

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

КАТЮХА ІГОР АНАТОЛІЙОВИЧ



УДК 621.315:004.032.26

**ПРОГНОЗНІ МОДЕЛІ ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ
РОЗПОДІЛЬЧИХ МЕРЕЖ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ВИХІДНОЇ
ІНФОРМАЦІЇ**

Спеціальність 05.14.02 – електричні станції, мережі та системи

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2017

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі «Електротехніка та електромеханіка» Таврійського державного агротехнологічного університету Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник доктор технічних наук, професор

Овчаров Володимир Васильович,

Таврійський державний агротехнологічний університет,
завідувач кафедри електротехніки і електромеханіки

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, старший науковий співробітник

Тугай Юрій Іванович,

Інститут електродинаміки НАН України,

завідувач відділу оптимізації систем електропостачання

кандидат технічних наук, доцент

Савченко Олександр Анатолійович,

Харківський національний технічний університет

сільського господарства ім. Петра Василенка,

доцент кафедри електропостачання та енергоменеджмента.

Захист відбудеться «05» жовтня 2017 р. о 14⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 64.050.06 в Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Кирпичева, 2.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Кирпичева, 2.

Автореферат розісланий «01» вересня 2017 року

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Шевченко С.Ю.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Згідно Енергетичній стратегії України на період до 2030 року серед напрямків підвищення ефективності функціонування енергетики країни анонсовано підвищення ефективності енерговикористання та впровадження заходів енергозбереження. Ці напрямки мають реалізовуватись через узгодження потреб споживачів і можливостей постачальників електроенергії, як на довгостроковій договірній основі, так і в оперативному порядку. Незбалансованість між електропостачанням та електроспоживанням є наслідком або надлишкових втрати електроенергії, або комерційних втрати споживачів.

Прийняття керуючих рішень в таких умовах ускладнюється об'єктивною та суб'єктивною невизначеністю, яка обумовлена як недостатністю знань про функціонування електромереж, процеси електроспоживання, так і недостатнім рівнем їх інформаційного забезпечення. Прогнозування електроспоживання в задачах оперативного управління режимами електромереж, планування виробництва електроенергії, балансу потужності, створення графіків ремонту та ін. є одним із важливих інструментів для прийняття виважених, обґрунтованих рішень в умовах невизначеності.

Значний внесок в розвиток методів прогнозування електроспоживання внесли вітчизняні вчені, як Дерзский В.М., Розен В.П., Черненко П.О., Бодяньський Є.В., Попов С.В., Півняк Г.Г., Стогній Б.С., Новосельцев О.В., Ковалко М.П., Дешко В.І., Розумний Ю.Т., Буткевич О.Ф. та інші. Також закордонні вчені, як Бордюгов В.М., Тимченко В.Ф., Макоклюєв Б.І., Резніков А.П., Манусов В.З., Могиленко О.В., Allera S.V., Galiana F., Gupta P.C., Levi V.A., H. TauLee, S. Hua Chen, Asbury C.E., Farmer E.D. та інші.

Наразі у вітчизняній енергетиці задача прогнозування розглядається або в контексті енерговикористання для планування відповідних заходів на підприємствах, або в контексті енергозбереження для електропостачальних компаній. Електропостачальні компанії застосовують прогнозні моделі інтегрального електроспоживання без диференціювання по споживачах.

Між тим, після введення доповнень в «Правила користування електричною енергією» (постанова НКПРЕУ №28 від 31.07.1996 року), що зобов'язує підприємства встановлювати локальне устаткування та автоматизовані системи комерційного обліку електроенергії (АСКОЕ), які мають об'єднуватись в єдину мережу, стає можливим використовувати не тільки статистичні дані щодо електроспоживання, але і розробляти деталізовані прогнозні моделі з урахуванням особливостей графіку електроспоживання основних споживачів. Такі моделі можуть застосовуватись для обґрунтування, корегування очікуваного електроспоживання підприємств з метою врахування його при складанні договорів на поставку електроенергії, а також при оперативному управлінні режимами електромереж. Але існуючі методики прогнозування електроспоживання не

пристосовані для застосування в реальному масштабі часу на обладнанні, інтегрованому в АСКОЕ.

Таким чином, розроблення сучасного науково-методичного апарату прогнозу споживання електричної енергії в умовах невизначеності, що враховує можливості інформаційного забезпечення автоматизованих систем комерційного обліку електроенергії та особливості окремих споживачів, являє собою актуальну науково-практичну задачу оскільки дозволяє підвищити ефективність використання та збереження електричної енергії.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційну роботу виконано на електротехніки і електромеханіки Таврійського державного агротехнологічного університету згідно плану держбюджетних НДР МОН України «Ресурсозберігаючі режими передачі і перетворення енергії в агро-промисловому комплексі» (ДР 0116U002726) та «Використання нетрадиційних джерел енергії в сільськогосподарському виробництві» (ДР 0111U002543) у якій здобувач брав участь в якості виконавця окремих розділів.

Мета і задачі дослідження. Метою дослідження є підвищення ефективності споживання та збереження електричної енергії в розподільчих мережах шляхом удосконалення прогнозу електроспоживання.

Для досягнення мети поставлені наступні задачі:

1. Аналіз існуючих методів прогнозування електричних навантажень в розподільчих мережах.
2. Удосконалення нечіткого регресійного аналізу для задач прогнозування електричних навантажень в розподільчих мережах.
3. Розробка виду нечітких регресійних моделей для довгострокового та короткострокового прогнозу електричних навантажень.
4. Синтез методу прогнозування електричних навантажень на основі нечітких регресійних моделей.
5. Реалізація програмного комплексу прогнозування електричних навантажень споживачів, інтегрованого в інформаційне середовище АСКОЕ.
6. Апробація розробленого методичного апарату для задач довгострокового та короткострокового прогнозу електричних навантажень в умовах наявності в електромережі споживачів з різними видами добових графіків електроспоживання.

Об'єкт дослідження – процес прогнозу електричних навантажень розподільчих мереж в умовах невизначеності вихідної інформації.

Предмет дослідження – фізичні процеси в розподільчих електричних мережах, що потребують вивчення при прогнозуванні навантажень.

Методи дослідження. Теоретичною базою виконаних досліджень є фундаментальні положення теорії електротехніки та математичного аналізу. При дослідженні графіків навантаження використовувались елементи математичної статистики і регресійного аналізу, а для прогнозування електричних навантажень – методи нечіткого регресійного аналізу. Для розробки алгоритмів та програмного

комплексу для прогнозування електроспоживання використано імітаційне моделювання та методи математичного програмування. Достовірність проведених досліджень забезпечена коректним використанням чисельних методів розрахунку та підтверджена експериментальними дослідженнями.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Удосконалено метод отримання прогнозних моделей електричних навантажень, який відрізняється шляхом побудови критерію ступеню сумісності нечіткої регресії на основі перетину нечітких чисел, який дає можливість розкрити невизначеність вихідних даних та підвищити якість прогнозу електричних навантажень.

2. Вперше запропоновано метод уніфікації виду прогнозних моделей, який відрізняється тим, що в добовому графіку електроспоживання виділено функціональні ділянки, з роздільним використанням для них нечіткого регресійного аналізу, завдяки чому можна отримати вид прогнозних моделей при будь-яких навантаженнях.

3. Вперше запропоновано метод підвищення адекватності моделей, отриманих на базі нечіткого регресійного аналізу, який відрізняється паритетним врахуванням ступеню сумісності та ступеню нечіткості опису, що дозволить зробити прогноз електричних навантажень більш якісним.

4. Вперше аналітично визначено метод визначення ефективності прогнозу електроспоживання в електричних мережах, який дозволяє виконувати порівняльний аналіз нечітких регресійних моделей прогнозу з моделями, отриманими іншими методами.

Практичне значення одержаних результатів для електроенергетичної галузі полягає в розробленій методикі прогнозування електроспоживання на базі нечіткого регресійного аналізу, що включає принципи побудови прогнозних моделей, алгоритмічне забезпечення, а також програмне забезпечення реалізоване у зручній для інтегрування в АСКОЕ формі.

Результати досліджень впроваджені та підтверджені відповідними актами:

– ПП «Молокозавод-ОЛКОМ» щодо аналізу електроспоживання та оперативного керування з метою зменшення втрат енергії в мережі внутрішньозаводського електропостачання;

– у навчальному процесі основні результати роботи включені у відповідні дисципліни – «Практична інженерна підготовка» та «Інженерна діяльність» за спеціальністю: 8.10010101 – Енергетика сільськогосподарського виробництва;

– Приазовським РЕМ ВАТ «Запоріжжяобленерго» використаний апаратно-програмний комплекс для процесу довгострокового та короткострокового прогнозування електричних навантажень та оперативного керування режимами розподільчих мереж.

Особистий внесок здобувача. Наукові положення, що увійшли до дисертаційної роботи, отримані здобувачем самостійно. Серед них: розроблено методику побудови виду прогнозних моделей; удосконалено метод нечіткого регресійного аналізу у частині розрахунку критерія ступеня сумісності, заснованого на перетині нечітких чисел; застосуванні алгебраїчного згортання двох критеріїв: ступеня сумісності і ступеня нечіткого опису для пошуку коефіцієнтів нечіткої регресії, аналітично встановленому зв'язку ступеня сумісності нечіткої регресії з оцінкою ефективності прогнозу за середньомодульним відхиленням; отримано ряд результатів з прогнозу електричних навантажень різними споживачами.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертації доповідались та були схвалені на: III міжнародній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Інформаційні керуючі системи та комп'ютерний моніторинг» (Донецьк 2013 р.); Міжнародних науково-технічних конференціях аспірантів та студентів «Автоматизація технологічних процесів. Пошук молодих» (Донецьк 2010 р., 2011 р.); Міжнародних науково-технічних конференціях «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК (Харків 2011 р., 2012 р., 2014 р., 2015 р.); VIII міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми и перспективы инновационного развития агроинженерии, энергоэффективности и it-технологий» (Белгород, 2014 р.); IV Міжнародній науково-практичній конференції "Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнологій та автоматики в АПК", присвячена пам'яті академіка Івана Івановича Мартиненка (Київ, 2016 р.); щорічних науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу Таврійського державного агротехнологічного університету (Мелітополь, 2010 р., 2012 р., 2013 р., 2015 р., 2016 р.); I Всеукраїнській науково-технічній конференції викладачів, аспірантів та студентів «Сучасні проблеми систем електропостачання промислових і побутових об'єктів» (Донецьк 2012 р.); II Всеукраїнській школі-семінарі молодих вчених та студентів «Сучасні комп'ютерні технології» (Тернопіль 2012 р.).

Публікації. Основні наукові положення за матеріалами дисертаційної роботи опубліковані у 15 друкованих працях, з них: 9 статей у наукових фахових виданнях України (5 – у виданнях, включених до міжнародних наукометричних баз, 1 – у виданні з індексом SCORUS), 6 – у матеріалах конференцій та семінарів.

Структура та обсяг дисертаційної роботи. Дисертація складається зі вступу, анотації, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації складає 190 стор., серед них: 18 рисунки по тексту, 20 таблиць по тексту, список використаних джерел містить 115 найменувань на 12 сторінках, додатки на 19 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність та доцільність теми дослідження, сформульовано мету і задачі, визначено об'єкт, предмет і методи дослідження, наукову новизну та практичну значущість роботи.

У першому розділі проведено аналіз існуючих методів прогнозування електричних навантажень. Показано, що для збільшення ефективності використання електричної енергії необхідно здійснювати довгострокове і короткострокове прогнозування електричного навантаження підприємств. Проаналізовані сучасні системи обліку і контролю споживання електричної енергії. Детально розглянуто впровадження автоматизованих систем контролю і обліку для багатофункціональної системи апаратного комерційного і технічного енергообліку.

Показано, що внаслідок відсутності достовірного вірогіднісно-статистичного опису вихідної інформації ускладнюється використання традиційних методів прогнозування. Так як значна частина вихідної інформації може мати суттєву невизначеність, встає задача використання для прогнозування електроспоживання нових методів, які мають у собі можливість вірогіднісно-статистичних методів аналізу навантаження, а також надають спроможність формалізувати нечітко подану інформацію за допомогою теорії нечітких множин. До таких методів відносять методи нечіткого регресійного аналізу.

За аналізом напрацювань в галузі нечіткого регресійного аналізу встановлено, що основна складність стосується узгодження двох суперечних критеріїв: максимальної сумісності даних і моделі та мінімальної нечіткості моделі.

Відзначено, що короткострокове та довгострокове прогнозування електричних навантажень потребується вдосконалення в частині адаптації існуючих методів нечіткого регресійного аналізу, що дозволяють враховувати різні типи даних до існуючих інформаційних систем комерційного обліку електроенергії.

У другому розділі наведено теоретичні основи побудови нечітких прогнозних моделей: проаналізовано нечіткі методи регресії з використанням існуючих критеріїв оптимальності; визначені особливості різних типів функцій приналежності нечітких множин в контексті прогнозних задач; обґрунтовано доцільність використання трикутного виду функцій приналежності.

На основі аналізу наукових публікацій визначено, що єдиного підходу до реалізації нечіткого регресійного аналізу не існує. Розроблені версії відрізняються критеріями оцінки ефективності опису вихідних даних.

Один з напрямків реалізації нечіткого регресійного аналізу обирає основним критерієм якості моделей степінь нечіткості. Коефіцієнти регресії представляють собою нечіткі числа, які можуть бути виражені як числа інтервалу зі значеннями належності. Тому нечіткий регресійний аналіз тільки з однією незалежною змінною X має наступну двокоефіцієнтну модель регресії

$$\tilde{Y} = \tilde{B}_0 + \tilde{B}_1 X, \quad (1)$$

де \tilde{B}_0 – нечіткий коефіцієнт перетину; \tilde{B}_1 – нечіткий коефіцієнт нахилу лінії регресії; X – незалежна змінна.

Нечіткі коефіцієнти $\tilde{B}_j (j=0,1)$ визначені таким чином, що оцінений нечіткий вихід Y має мінімальний нечіткий розкид. Кожна зі спостережуваних вибірок даних, які можуть мати нечіткий \tilde{Y}_i або точний Y_i вид, повинна попадати в межі оціненого \hat{Y} на рівні h . Очевидно, що мінімізація степені нечіткості тягне за собою зменшення степені збігу оцінки з даними. До того ж певну невизначеність несе рівень h , що задається самим дослідником. Певним спрощенням, яке також використовується в рамках даного напрямку є застосування інтервального регресійного аналізу, при якому не береться до уваги вид функції приналежності нечіткої оцінки, а регресійна модель будується у вигляді двох функцій, між якими потрапляють всі дані спостережень.

Другий напрямок – це намагання використати ідеї методу найменших квадратів для нечіткого регресійного аналізу. Використовується критерій мінімальної нечіткості, за яким робиться два послідовних кроки: регресійний аналіз з метою знайти значення центру нечітких коефіцієнтів регресії; знайти розкид нечітких коефіцієнтів регресії. Степінь сумісності виступає в якості обмеження.

В третьому напрямку використовується критерій максимальної сумісності між вихідними даними і моделлю. Очевидно, що при достатньо великій невизначеності вихідної інформації максимізація степені сумісності приводить до збільшення степені нечіткості, що також приводить до необхідності певних обмежень.

В результаті проведеного аналізу зроблено наступний висновок. Певну проблему представляє оцінка точності нечіткої регресійної моделі. Єдиного підходу в цьому питанні немає. Домінує статистичний підхід. Але внаслідок того, що в нечіткій регресії існують два параметри, які у сукупності відображають дві сторони точності: степінь сумісності і степінь нечіткості, – існує потреба удосконалити нечіткий регресійний аналіз з паритетним врахуванням обох показників якості. До того ж бажано встановити зв'язок показників якості нечіткої регресії з якимсь з традиційно вживаних показників точності прогнозу для взаємного порівняння прогнозних моделей.

У третьому розділі розроблено методіку прогнозування електричних навантажень в електромережі на основі удосконаленого нечіткого регресійного аналізу і її програмної реалізації.

Обґрунтовано критерій якості підбору коефіцієнтів регресії.
Запропоновано критерій максимальної сумісності розраховувати за перетином

нечітких чисел. Це лягло в основу для розроблення критерію якості підбору коефіцієнтів регресії.

Параметр y , заданий у вигляді трикутного нечіткого числа, визначається кортежем з трьох чисел

$$y = \langle y_{\min}, y_{cp}, y_{\max} \rangle_x. \quad (2)$$

Степінь сумісності трикутних нечітких чисел можна оцінити по перетину їх функцій приналежності

$$S = y_l \cap y, \quad (3)$$

де y_l – оцінка.

Перетин нечітких чисел має функцію приналежності що відрізняється від трикутної (на рис. 1 виділено жирним) і мати висоту $h \neq 1$. Чисельно перетин трикутних нечітких чисел відображує площа фігури під функцією приналежності перетину

$$S_{\cap} = S_{\Delta} \cap S_{\Delta l}. \quad (4)$$

При наявності n значень параметру y при різних значеннях x , степінь сумісності оцінок та вихідних даних буде відображати величина

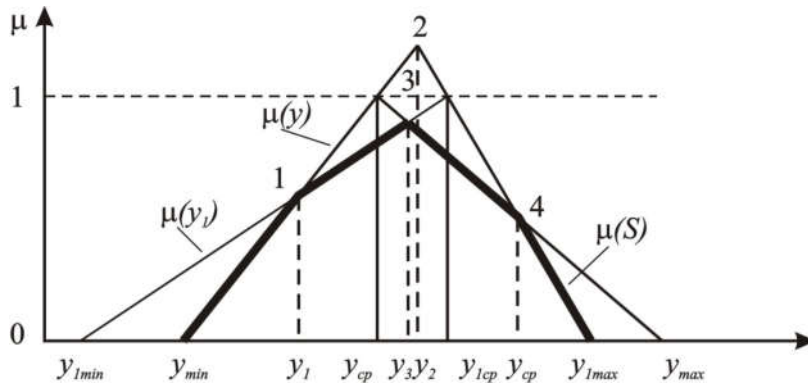


Рисунок 1 – Перетин трикутних нечітких чисел

$$S_{\cap} = \sum_{i=1}^n S_{\cap i}.$$

Однак величина S_{\cap} не може бути самостійним критерієм для підбору коефіцієнтів регресії, оскільки максимум S_{\cap} відповідає максимуму $S_{\Delta l}$, що приведе до збільшення степені нечіткості регресії.

Тому запропоновано критерій, що враховує як степінь сумісності оцінок до вихідних даних, так і степінь нечіткості:

$$S = \sum_{i=1}^n (S_{\Delta l i} - S_{\cap i}) + \sum_{i=1}^n (S_{\Delta i} - S_{\cap i}) \rightarrow \min. \quad (5)$$

Для задачі прогнозування електричних навантажень за даними АСКОЕ у вигляді часових рядів цей критерій спрощується і виглядає наступним чином

$$S = \sum_{i=1}^n (y_{lmaxi} - y_{lmini}) / y_i + \sum_{i=1}^n (1 - \mu_{y_i}), \quad (6)$$

де $\mu_{y_i}(y)$ – значення функції приналежності оцінки параметра y , який у даному випадку є синглтоном, а не трикутним нечітким числом (рис. 2).

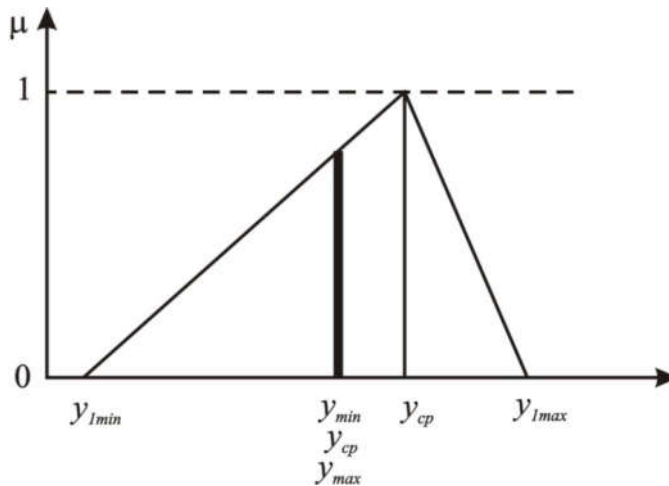


Рисунок 2 – Перетин трикутного нечіткого числа і синглтона

При розробці прогнозних регресійних моделей традиційно точність прогнозу оцінюється за відносною середньомодульною похибкою (*MAPE*).

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|y_{ci} - y_{lci}|}{y_{ci}}, \% \quad (7)$$

В роботі аналітично встановлено зв'язок степені сумісності, яка відображує точність нечіткого прогнозу, і *MAPE* наступним чином

$$\frac{y_i - y_{lci}}{y_{lci} - y_{lmin}} = \frac{1 - \mu_{y_i}}{1}. \quad (8)$$

При різному положенні y відносно y_{lc} :

$$|y_i - y_{lci}| = \begin{cases} (1 - \mu_{y_i}) y_{Li}, & \text{при } y_i < y_{lci}, \\ (1 - \mu_{y_i}) y_{Ri}, & \text{при } y_i > y_{lci}. \end{cases}$$

Тоді

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (1 - \mu_{y_i}) y_{Ti} / y_i, \quad (9)$$

де $y_{Ti} = y_{Li}$ при $y_i < y_{ci}$ та $y_{Ti} = y_{Ri}$ при $y_i > y_{ci}$.

Таким чином, залежність (9) встановлює аналітичний зв'язок нечітких

критеріїв оцінки ефективності регресії з загально уживаним критерієм.

Розроблено *алгоритм пошуку коефіцієнтів регресії*. На відміну від класичного в нечіткому регресійному аналізі визначити коефіцієнти регресії аналітично досить складно. Тому для пошуку коефіцієнтів регресійної прогнозної моделі використано методи нелінійного програмування. Перевага була віддана абсолютно збіжним методам пошуку глобального оптимуму. В роботі був використаний метод просторової сітки зі змінним кроком за наступним алгоритмом.

1. Визначення початкових коефіцієнтів регресії.
2. Завдання лівого і правого коефіцієнту нечіткості кожного коефіцієнта регресії.
3. Завдання точності визначення коефіцієнтів регресії.
4. Завдання кроку зміни модальних значень і коефіцієнтів нечіткості коефіцієнтів регресії.
5. Перебір всіх можливих сполучень модальних значень коефіцієнтів їх нечіткості. При цьому у якості робочого оптимуму запам'ятовується таке сполучення, при якому досягається мінімум цільової функції.

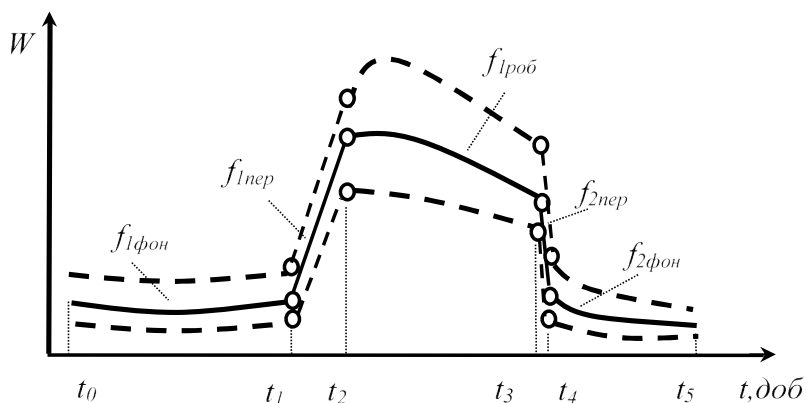


Рисунок 3 – Ілюстрація до побудови кусково-безперервної прогнозної функції на добу

6. Якщо крок зміни параметрів задовольняє прийнятій точності, то процес зупиняється. У іншому випадку простір пошуку звужується до розміру кроку сітки відносно знайденого робочого оптимуму. Крок зміни варіюємих параметрів зменшується з заданим модулем і процес продовжується з п.5.

7. В результаті ітераційного процесу визначається кожен коефіцієнт регресійної

моделі з заданою точністю. При цьому цільова функція (6) досягає свого мінімуму.

Була розроблена *методика формування нечіткої прогнозної регресійної моделі електричних навантажень для кожного крупного споживача мережі*. Було враховано наступне. Електроспоживання підприємств представляє собою циклічний процес. Причому характеристики кожного циклу залежать від ряду зовнішніх і внутрішніх факторів. До внутрішніх факторів відносяться кількість змін, наявність обідніх перерв, графік вихідних і тому подібне. До зовнішніх факторів відноситься ритмічність заказів, сезонність, кліматичні особливості і тому подібне.

Цикли розділяють за їх протяжністю на добові, тижневі, місячні та річні. В залежності від цілей прогнозування модель повинна описувати будь який з цих циклів. Ступінь врахування зовнішніх і внутрішніх факторів залежить від прогнозного циклу, на який розробляється модель.

При формуванні *виду прогнозової залежності* для добового циклу запропоновано наступний підхід.

Так як в графіках електроспоживання спостерігаються чітко виражені періоди, то прогнозу функцію запропоновано будувати не у вигляді безперервної функції для всього добового циклу, а у вигляді кусково-безперервної функції (рис.3). А саме цикл розділяється на ділянки: фонові, роботи технологічного обладнання (робочі), перехідні. Для перехідних процесів електроспоживання регресійний аналіз виконувати недоцільно. Достатньо вирішити задачу побудови функції за двома точками для усунення розривів другого роду в загальній прогнозній залежності. На рис. 3 суцільною лінією показані функції, які описують модальні значення нечітких оцінок, а пунктиром – межі нечіткості опису.

Слід зауважити, що якщо робота підприємств у вихідні і святкові дні відрізняється від буденних, то для таких днів робочі ділянки добового циклу вважаються перехідними.

$$\begin{aligned} f_{1,2 \text{ фон}}(t) &= \langle f_{1,2 \text{ фон}}^{\text{mod}}(t), f_{1,2 \text{ фон}}^-(t), f_{1,2 \text{ фон}}^+(t) \rangle, \\ f_{1 \text{ роб}}(t) &= \langle f_{1 \text{ роб}}^{\text{mod}}(t), f_{1 \text{ роб}}^-(t), f_{1 \text{ роб}}^+(t) \rangle, \\ f_{1,2 \text{ пер}}(t) &= \langle f_{1,2 \text{ пер}}^{\text{mod}}(t), f_{1,2 \text{ пер}}^-(t), f_{1,2 \text{ пер}}^+(t) \rangle, \end{aligned} \quad (10)$$

де для випадку лінійної залежності перехідних ділянок:

$$\begin{aligned} f_{1 \text{ пер}}^{\text{mod}}(t) &= \frac{f_{1 \text{ роб}}^{\text{mod}}(t_2) - f_{1 \text{ фон}}^{\text{mod}}(t_1)}{t_2 - t_1} \cdot t + f_{1 \text{ фон}}^{\text{mod}}(t_1) - \frac{f_{1 \text{ роб}}^{\text{mod}}(t_2) - f_{1 \text{ фон}}^{\text{mod}}(t_1)}{t_2 - t_1} \cdot t_1, \\ f_{1 \text{ пер}}^-(t) &= \frac{f_{1 \text{ роб}}^-(t_2) - f_{1 \text{ фон}}^-(t_1)}{t_2 - t_1} \cdot t + f_{1 \text{ фон}}^-(t_1) - \frac{f_{1 \text{ роб}}^-(t_2) - f_{1 \text{ фон}}^-(t_1)}{t_2 - t_1} \cdot t_1, \\ f_{1 \text{ пер}}^+(t) &= \frac{f_{1 \text{ роб}}^+(t_2) - f_{1 \text{ фон}}^+(t_1)}{t_2 - t_1} \cdot t + f_{1 \text{ фон}}^+(t_1) - \frac{f_{1 \text{ роб}}^+(t_2) - f_{1 \text{ фон}}^+(t_1)}{t_2 - t_1} \cdot t_1, \\ f_{2 \text{ пер}}^{\text{mod}}(t) &= \frac{f_{2 \text{ фон}}^{\text{mod}}(t_4) - f_{1 \text{ роб}}^{\text{mod}}(t_3)}{t_4 - t_3} \cdot t + f_{2 \text{ фон}}^{\text{mod}}(t_4) - \frac{f_{2 \text{ фон}}^{\text{mod}}(t_4) - f_{1 \text{ роб}}^{\text{mod}}(t_3)}{t_4 - t_3} \cdot t_4, \\ f_{2 \text{ пер}}^-(t) &= \frac{f_{2 \text{ фон}}^-(t_4) - f_{1 \text{ роб}}^-(t_3)}{t_4 - t_3} \cdot t + f_{2 \text{ фон}}^-(t_4) - \frac{f_{2 \text{ фон}}^-(t_4) - f_{1 \text{ роб}}^-(t_3)}{t_4 - t_3} \cdot t_4, \\ f_{2 \text{ пер}}^+(t) &= \frac{f_{2 \text{ фон}}^+(t_4) - f_{1 \text{ роб}}^+(t_3)}{t_4 - t_3} \cdot t + f_{2 \text{ фон}}^+(t_4) - \frac{f_{2 \text{ фон}}^+(t_4) - f_{1 \text{ роб}}^+(t_3)}{t_4 - t_3} \cdot t_4. \end{aligned}$$

В прогнозній моделі враховано тижневі та річні цикли наступним чином. Тижневі і особливо річні цикли в більшій степені пов'язані з сезонними зовнішніми коливаннями, які носять нелінійний характер. На основі попереднього аналізу визначено, що оптимальними в даному випадку являються поліноміальні моделі другої степені.

$$\begin{aligned}
 W_j(t) &= \langle W_j^{\text{mod}}(t), W_j^-(t), W_j^+(t) \rangle, \\
 W_j^z(t) &= [(a_{111j}^z n^2 + a_{112j}^z n + a_{113j}^z) d_n^2 + (a_{121j}^z n^2 + a_{122j}^z n + a_{123j}^z) d_n + \\
 &+ (a_{131j}^z n^2 + a_{132j}^z n + a_{133j}^z)] t + (a_{211j}^z n^2 + a_{212j}^z n + a_{213j}^z) d_n^2 + \\
 &+ (a_{221j}^z n^2 + a_{222j}^z n + a_{223j}^z) d_n + (a_{231j}^z n^2 + a_{232j}^z n + a_{233j}^z), \\
 z &= \{\text{mod}, -, +\},
 \end{aligned} \tag{11}$$

де d_n – номер дня тижня, n – номер тижня, j – номер ділянки добового циклу.

Таким чином, маючи у якості вихідних даних результати вимірів електроспоживання протягом попереднього року, в результаті розробленої регресійної моделі електроспоживання можна отримати довгостроковий прогноз електричних навантажень для кожної доби наступного року.

Також сформовано підхід до побудови *нечіткої регресійної моделі електричних навантажень споживача для короткострокового прогнозу*. Для побудови прогнозної моделі використовується довгострокова прогнозна модель (11), оскільки в цілому вона відображає всі особливості графіку добового навантаження. Модель (11) корегується шляхом підбору коефіцієнтів a_{233j}^z на основі обробки даних АСКОЕ за два попередні тижня. Наступним кроком здійснюється розрахунок графіку добового навантаження згідно (11) з урахуванням (10). Підбір коефіцієнтів a_{233j}^z здійснюється методом дихотомії.

Запропонована *програмна реалізація алгоритму короткострокового прогнозу*, яка виконана у середовищі Visual Basic for Excel. Мова програмування обумовлена зручністю інтегрування в автоматизовані системи обліку електроенергії оскільки серверна частина більшості АСКОЕ зберігає дані саме у табличному редакторі Excel.

Проведено *дослідження розробленої методики короткострокового прогнозу*. Показано, що при прогнозі на тиждень степінь нечіткості короткострокових моделей в середньому на 18,8% нижче ніж у довгострокових при незначній розбіжності у степені сумісності, що свідчить про підвищення якості прогнозу. При прогнозі навантажень на наступний день степінь нечіткості нижче на 20% практично при незмінній степені сумісності. Для дослідження брались дані АСКОЕ підприємства зі складним і неритмічним виробничим процесом, для якого довгострокова прогнозна модель має досить велику похибку понад 12%.

В четвертому розділі розроблені алгоритми і програми апробовано на прикладах прогнозування електричних навантажень декількох підприємств.

Розроблена *прогнозна модель для підприємства ТОВ «Мелітопольські теплові мережі»*. На основі аналізу вихідних даних у річному циклі визначено сезонний вплив і прив'язку роботи підприємства до опалювального періоду

За допомогою удосконаленого регресійного аналізу розроблено довгострокову прогнозну модель для річного циклу на основі даних АСКОЕ за 2013 рік (рис. 4).

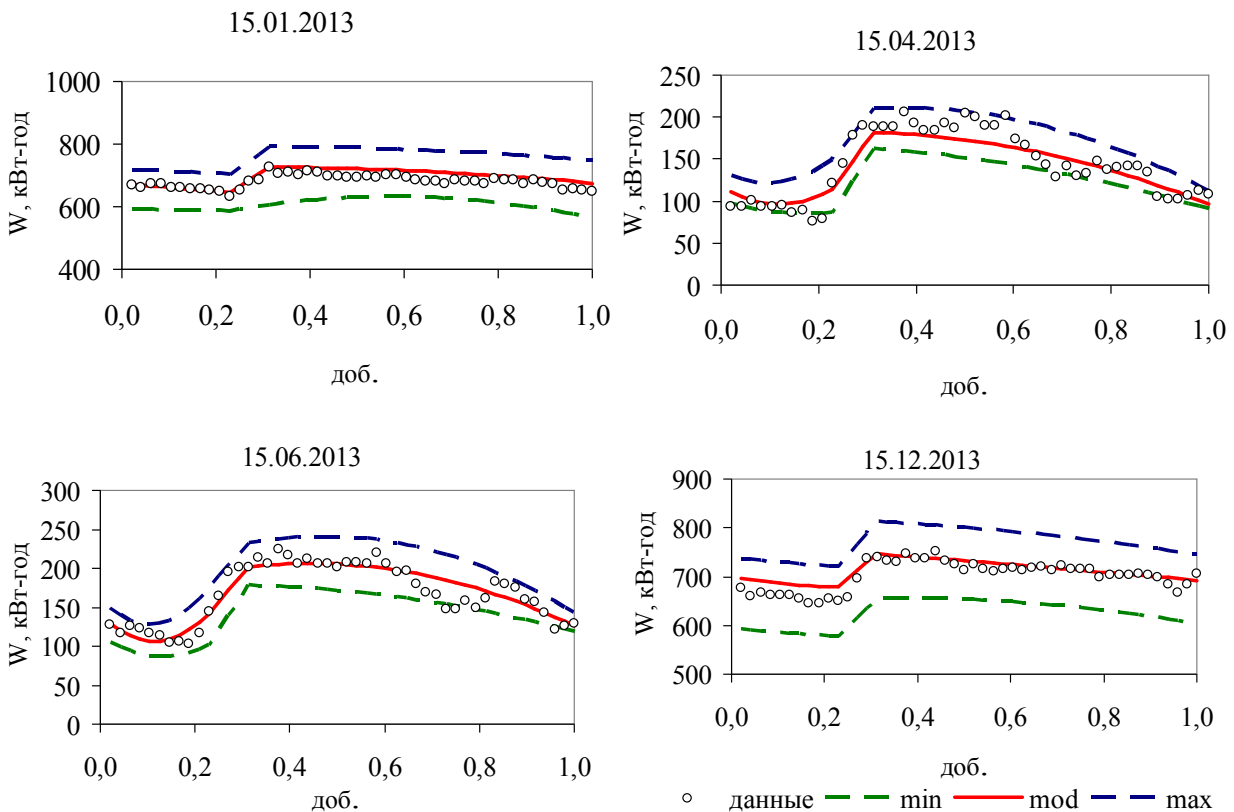


Рисунок 4 – Приклади застосування довгострокової прогнозної моделі

Ступінь сумісності оцінок і вихідних даних довгострокової прогнозної моделі склала $\mu_{\gamma} = 0,5263$, ступінь нечіткості 0,4449, $\text{МАРЕ} = 7,27\%$. У інтервал невизначеності попадає 91% оброблених даних.

Для перевірки прогнозних властивостей моделі були взяті дані АСКОЕ за 2012 і 2014 рік, що не брали участь у обробці регресійним аналізом. Оцінка точності показала: $\mu_{\gamma} = 0,4928$, $\text{МАРЕ} = 9,46\%$, ступінь нечіткості 0,3225 для 2012 року; $\mu_{\gamma} = 0,431$, $\text{МАРЕ} = 6,18\%$, ступінь нечіткості 0,2435 для 2014 року.

Виконано перевірку прогнозних можливостей моделі для короткострокового прогнозу. Для перевірки взяті дані за 2012, 2013 і 2014 роки. Розрахунок проводився для +1....+7 днів від будь-якої поточної дати. Коефіцієнти

регресії корегувались за даними електроспоживання за два тижні, попередніх до поточної дати. Результати розрахунків приведені в табл. 1. З них слідує, що короткостроковий прогноз принаймні в межах тижня достатньо стабільний і в середньому на 2-4 % точніше за довгостроковий прогноз.

Таблиця 1 – Якість короткострокового прогнозу електроспоживання

Прогноз на..., дні	2012							2013							2014						
	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7
Степінь нечіткості	0,311	0,2917	0,3014	0,2892	0,3022	0,2976	0,3235	0,2792	0,2862	0,2856	0,2954	0,3192	0,2931	0,3023	0,2196	0,2206	0,2391	0,2499	0,2416	0,2117	0,1962
Степінь сумісності	0,431	0,462	0,449	0,466	0,441	0,463	0,430	0,483	0,448	0,448	0,452	0,463	0,443	0,444	0,339	0,410	0,404	0,463	0,493	0,475	0,472
МАРЕ, %	5,893	5,721	6,108	5,624	6,020	6,005	6,230	3,396	4,100	4,045	4,630	4,937	4,758	4,725	3,184	3,745	3,719	2,562	2,873	4,045	5,331

Аналогічні дослідження були проведені на автозаправній станції «Гефест», ПП «Молокозавод–ОЛКОМ», ВАТ «Мелком» та ВАТ «МЗТГ» і показали задовільні результати.

ВИСНОВКИ

В дисертації вирішена науково-технічна задача створення науково-методичного апарату прогнозу електричних навантажень споживачів в умовах невизначеності, що враховує можливості інформаційного забезпечення автоматизованих систем комерційного обліку електроенергії та особливості окремих споживачів, яка дає можливості підвищити ефективність використання та збереження електричної енергії.

До основних результатів роботи відносяться:

1. Проведено аналіз задач і методів прогнозування споживання електричної енергії в розподільчих мережах, показано необхідність вдосконалення існуючих методів, що працюють в умовах невизначеності вихідної інформації.

2. Удосконалено нечіткий регресійний аналіз для задач прогнозування електроспоживання в умовах нечітко поданої інформації в розподільчих мережах, а саме:

– запропонована трикутна залежність до нечітких коефіцієнтів регресії для обробки неповної та неоднорідної інформації;

– запропоновано алгебраїчну згортку критерію степені сумісності і степені нечіткості опису, що дало змогу паритетно врахувати обидва ці критерії при

визначені коефіцієнтів регресії і підвищило якість отриманих прогнозних залежностей;

– аналітично встановлено зв'язок розробленого виду степені сумісності нечіткої регресії з традиційно вживаною оцінкою ефективності прогнозу за середньомодульному відносному відхиленню, що дозволило проводити порівняльний аналіз нечітких і чітких прогнозних моделей;

– запропоновано алгоритм пошуку коефіцієнтів нечіткої регресії на основі методу просторової сітки зі змінним кроком.

3. Розроблено метод формування прогнозної моделі електроспоживання у вигляді кусково-безперервної функції на основі аналізу форми добового графіку навантаження, що дозволило формувати вид графіку добового електроспоживання будь-якої складності.

4. Розроблено методику прогнозування електроспоживання на основі довгострокових та короткострокових нечітких прогнозних моделей і алгоритмів їх застосування.

5. Розроблено програмну реалізацію методики довгострокового та короткострокового прогнозу електроспоживання у середовищі Visual Basic for Excel, що дало можливість інтегрувати її в інформаційне середовище АСКОЕ.

6. Розроблений методичний апарат довгострокового та короткострокового прогнозу електричних навантажень в електромережі досліджено в умовах наявності споживачів з різними видами добових графіків електроспоживання і доведено, що:

– при використанні запропонованого методу адаптації довгострокових моделей для короткострокового прогнозування можна підвищити точність прогнозу на 1%–6% в залежності від складності графіку електроспоживання підприємства;

– зручність практичного застосування розробленого у дисертаційній роботі методичного апарату.

7. Матеріали дисертаційної роботи впроваджено на ПП «Молокозавод-ОЛКОМ», у Приазовському РЕМ ВАТ «Запоріжжяобленерго» та у навчальному процесі кафедри «Електротехніка і електромеханіка» Таврійського державного агротехнологічного університету.

ОСНОВНІ ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Катюха І. А. Практична реалізація нечіткої нейронної мережі при прогнозуванні втрат потужності в розподільчих мережах / О. О. Мірошник, І. А. Катюха // Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України: вісник ХНТУСГ, 2011. – Вип. 117. – С. 50–51.

Здобувачем запропоновано практичний підхід до прогнозування втрат потужності, який ґрунтується на використанні штучної нейронної мережі.

2. Катюха І. А. Прогнозування електроспоживання на основі нечіткого регресійного аналізу / С. О. Тимчук, І. А. Катюха // Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України: вісник ХНТУСГ, 2012. – Вип. 130. – С. 51–53.

Здобувачем запропоновано методика довгострокового прогнозу електроспоживання на основі застосування нечіткого регресійного аналізу з комбінованим критерієм.

3. Катюха І. А. Програмні засоби моделювання штучних нейронних мереж прогнозування втрат потужності та енергії в розподільних мережах 10/0,4 кВ / В. В. Овчаров, І. А. Катюха // Науковий вісник ТДАТУ. – 2012. – Вип. 2, т.1, С. 26–30.

Здобувачем зроблений аналіз існуючих програмних продуктів для реалізації прогнозу електроспоживання в сільських електричних мережах з використанням різних типів нейронних мереж.

4. Катюха І. А. Використання нечіткого регресійного аналізу для прогнозування електроспоживання на підприємстві / В. В. Овчаров, І. А. Катюха, С. О. Тимчук // Праці ТДАТУ. – 2013. – Вип.13. – С. 29–36.

Здобувачем запропоновано алгоритм пошуку коефіцієнтів регресії на основі методу просторової сітки зі змінним кроком.

5. Катюха І. А. Довгостроковий прогноз електроспоживання з використанням нечіткого регресійного аналізу на підприємстві / В. В. Овчаров, С. О. Тимчук, І. А. Катюха // Наукові праці ДонНТУ. Серія: Обчислювальна техніка і автоматизація. – Донецьк, 2013. – №1(24). – С. 139–145.

Здобувачем запропоновано методика побудови виду довгострокових нечітких прогнозних моделей.

6. Катюха І. А. Методика формування нечеткой прогнозной регрессионной модели электропотребления / С. А. Тимчук, И. А. Катюха // Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України: вісник ХНТУСГ, 2014.– Вип. 154.– С. 51–53.

Здобувачем запропоновано підхід до визначення кусково–безперервної нечіткої моделі електроспоживання, що максимально повно враховує особливості довгострокових та короткострокових виробничих циклів.

7. Катюха І. А. Разработка критерия качества подбора коэффициентов регрессии в задачах прогнозирования электропотребления / С.А. Тимчук, И. А. Катюха // Східно–європейський журнал передових технологій. – 2014.– №. 5/8(71).– С. 16–20.

Здобувачем математично встановлено однозначний взаємозв'язок запропонованого критерія оптимальності з загальноприйнятою оцінкою якості прогнозу на основі відносної середньомодульної похибки.

8. Катюха И. А. Исследование разработанной методики нечеткого регрессионного анализа / И. А. Катюха // Проблемы энергозабезпечення та енергозбереження в АПК України: вісник ХНТУСГ, 2015.– Вип. 165.– С. 86–88.

9. Катюха И. А. Использование нечеткой прогнозной модели электропотребления для ЧП «Молокозавод – ОЛКОМ» / И. А. Катюха // Праці ТДАТУ. – 2015. – Вип.15. – Т.2.– С. 206–211.

10. Катюха І. А. Аналіз засобів вирівнювання графіків навантаження ОЕС для становлення енергоощадної економіки країни / І.А. Катюха, А. О. Манич, В. Я. Жарков // Автоматизація технологічних об'єктів та процесів: Матеріали науково–технічної конференції аспірантів і студентів. –Донецьк: ДонНТУ, 2010. –С. 51–52.

Здобувачем проаналізовано світовий досвід щодо механізмів вирівнювання графіків навантаження для промислових та побутових користувачів активної електричної енергії.

11. Катюха І. А. Вирівнювання графіків навантаження ОЕС – важливий крок до становлення енергоощадної економіки країни / І. А. Катюха, А. О. Манич, В. Я. Жарков // Матеріали науково–технічної конференції аспірантів і студентів енергетичного ф–ту.– Мелітополь: ТДАТУ, 2010. – Вип 9.– т.2.– С.25–26.

Здобувачем обґрунтована необхідність прогнозування споживання електричної енергії на невеликих підприємствах задля вибору оптимального тарифного плану на електроспоживання у майбутньому.

12. Катюха І. А. Прогнозування втрат енергії з використанням інтелектуальних систем / І.А. Катюха, В.Я. Жарков // Матеріали науково–технічної конференції аспірантів і студентів «Автоматизація технологічних об'єктів та процесів».: – Донецьк: ДонНТУ, 2011. – С. 173–175.

Здобувачем зроблений аналіз існуючих перспективних моделей та методів прогнозування втрат електричної енергії, які ґрунтуються на базі штучних нейронних мереж та генетичних алгоритмах.

13. Катюха І. А. Застосування нечіткої нейронної мережі при прогнозуванні втрат потужності та енергії в розподільчих мережах 35/10 кВ / І. А. Катюха // Матеріали всеукраїнської школи-семінару молодих вчених і студентів «Сучасні комп'ютерні інформаційні технології». – Тернопіль: ТНЕ, 2012. – С.177–178.

14. Катюха И. А. Краткосрочное прогнозирование электропотребления на основе нечеткого регрессионного анализа / И.А. Катюха // Материалы восемнадцатой международной научно – производственной конференции «Проблемы и перспективы инновационного развития агроинженерии, энергоэффективности и IT–технологий». – Белгород, 26 – 27 мая 2014 г. – С.155.

15. Катюха И. А. Моделирование процессов электропотребления при моделировании методом нечеткого регрессионного анализа / И.А. Катюха // Проблемы та перспективи розвитку енергетики, електротехнологій та автоматики в АПК: матеріали IV Міжнародної науково–практичної конференції, присвяченій пам'яті академіка Івана Івановича Мартиненка. – Київ: НУБіП, 2016. – С.30–31.

АНОТАЦІЇ

Катюха І.А. Прогнозування електричних навантажень розподільчих мереж в умовах невизначеності вихідної інформації. На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.02 – електричні станції, системи та мережі. – Таврійський державний агротехнологічний університет, Мелітополь, 2017.

Дисертаційна робота присвячена розв'язанню актуальної науково-прикладної задачі розроблення сучасного науково-методичного апарату прогнозу споживання електричної енергії в умовах невизначеності, що враховує можливості інформаційного забезпечення автоматизованих систем комерційного обліку електроенергії та особливості окремих споживачів і має на меті підвищення ефективності використання та збереження електричної енергії.

Вдосконалено метод нечіткого регресійного аналізу для побудови довгострокових прогнозних моделей електричних навантажень в розподільчих мережах. Враховано паритетну участь двох критеріїв ефективності нечітких моделей: степені суміщення та степені нечіткості при побудові прогнозних моделей. Розроблено метод корекції довгострокових прогнозних моделей для короткострокового прогнозу. Запропоновано підхід до побудови виду прогнозних моделей при будь-яких типах навантажень. Аналітично встановлено зв'язок нечітких показників точності прогнозу з відносною середньомодульною похибкою. Розроблену методику апробовано при розробці прогнозних моделей електричного навантаження ряду споживачів з різними типами графіків навантаження.

Основні результати дисертації знайшли практичне застосування у вигляді програмно-апаратного комплексу для автоматизації процесу довгострокового та оперативного прогнозування електричних навантажень електроспоживачів, що може інтегруватись інформаційно в автоматизовану систему обліку електроенергії, а також при оперативному керуванні режимами розподільчих мереж.

Ключові слова: розподільчі електричні мережі, електроенергозбереження, електроенерговикористання, графік навантаження, прогнозна модель, невизначеність, нечіткий регресійний аналіз.

Катюха И.А. Прогнозирование электрических нагрузок распределительных сетей в условиях неопределенности исходной информации. На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.02 – электрические станции, системы и сети. – Таврический государственный агротехнологический университет, Мелитополь, 2017.

Диссертация посвящена решению актуальной научно–прикладной задачи разработки современного научно–методического аппарата прогноза потребления электрической энергии в условиях неопределенности исходной информации, учитывающий возможности информационного обеспечения автоматизированных

систем коммерческого учета электроэнергии и особенности отдельных потребителей и имеет целью повышение эффективности использования и сохранения электрической энергии.

В работе усовершенствован метод нечеткого регрессионного анализа для построения долгосрочных прогнозных моделей электрических нагрузок в распределительных сетях. При поиске коэффициентов регрессии учтено паритетное участие двух критериев эффективности нечетких моделей: степени совмещения и степени нечеткости при построении прогнозных моделей. Критерий степени совмещения предложено определять на основе пересечения нечетких чисел. В качестве метода поиска коэффициентов регрессии выбран метод сеток с переменным шагом. Аналитически установлена связь нечетких показателей точности прогноза с относительной среднемодульной погрешностью.

Разработан метод адаптации долгосрочных прогнозных моделей для краткосрочного прогноза, основанный на коррекции постоянных членов регрессионной зависимости по результатам данных АСКУЭ за предшествующий прогнозный date двухнедельный период.

Предложен подход к построению вида прогнозных моделей при любых типах нагрузок. Суточный график электропотребления представляется в виде функциональных участков: фоновых, рабочих и переходных. Данные на фоновых и рабочих участках используются при построении регрессионных прогнозных моделей. Зависимости на переходных участках строятся аналитически. В результате прогнозная модель имеет кусочно–непрерывный вид.

Разработанная методика апробирована при разработке прогнозных моделей электрической нагрузки ряда потребителей с различными типами графиков нагрузки. Результаты показали удобство практического применения разработанного методического аппарата, а также, что при применении предложенного метода адаптации долгосрочных моделей для краткосрочного прогноза можно повысить точность прогноза на 1%–6% в зависимости от сложности графика электропотребления предприятия.

Основные результаты диссертации внедрены на ряде промышленных предприятий и в учебном процессе Таврического государственного агротехнологического университета. Основная практическая ценность полученных результатов заключается в разработанном программно–аппаратном комплексе для автоматизации процесса долгосрочного и оперативного прогнозирования электрических нагрузок электропотребителей, который может интегрироваться информационно в автоматизированную систему учета электроэнергии, а также использоваться при оперативном управлении режимами распределительных сетей.

Ключевые слова: распределительные электрические сети, электроэнергосбережение, электроэнергопотребление, график нагрузки, прогнозная модель, неопределенность, нечеткий регрессионный анализ.

Katyukha IA Prediction of electrical load distribution networks under uncertainty of the initial information. Manuscript.

Dissertation for scientific degree of candidate of technical sciences, specialty 05.14.02 – electric power stations, networks and systems. – Tavricheskiy State Agrotechnology University, Melitopol, 2017.

The dissertation devoted to solving actual scientific and technical problem of development of modern science and analytical tools forecast electricity consumption in the face of uncertainty, taking into account the possibility of information support automated systems of commercial accounting of electric power and features of individual consumers and aims to increase efficiency and save electricity.

Improved method of fuzzy regression analysis to build long-term forecasting models of electric loads in distribution networks. Included balanced participation of two performance criteria fuzzy models: the degree of combination and degree of fuzziness when building predictive models. The method of correction term predictive models for short-term forecast. An approach to building the type of predictive models in any type of stress. Analytical contacted fuzzy indicators forecast accuracy Mean absolute percentage error. The technique was tested in the development of predictive models of electric load number of consumers with different types of load charts.

The main results of the dissertation found practical application in the form of hardware and software to automate the process of long-term and operational forecasting electricity consumers of electrical loads that can integrate information into an automated accounting system of electricity, as well as operational management mode of distribution networks.

Keywords: electrical distribution networks, electrical energy saving, electrical energy usage, load graph, predictive model, uncertainty, fuzzy regression analysis.



Підписано до друку «30» серпня 2017 р. Замовл. № 523. Формат 60×84/16.
Друк офсетний. Обсяг 0,9 умовн. друк. арк. Тираж 100 примірників.

Надрукована в типографії
Таврійського державного агротехнологічного університету.
Адреса: 72310, Запорізька область, м. Мелітополь,
пр-т Б. Хмельницького, 18