модель	Категоріальна модель
$H -$	60%	85,71%	38,46%	50%
$h -$	0%	80%	0%	100%
$\hat{h} -$	17,65%	84,62%	25%	48,15%
$\eta -$	38,89%	64,29%	38,46%	56,25%
$o$	64,81%	90,5%	28,57%	42,86%
$\eta +$	18,52%	72,22%	0%	50%
$\hat{h} +$	21,43%	72,22%	11,11%	60%
$h +$	0%	100%	80,11%	82,22%
$H +$	22,22%	80%	41,67%	41,51%

Перша частина таблиці відображає значно кращу якість прогнозу категоріальної моделі в порівнянні з числовою моделлю для перевірного набору. У другій частині таблиці представлена оцінка моделей на наборі даних за увесь доступний період. Різниця в якості класифікації не настільки разюча, як в першому випадку, проте якість категоріальної моделі вище навіть для даних з періоду з іншим соціально-економічним контекстом.

На підставі проведених досліджень виконаний синтез прогнозуючої моделі зв'язного енергоспоживання на основі нейронних мереж каскадної кореляції з прогнозуванням категорій та з використанням метеосценаріїв. Для чотирьох категорій  $H +$ ,  $h +$ ,  $h -$  і  $\hat{h} -$  отримана та ж якість прогнозування, а для п'яти категорій  $\hat{h} +$ ,  $\eta +$ ,  $H -$ ,  $o$  і  $\eta -$  досягнуте поліпшення точності прогнозування. Таким чином, запропонований підхід у вигляді категорій покращує точність прогнозу.

Розроблені методології та моделі складають прогнозуюче ядро автоматизованих систем управління регіональною енергосистемою й можуть використовуватися як для підтримки ухвалення рішень регіональним координаційним центром, так і для коригування схеми живлення підстанцій регіональної або міської електромережі, а також для автоматичного регулювання навантаження джерел електропостачання.

Запропонована автоматизована система управління регіональною енерго-

системою міста Харкова представлена на рис. 6.

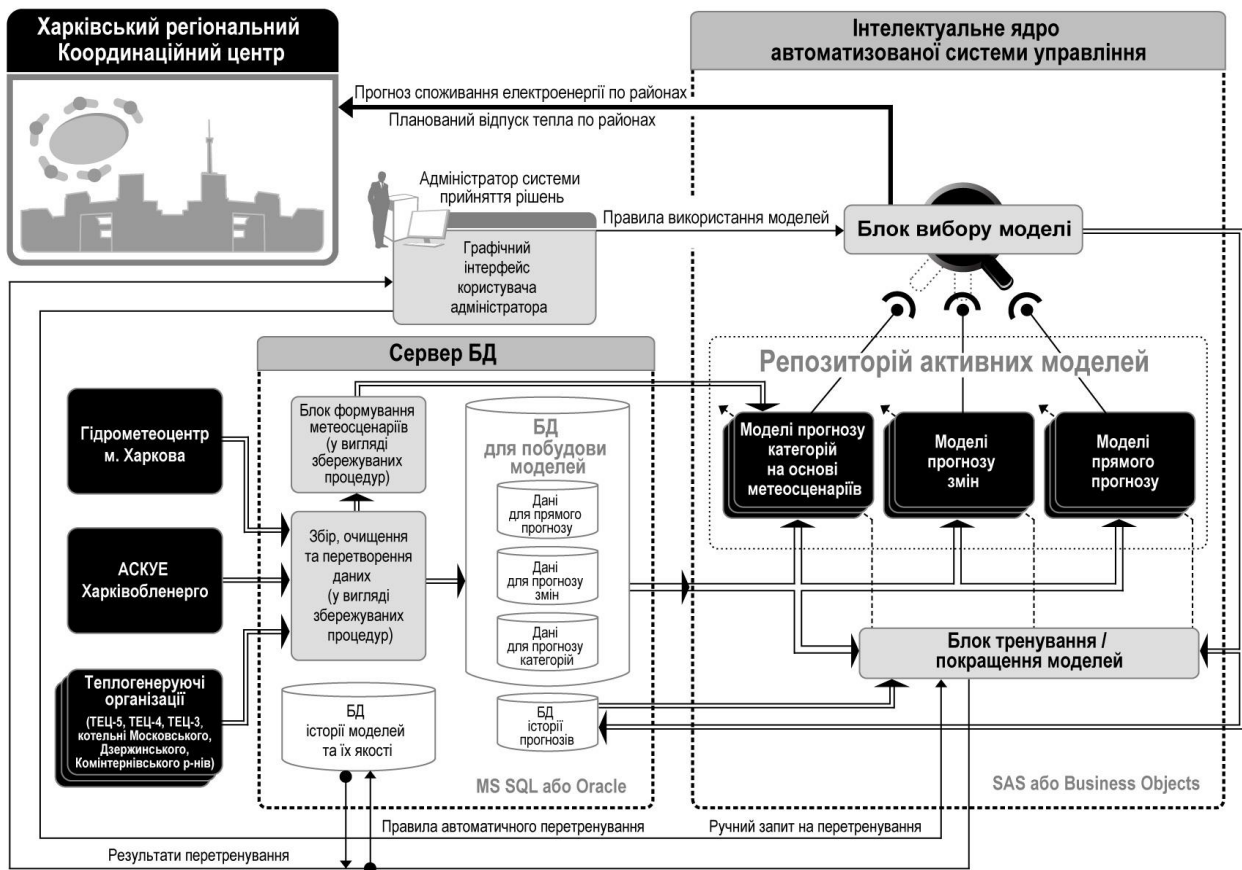


Рис. 6. Автоматизована система управління енергосистемою м. Харкова

У автоматизованій системі потоки даних витікають з трьох основних джерел: Гідрометеоцентру, АСКУЕ Обленерго та систем збору телеметричної інформації відповідних теплогенеруючих підприємств. Ці дані поступають в блок очищення, сортування й перетворення даних. Підготовлені таким чином дані подаються в блок формування метеосценаріїв і в базу даних (БД) для побудови моделей, з яких перетворені дані поступають на вхід активних прогнозних моделей на сервері прийняття рішень. Для розширення доступних методів прийняття рішення репозиторій може бути доповнений моделями на основі нечіткої логіки і блоками фазифікації/дефазифікації змінних.

Згідно з правилами використання моделей, що задаються адміністратором системи, блок вибору моделей автоматично починає виконувати операцію прогнозування на нову добу для кожного з районів.

Співробітник координаційного центру аналізує прогнози й коригує плани розподілу електричної енергії та тепла по районах або представляє прогнози для аналізу щоденним зборам координаційного центру, які й приймають остаточні рішення.

Таким чином, експериментально доведена ефективність й працездатність запропонованих прогнозуючих моделей та методологій прогнозування електроспоживання у комунально-побутовому секторі, а також запропоновано проект

та принципи побудови автоматизованої керуючої системи у рамках концепції регіонального координаційного центру. Запропонована автоматизована система дозволяє відчутно підвищити ефективність оцінки щоденної ситуації за рахунок синергетичного ефекту, а також за рахунок використання розроблених підходів, методологій та синтезованих моделей.

Розроблені методології й алгоритми практично реалізовані у АК «Харківобленерго» під час проведення робіт з вдосконалення методології планування обсягів електроенергії для побутових користувачів, що дозволило підвищити рівень ефективності функціонування муніципальної енергосистеми.

## ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота присвячена розв'язанню науково-практичної задачі розробки методів, прогнозуючих моделей та інформаційних технологій для системи автоматизованого управління регіональною енергосистемою з метою підвищення якості, ефективності та безпеки функціонування електроенергетичних систем за рахунок удосконалення методів прогнозування попиту на електроенергію у комунально-побутовому секторі.

Основні результати роботи полягають у наступному:

1. Проведено аналіз стану та тенденцій розвитку автоматизації процесів керування регіональними енергосистемами і обґрунтована необхідність розробки комплексу прогнозуючих моделей, що дозволяє суттєво вдосконалити систему керування та якість прогнозування енергоспоживання в комунально-побутовому секторі.

2. Розроблена методика синтезу прогнозуючих моделей зв'язного споживання електро- та теплової енергії у комунально-побутовому секторі з використанням методів автоматичного визначення оптимальної архітектури моделей. На основі якої розроблений комплекс прогнозуючих моделей для інтелектуального ядра автоматизованої системи управління регіональною енергосистемою на основі предикторів добового споживання електроенергії універсальної самонастрайовальної архітектури. Такий підхід забезпечує автоматичне визначення оптимальних параметрів моделі.

3. Розроблена та обґрунтована методологія комплексного агрегованого подання метеоданих у вигляді типових метеосценаріїв на основі кластерного аналізу й карт Кохонена, які самоорганізуються, що забезпечує максимально повне та компактне представлення метеоданих за 3 останніх дні за допомогою 9 базових метеосценаріїв і призводить до суттєвого підвищення якості прогнозування.

4. Розвинені алгоритми побудови моделей добового споживання електроенергії з використанням нейронних мереж каскадної кореляції, що забезпечує поліпшення якості прогнозування та зменшення середньої відносної помилки на 2.05%.

5. Розвинена алгоритмічна база налаштування параметрів прогнозуючої моделі споживання електричної енергії у комунально-побутовому секторі на основі штучних нейронних мереж з використанням вдосконаленого методу Ле-



венберга-Марквардта, що дозволяє уникнути передчасної зупинки процесу пошуку оптимального рішення в локальних мінімумах та зменшити середньоквадратичну помилку на 4-7%.

6. Синтезовані моделі добового зв'язного споживання електро та теплової енергії побутовими районами міста Харкова на основі розвинених алгоритмів побудови моделей та налаштування їх параметрів, що забезпечує вдосконалене функціонування прогнозуючого ядра автоматизованої системи управління регіональною енергосистемою.

7. Поліпшена методологія автоматизованого керування регіональною енергосистемою на основі прогнозування енергоспоживання у комунально-побутовому секторі з використанням техніки прогнозування категорій. Це забезпечує підвищення якості експлуатації комплексу прогнозуючих моделей і спрощує визначення системою автоматизованого управління необхідної дії на регіональну енергосистему.

8. Результати впроваджені в АК «Харківобленерго» (м. Харків) та в навчальному процесі кафедри електричних станцій НТУ «ХП».

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Вороненко Д. И. Каскадные нейросети Фалмана для прогнозирования связанного потребления электричества и тепла / Д. И. Вороненко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХП». – 2004. – № 43. Т.1. – С. 193-197.

2. Вороненко Д. И. Модификация алгоритма Левенберга-Марквардта для улучшения прогностических моделей связанного потребления энергоресурсов / Д. И. Вороненко, К. В. Махотило // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХП». – 2005. – № 56. – С. 83-90.

*Здобувачем розглянуто особливості використання алгоритму Левенберга-Марквардта для прогнозування електроспоживання у побутовому секторі та запропоновано два нових способи його вдосконалення.*

3. Вороненко Д. И. Классификация метеорологических сценариев для использования в предикторах энергопотребления жилых массивов города / Д. И. Вороненко // Проблемы региональной энергетики. – АН Республики Молдова, Институт Энергетики. – 2008. – №3(8). – С. 65-72.

4. Вороненко Д. И. Категориальное прогнозирование связанного энергопотребления в коммунально-побутовому секторі / Д. И. Вороненко, К. В. Махотило // Східно-європейський журнал передових технологій. – Харків: УГА Залізничного транспорту. – 2009. – № 3/6(39). – С. 37-41.

*Здобувач запропонував спосіб прогнозування категорій приросту добового електроспоживання для комунально-побутового сектора великого міста й визначив оптимальну кількість категорій та їх числові межі для житлових масивів м. Харкова.*

5. Вороненко Д. И. Методы прогнозирования электропотребления жилых массивов на основе нейросетевых информационных технологий /

Д. И. Вороненко, К. В. Махотило // Науковий вісник Чернівецького університету. Комп'ютерні системи та компоненти. – Чернівці: ЧНУ. – 2009. – №479. – С. 88-97.

*Здобувачем розглянуто особливості задач автоматизованого керування енергоспоживанням у регіональних енергосистемах і запропоновано методологію параметричного синтезу прогножуючих моделей на основі нейромережових інформаційних технологій.*

6. Вороненко Д. И. Информационная система поддержки принятия решения при управлении региональными энергосистемами / Д. И. Вороненко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2010. – № 1. – С. 62-69.

7. Вороненко Д. И. Нові технології в автоматизованому керуванні регіональними енергосистемами / Д. И. Вороненко // Системи обробки інформації. – Харків: Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба. – 2011. – Вип. 4 (94). – С. 6-11.

8. Вороненко Д. И. Опыт синтеза и применения предикторов на базе искусственных нейронных сетей для прогнозирования спроса на электроэнергию в бытовом секторе / Г. К. Вороновский, Д. И. Вороненко // Труды 3-й научно-практической конференции «Информационные технологии в энергетике». – Киев, ИПМЭ. – 2004. – С. 45-51.

*Здобувач виконав аналіз практичних потреб електрогенеруючих підприємств та запропонував методологію синтезу предиктора енергоспоживання для використання в системах автоматизованого керування.*

9. Вороненко Д. И. Использование нейросетевых технологий для оценки темпов прироста электроотопительного потенциала в быту. / Г. К. Вороновский, Д. И. Вороненко // Труды 13-й международной научно-технической конференции «Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье». – Харьков. – 2005. – Ч. 3. – С. 137—141.

*Здобувач запропонував спосіб застосування нейромережових технологій для аналізу темпов росту електроопалювального потенціалу у комунально-побутовому секторі.*

10. Вороненко Д. И. Модификация алгоритма Левенберга-Марквардта для улучшения прогностических моделей связанного потребления энергоресурсов / Г. К. Вороновский, Д. И. Вороненко, О.В. Заработкин // Проблемы информатики и моделирования. Материалы 5-й международной научно-технической конференции. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2005. – С. 23-30.

*Здобувачем розглянуто особливості використання алгоритму Левенберга-Марквардта для прогнозування електроспоживання у побутовому секторі та запропоновано два нових способи його вдосконалення.*

11. Вороненко Д. И. Использование нейросетевых технологий для идентификации годовых приростов электроотопительного потенциала в быту / Г. К. Вороновский, К. В. Махотило, Д. И. Вороненко // Матеріали наукового семінару з міжнародною участю «Інформаційні технології в забезпеченні економічної безпеки держави». – Київ: НТУУ «КПІ». – 2005. – С. 48.

*Здобувач виконав прогнозування щорічних темпів збільшення електроопалю-*

вального потенціалу у комунально-побутовому секторі міста Харкова за допомогою нейромережових технологій.

12. Вороненко Д. И. Применение искусственных нейросетей классификационного типа для прогнозирования электропотребления в коммунально-бытовом секторе / К. В. Махотило, Д. И. Вороненко // 16-я международная конференция по автоматическому управлению «Автоматика 2009». Тезисы доповідей. – Чернівці: Книги-XXI. – 2009. – С. 300-301.

*Здобувач запропонував спосіб прогнозування категорій приросту добового електроспоживання для комунально-побутового сектора великого міста для покращення якості функціонування автоматизованих систем керування регіональними енергосистемами.*

13. Вороненко Д. И. Информационная система поддержки принятия решения при управлении региональными энергосистемами / Д. И. Вороненко // Труды 18-й международной научно-технической конференции «Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье». – Харьков. – 2010. – Ч. 3. – С. 137—141.

14. Вороненко Д. И. Использование нейросетевых технологий для идентификации годовых приростов электроотопительного потенциала в быту / Г. К. Вороновский, К. В. Махотило, Д. И. Вороненко // Экономическая безопасность государства и информационно-технологические аспекты ее обеспечения / Под общ. ред. Г. К. Вороновского, И. В. Недина. – Киев: Знания Украины. – 2005. – С. 497-504.

*Здобувач запропонував застосування технологій математичного моделювання для кількісного оцінювання річних приростів встановленої потужності побутових електроопалювальних пристроїв.*

## АНОТАЦІЇ

**Вороненко Д. І. Прогнозуючі моделі зв'язного споживання енергетичних ресурсів для автоматизованого управління регіональними енергосистемами.** – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – автоматизація процесів керування. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2011.

В дисертаційній роботі вирішена науково-практична задача розробки методів та інформаційних технологій підвищення якості, ефективності та безпеки функціонування автоматизованих систем керування регіональними енергосистемами за рахунок удосконалення методів прогнозування попиту на електроенергію у комунально-побутовому секторі. Запропоновано та обґрунтовано перспективну концепцію представлення метеоданих у виді метеосценаріїв на основі кластерного аналізу та карт Кохонена, які самоорганізуються, що дозволяє покращити якість прогнозування. Розроблена прогнозуюча модель на основі нейронних мереж каскадної кореляції, що забезпечує покращення якості прогнозування категорій добових змін попиту у комунально-побутовому секторі та

гарантує автоматичний пошук оптимальної архітектури предиктора. Вдосконалено алгоритм Левенберга-Марквардта, що дозволяє уникнути передчасної зупинки процесу пошуку оптимального рішення у локальних мінімумах та покращити якість прогнозування енергоспоживання. Розроблені методика та алгоритми прогнозування категорій використані для оптимальної інтеграції прогнозуючих моделей з системою керування регіональною електроенергетичною системою.

**Ключові слова:** автоматизоване управління, регіональні енергосистеми, прогнозуючі моделі, прогнозування енергоспоживання, нейронні мережі.

**Вороненко Д. И. Прогнозирующие модели связанного потребления энергетических ресурсов для автоматизированного управления региональными энергосистемами.** – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.07 – автоматизация процессов управления. – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2011.

В диссертационной работе решена научно-практическая задача разработки методов и информационных технологий повышения качества, эффективности и безопасности функционирования автоматизированных систем управления региональными энергосистемами за счет усовершенствования методов прогнозирования спроса на электроэнергию в коммунально-бытовом секторе.

Применительно к задаче связанного прогнозирования энергопотребления в коммунально-бытовом секторе (КБС), проведен сравнительный анализ применения таких типов архитектур прямонаправленных искусственных нейросетей как многослойные перцептроны (МСП), радиальные базисные функции, нейросети каскадной корреляции (НКК), а также таких различных алгоритмов обучения как классический алгоритм обратного распространения ошибки, алгоритм быстрого распространения, алгоритм сопряженных градиентов, алгоритм квази-Ньютона, алгоритм квази-Ньютона с ограниченным использованием памяти и алгоритм Левенберга-Марквардта. На основе проведенного анализа получила дальнейшее развитие существующая методика построения моделей суточного потребления электроэнергии жилым массивом города.

Путем сравнительного анализа выбран алгоритм Левенберга-Марквардта, как наилучший градиентный метод второго порядка обучения нейронных сетей перцептронного типа, с точки зрения минимизации ошибки прогнозирования связанного потребления электричества и тепла в КБС. Разработаны два эвристических подхода, которые позволяют избежать ложной остановки процесса поиска оптимального решения в локальных минимумах. Для предложенных эвристик обоснованы настроечные параметры оптимальные для задач автоматизированного управления региональными энергосистемами.

Разработана методика применения самоконструирующихся нейронных сетей типа каскадной корреляции для решения задач прогнозирования энергопотребления, что обеспечивает автоматический поиск оптимальной архитектуры. Согласно разработанной методике синтезирована модель прогнозирования

связного электропотребления для КБС г. Харькова на основе нейросетей каскадной корреляции. На основе специально разработанного программного обеспечения был проведен сравнительный анализ работы НКК и нейросетей типа МСП, доказывающий, что временные и вычислительные ресурсы, требуемые для прямого перебора нейросетей типа МСП в 6-14 раз выше, чем ресурсы необходимые для нахождения оптимальной архитектуры при помощи НКК.

На базе фактических метеоданных по г. Харькову проведен анализ влияния качества метео-прогноза на качественные оценки точности работы разработанных нейросетевых моделей прогнозирования энергопотребления путем добавления к прогнозной величине максимальной и минимальной температур погрешности различного направления (положительной или отрицательной) и различной величины.

На основе кластерного анализа с использованием самоорганизующихся карт Кохонена разработана методика идентификации и выделения метеосценариев, имеющих практическую ценность в моделях связного прогнозирования энергопотребления. Разработан новый формат представления прогноза погоды в виде метеосценариев, основанных на изменениях в среднесуточной температуре, выбран шаг дискретизации и оптимальное количество дней в метеосценарии. Проведена оценка предикативных возможностей 9-ти базовых метеосценариев и предложена методика использования базовых метеосценариев как дополнительной входной переменной в моделях связного прогнозирования энергопотребления.

Разработана методика перехода от задачи регрессии (прогнозирования числового значения изменения) к задаче классификации (прогнозирования категории изменения) в прогнозировании энергопотребления. Путем сравнительного анализа категориальной модели с моделями числового прогнозирования (как прямого, так и прогнозирования изменения) доказано превосходство категориальной модели с точки зрения практического применения.

Результаты проведенных исследований доказывают, что предложенные методики прогнозирования электропотребления жилых массивов позволяют повысить точность прогнозирования, а также повысить эффективность и удобство использования автоматизированных систем управления региональными энергосистемами.

**Ключевые слова:** автоматизированное управление, региональные энергосистемы, прогнозирующие модели, прогнозирование энергопотребления, нейронные сети.

**Voronenko D. I. Predictive models of connected consumption of power resources for automated management of regional power network.** – Manuscript.

Dissertation for scientific degree of candidate of engineering science on speciality 05.13.07 – automation of control processes. – National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, 2011.

The dissertation is devoted to development of methods and information technologies that increase quality, efficiency and security of automated management of regional electroenergetic systems due to improvment of forecasting methods for elec-

tricity consumption in public sector. A new conception for weather data encoding is proposed in the form of weather scenarios based on self-organizing maps. Predicative power of nine basic weather scenarios was analyzed. Based on this analysis wether scenarios were proposed to be used as an additional input to forecasting model that resulted in improvement of forecasting quality. A set of forecasting models are developed based on cascade-correlation neural networks that led to improvement of categorical forecasting that is more suitable for automated control systems for public sector since allows directly convert model output to more efficient automated control actions. Another important result is design of two different heuristics for improvement of Levenberg-Markvardt algorithm that allows eluding from local minimas and thus increases forecasting quality. All developed algorithms and methods are combines and used to design an automated control system for management of regional energosystem based on regional coorditation center with predictive core.

**Keywords:** automated control, regional energosystems, forecasting models, electricity consumption prediction, neural networks.

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized cursive letters followed by a horizontal line.