

В.А. Попов, д-р техн. наук, проф.
П.О. Замковий, аспірант
Д.С. Поплавець, студент
Л.В. Охота, студент

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ПРОГНОЗУВАННЯ ЦІН НА ЕЛЕКТРИЧНУ ЕНЕРГІЮ З ВИКОРИСТАННЯМ НЕЧІТКИХ ЧАСОВИХ РЯДІВ

Короткострокове прогнозування вартості електричної енергії на оптовому ринку є необхідною умовою для ефективної участі в торгах оператора Microgrid та відповідних підрозділів промислових підприємств. Короткострокове прогнозування ціни має важливе значення для визначення оптимального розподілу потужностей між розосередженими джерелами генерації та їх узгодженої роботи з засобами акумулювання енергії, керованим навантаженням та енергосистемою. В роботі подано стислий опис і наведені основні математичні залежності теорії нечіткого моделювання часових рядів і методики їх прогнозування. Такий підхід передбачає можливість використання як нечіткої (в тому числі лінгвістичної), так і детермінованої (завдяки фазифікації) вихідної інформації. Експериментальні розрахунки показали перспективність застосування нечіткого підходу для вирішення проблеми прогнозування часових рядів (на прикладі вартості електричної енергії), у тому числі у разі відсутності деяких статистичних даних або можливої наявності в них похибки.

Ключові слова: нечіткі часові ряди, Microgrid, короткострокове прогнозування ціни, розосереджена генерація.

В сучасному світі новітні технології, економічні та екологічні стимули змінюють підходи до самих принципів виробництва, передачі та розподілу електроенергії. Великі централізовані електростанції поступаються місцем менш потужним, орієнтованим на активне використання відновлювальної енергії але в більшій мірі розосереджених у межах певної території. Це явище отримало назву розосередженої генерації (РГ).

Поширення РГ в Україні ще не досягло значних рівнів, однак ця ситуація швидко змінюється, і це вимагає приділення збільшеної уваги питанням, що виникають у зв'язку зі збільшенням частки в системі розподілу електроенергії. У той же час, хаотичне застосування РГ може створити достатню кількість проблем технічного характеру [3]. Як свідчить досвід економічно розвинених країн, найкращим шляхом для реалізації потенціалу РГ є використання нового системного підходу, який розглядає генерацію, акумулювання енергії і пов'язане з ними навантаження в якості мікроенергосистеми або «MicroGrid» [6]. Така система дозволяє реалізувати локальний підхід до управління РГ, таким чином, зменшуючи або усуваючи необхідність в централізованому управлінні. Під час порушення стабільності електропостачання з боку централізованої енергосистеми, РГ і відповідні навантаження можуть відділитися від системи, щоб ізолювати споживачів в межах Microgrid від зовнішнього негативного впливу без шкоди для цілісності системи передачі електроенергії. Можливості секціонування комплексу генерації і навантажень мають потенціал, щоб забезпечити більш високу локальну надійність ніж при забезпеченні електропостачання лише централізованою енергосистемою. Компактний розмір певних джерел РГ дозволяє розмішувати їх оптимальним чином відносно найбільших електричних та теплових навантажень, а використання технологій когенерації та тригенерації дозволяє значно збільшити загальний ККД системи. Такий підхід також дозволяє реалізувати підключення нових джерел генерації за принципом plug-and-play, що значно спрощує процедуру приєднання до мережі та прискорить поширення РГ.

Слід зауважити, що більша частина переваг, особливо економічних, можлива лише при ретельному та обґрунтованому управлінні режимами роботи Microgrid в тісному взаємозв'язку та узгодженою роботою з існуючою централізованою енергосистемою. При цьому ефективна економічна взаємодія з енергетичним ринком має вирішальне значення для максимізації потенційної вигоди від впровадження Microgrid і в кінцевому рахунку створює умови для скорішого впровадження РГ, в першу чергу, в умовах використання відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). В такій структурі Microgrid повинен існувати певний «агрегатор», що укладає договори з кожним власником джерела РГ, формує мережі розподілу електричної а в загальному випадку і теплової енергії, та забезпечує їх злагоджену роботу.

Таким чином, Microgrid отримує можливість участі на ринку електроенергії, де виступає як споживач чи джерело енергії. Перед оператором MicroGrid стоїть завдання визначити оптимальний розподіл потужностей між всіма джерелами РГ в залежності від рівноважної ціни на ринку, економічних та екологічних показників кожного із генераторів, потреб споживачів. В подальшому необхідно розробити механізм, що дозволить оператору, з однієї сторони оптимально використовувати ВДЕ, керувати джерелами РГ та контрольованим навантаженням в межах MicroGrid як окремому невеликому умовному енергетичному ринку; з іншої сторони – взаємодіяти з об'єднаною енергосистемою як її частина. В разі необхідності він може обмежити роботу певних власних джерел та віддати перевагу більш дешевій електроенергії з централізованої енергосистеми. І навпаки, при наявності надлишку енергії з боку внутрішніх джерел, зокрема ВДЕ, оператор має змогу продати цю електроенергію на енергоринку.

Одна з проблем, з якими стикається оператор MicroGrid в цій частині своєї діяльності є невизначеність ціни на оптовому ринку електроенергії, перш за все при плануванні роботи доба наперед. Вирішення цього питання необхідно для формування заявки для участі в торгах. З адекватним прогнозом рівноважної ціни ринку на наступну годину чи наступну добу, оператор зможе обрати кращі фінансові рішення. Тобто він, як виробник електроенергії, зможе розробити відповідні стратегії для максимізації свого прибутку, а як споживач – мінімізувати вартість споживання [4]. Досягти цього можна завдяки використанню сучасних методів прогнозування. Але при цьому слід зауважити наступне

Існує кілька категорій методів для прогнозування цін на електроенергію, що застосовуються з різним ступенем успіху, в тому числі так звані фундаментальні моделі, математичні фінансові моделі, моделі на основі теорії ігор, регресійні моделі, а також безліч комбінацій цих методів – так звані гібридні методи [5]. Однак, при виборі відповідного методу короткострокового прогнозування ціни на електричну енергію з метою його використання агрегатором MicroGrid необхідно врахувати той факт, що у даному випадку неможливо використовувати методи, які застосовуються енергоринком чи системним оператором. Зокрема на рівні енергоринку існує можливість отримання широкого спектру різноманітної інформації а саме: які енергоблоки відключені чи будуть відключені, які станції не працюють, де маються обмеження з передачею електроенергії, поточні кліматичні умови в місцях безпосереднього розміщення станцій на основі ВДЕ, заявки обленерго на споживання електроенергії та таке інше. Всі ці фактори безпосередньо впливають на встановлення рівноважної ціни на енергоринку. У цей же час агрегатор MicroGrid не володіє цією інформацією. Тому для вирішення задачі прогнозування ціни у цьому випадку не можливо орієнтуватися на складні багатофакторні моделі прогнозування. На рівні MicroGrid присутні тільки ретроспективні дані відносно коливань цін на енергоринку за певний період часу. Більш того, у багатьох випадках зазначені дані можуть мати певну похибку чи бути частково відсутні. У зв'язку з цим у роботі досліджується можливість використання для короткострокового (доба наперед) прогнозування ціни на електричну енергію математичного апарату **нечітких часових рядів**. Такий підхід передбачає можливість використання при вирішенні задачі як нечіткої (в тому числі лінгвістичної), так і детермінованої (завдяки фазифікації) вихідної інформації.

Нечітким часовим рядом називають впорядковану в рівновіддалені моменти часу послідовність спостережень над деякими процесом, стан якого змінюються в часі, якщо значення стану процесу в момент t_i може бути виражено за допомогою нечіткої мітки x_i . При цьому під нечіткої міткою розуміється нечітку множину або деяку лінгвістичну змінну, що характеризує стан об'єкта дослідження. Таким чином нечіткі часові ряди розширюють перспективи використання вихідної інформації, в якості якої з'являється можливість задіяти як кількісні, так і якісні дані.

Зміни в нечіткому часовому ряду можна розглядати як результат значимого або незначимого впливу невідомих чинників. Вплив незначимих факторів визначає зміни, допустимі в рамках похибок, специфічних для кожної предметної області. Вплив значимих факторів призводить до якісної зміни поведінки часового ряду. Такі якісні зміни отримали назву нечітких тенденцій [1].

Таким чином, нечіткою тенденцією називають нечітку мітку, яка виражає характер зміни (математичний рух) послідовності значень нечіткого часового ряду на заданому інтервалі часу.

Аналіз часових рядів є досить самостійною і обширною областю прикладної математики. Метою аналізу часових рядів є досягнення розуміння причинних механізмів, що зумовили ту чи іншу поведінку досліджуваного процесу в умовах невизначеності, побудова моделей часових рядів, які не тільки пояснюють поведінку процесу, а й можуть бути використані для прогнозу розвитку досліджуваного процесу.

Слід врахувати, що числова і лінгвістична (нечітка) інтерпретації значень є різними, але однаково істотними аспектами абстракції. В цьому випадку математичне моделювання поведінки часового ряду на різних рівнях абстракції дає можливість отримати безліч моделей, які доповнюють одна одну.

Згідно з методологією аналізу часових рядів, відповідна модель може бути представлена у наступному вигляді:

$$x_i = \lambda f(t) + \psi \varepsilon_i + \xi_i \quad (1)$$

У моделі (1) ряд x_t , за яким ведеться спостереження, представляється як сума деякої систематичної компоненти $f(t)$, яка може розглядатися як тенденція, і нерегулярної компоненти ε_t , λ , ψ - дискретні коефіцієнти, значення яких знаходяться в інтервалі $[0, 1]$, ξ_t - випадкова помилка.

При моделюванні числових часових рядів в рамках нечіткого підходу, числові значення заздалегідь перетворюють в нечіткі (фазифікують)

$$\begin{aligned} x_t &= \text{Fuzzy}(x_t), & \tau_t &= \text{Tend}(x_t), \\ \tilde{t}_t &= \text{Fuzzy } t(t_t), & \tau_t &= \text{Tend } t(x_t) \end{aligned}$$

А результат моделювання – дефазифікують

$$x_t = \text{deFuzzy}(x_t)$$

Для побудови моделі часових рядів можуть використовуватися нечіткі логічні правила вигляду «якщо - то», побудовані на підставі спостережень $X = (x_t), t = 1, 2, \dots, n$ і які використовуються для «обчислення» наближених значень $X = (x_t), i = 1, 2, \dots, n$. [1].

Вперше модель нечітких часових рядів для вирішення задачі прогнозування була запропонована в роботі [7]. Основна ідея даного підходу полягала в наступному:

Нехай $Y(t), t = 1, \dots$ є підмножиною деякого універсуму R , на якому визначено нечіткі множини $f_i(t), (i = 1, \dots)$ і при цьому $F(t)$ є множиною $f_1(t), f_2(t), \dots$. В цьому випадку $F(t)$ називається нечітким часовим рядом визначеним на $Y(t), (t = 1, \dots)$. Принципова відмінність між традиційними і нечіткими часовими рядами полягає в тому, що в першому випадку прогнозовані величини є реальними числами, а в другому випадку - нечіткими множинами.

Припустимо $F(t)$ є наслідком $F(t-1)$, тобто $F(t-1) \rightarrow F(t)$. Тоді відношення $R(t, t-1)$ з $F(t) = F(t-1) \circ R(t, t-1)$ розглядається в якості нечіткого відношення між $F(t)$ і $F(t-1)$ і являє собою лінійну модель $F(t)$ першого порядку. При цьому символ \circ позначає операцію композиції нечітких множин (max.min-оператор), а $R(t, t-1)$ являє собою об'єднання всіх нечітких відношень між будь-якими величинами $f_i(t-1)$ множини $F(t-1)$ і $f_j(t-1)$ з множини $F(t)$, тобто

$$R(t, t-1) = \bigcup_{i,j} R_{i,j}(t, t-1), \quad i = 1, \dots, I; \quad j = 1, \dots, J. \quad (2)$$

У задачі прогнозування роль $R(t, t-1)$ по суті полягає в екстраполяції величини $F(t-1)$ в $F(t)$. Використовуючи отримане нечітке відношення $R(t, t-1)$ прогнозовані величини можуть бути обчислені наступним чином:

$$A_{t+1} = A_t \circ R(t, t-1), \quad (3)$$

де A_t – останнє відоме значення параметру, що прогнозується в нечіткій формі;

A_{t+1} – результат прогнозу в нечіткій формі.

Отриманий результат вже безпосередньо використовується для визначення прогнозних значень на підставі (3). Після цього здійснюється інтерпретація отриманих результатів. Зазвичай для практичного застосування результати розрахунків (отримані у вигляді нечітких множин) вимагають дефазифікації [2].

З метою тестування запропонованого підходу були проведені розрахунки по прогнозуванню вартості електроенергії на основі даних Nord Pool. Зокрема, після процедури фазифікації вихідних даних (таб. 1), використовуючи сформоване нечітке відношення (таб. 2), на підставі виразу (3) були отримані наступні прогнозні значення вартості електроенергії:

- при прогнозі за даними 11 години ранку на 12 годину значення вартості після дефазифікації склало 31,17 EUR/МВт·год (фактичне значення 31,25), тобто при цьому відносна похибка складає 0,25%;
- при прогнозі за даними 12 години на 13 годину – 30,86 EUR/МВт·год (30,74); похибка – 0,38 %;
- при прогнозі за даними 13 години на 14 годину – 29,83 EUR/МВт·год (30,76); похибка – 3,02 % і т.д.

Таблиця 1 – Процедура фазифікації детермінованих значень вартості електричної енергії.

№	Вихідні дані			A	A	A	A	A	A	A	A	A	A1	A1	A1	A1	A1	A1
	Дата	Час	Вартість Ел.ен EUR/МВт год	Надзвичайно низька	Дуже низька	Доволі низька	Низька	Значно нижче	Нижче середньої	Трохи нижче	Середня	Трохи вище середньої	Вище середньої	Значно вище середньої	Висока	Доволі висока	Дуже висока	Надзвичайно висока
1	20.03.20	00:00 - 01	26,82	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	20.03.20	01:00 - 02	26,48	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	20.03.20	02:00 - 03	26,4	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	20.03.20	03:00 - 04	26,32	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	20.03.20	04:00 - 05	27,53	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	20.03.20	05:00 - 06	29,22	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	20.03.20	06:00 - 07	31,08	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0,1	0	0	0	0	0
8	20.03.20	07:00 - 08	34,12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,5	1	1	0	0	0
9	20.03.20	08:00 - 09	37,43	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0,5	0,5
1	20.03.20	09:00 - 10	35,54	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1	0,5	1	1	0,1	0
...

Таблиця 2 – Визначення нечіткого відношення $R(t,t-1)$

	0,5	0,5	0,5	0,5	0,1	0,1	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,5	1	1	0,5	0,5	0,5	0,1	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,5	1	1	1	1	0,5	0,5	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,5	0,5	1	0,5	0,5	1	0,5	0,1	0,1	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,1	0,5	1	1	1	1	0,5	0,5	0,5	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,1	0,5	0,5	0,5	1	1	1	1	0,5	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0	0	0
	0,1	0,1	0,1	0,5	0,5	1	1	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,1	0	0	0	0
$R(t,t-1)=$	0	0	0,1	0,1	0,5	0,5	1	1	1	0,5	1	0,5	0,5	0,1	0	0	0	0
	0	0	0	0,1	0,1	0,5	0,5	1	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
	0	0	0	0	0,1	0,1	0,5	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
	0	0	0	0	0	0,1	0,1	0,5	0,5	0,5	0,5	1	0,5	1	0,5	1	0,5	0,5
	0	0	0	0	0	0	0,1	0,1	0,5	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
	0	0	0	0	0	0	0	0,1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,1	0,1	0,1
	0	0	0	0	0	0	0	0,1	0,1	0,1	0,5	1	0,5	1	0,5	0,1	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,1	0	0

Узагальнення отриманих результатів показало, що середня відносна похибка прогнозування не перевищила величини 2,54%, що може вважатися цілком прийнятним для даної задачі, враховуючи неможливість залучення в даному випадку додаткових вихідних даних для уточнення значень прогнозованого параметру.

Висновок. Запропоновано новий підхід до прогнозування вартості електричної енергії, який забезпечує прогнозування часових рядів, елементи яких можуть бути задані як в лінгвістичній, так і в детермінованій формі. Експериментальними дослідженнями підтверджено, що даний метод підходить для прогнозування цінових показників в умовах, коли вихідні дані мають високий рівень невизначеності або існує недостатність інформації. Подальше вдосконалення моделі дозволить створити актуальний інструмент прогнозування вартості електроенергії на наступну добу для практичної діяльності операторів MicroGrid та енергоменеджерів промислових підприємств.

Список використаної літератури

1. Афанасьєва, Т. Моделирование нечетких тенденций временных рядов / Т. В. Афанасьєва. – Ульяновск : УЛГТУ, 2013. – 215 с.
2. Афанасьєва, Т., Сапунков, А., Тонерян, М. Двухступенчатый алгоритм выбора нечеткой модели для прогнозирования временных рядов // Автоматизация процессов управления. – 2015. – № (4). – С. 75-80.
3. Веремійчук, Ю.А., Притискач, І.В., Ярмолюк, О.С., Опришко, В.П. Аналіз функціонування інтегрованих енергопостачальних систем з енергетичними хабами // ScienceRise. – 2016. – № 9.2 (26). – С. 12-18.

4. Weron, R. Electricity price forecasting: A review of the state-of-the-art with a look into the future // International journal of forecasting. – 2014. – № 30(4). – Pp. 1030-1081.
5. Murthy, G., Sedidi, V., Panda, A., Rath, B. Forecasting Electricity Prices in Deregulated Wholesale Spot Electricity Market – A Review // International Journal of Energy Economics and Policy. – 2014. – № 4(1). – p. 32.
6. Попов, В., Замковой, П., Дмитренко, И., Luciane, N. Многокритериальный выбор структуры и параметров элементов Microgrid с учетом неопределенности исходной информации // Праці Інституту Електродинаміки Національної Академії Наук України. – 2015. – № 42. – С. 8-12.
7. Song, Q., Chissom, B. Forecasting enrollments with fuzzy time series – Part I // Fuzzy Sets and Systems. – 1993. – № 54. – Pp. 1-9.

УДК 621.311.1: 620.92

В.А. Попов, д-р техн. наук, проф
П.А. Замковий, аспірант
Д.С. Поплавец, студент
Л.В. Охота, студент

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»
ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЦЕН НА ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ЭНЕРГИЮ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
НЕЧЕТКИХ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ

Краткосрочное прогнозирование стоимости электрической энергии на оптовом рынке является необходимым условием для эффективного участия в торгах оператора Microgrid и соответствующих подразделений промышленных предприятий. Краткосрочное прогнозирование цены имеет важное значение для определения оптимального распределения мощностей между распределенными источниками генерации и их согласованной работы со средствами аккумулирования энергии, управляемой нагрузкой, и энергосистемой. В работе представлено краткое описание и приведены основные математические зависимости теории нечеткого моделирования временных рядов и методики их прогнозирования. Такой подход предусматривает возможность использования как нечеткой (в том числе лингвистической), так и детерминированной (благодаря фазификации) исходной информации. Экспериментальные расчеты показали перспективность применения нечеткого подхода для решения проблемы прогнозирования временных рядов на примере стоимости электрической энергии, в том числе – в случае отсутствия некоторых статистических данных или возможного наличия в них ошибки.

Ключевые слова: нечеткие временные ряды, Microgrid, краткосрочное прогнозирование цены, распределенная генерация.

V. Popov, Dr. Eng. Sc., Prof.,
P. Zamkovyi, postgraduate student,
D. Poplavets, student
L. Okhota, student

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»
FUZZY TIME SERIES FOR ELECTRICITY PRICE FORECASTING

The short term price forecasting on the wholesale electricity market is a necessary daily task for Microgrid operator and the relevant departments of enterprises effective participation in the bidding. Short-term price forecasting is essential and determining for optimal dispatch of power between the dispersed generation sources and for their coordinated work with energy storage, grid and controlled load. This paper presents a brief description and the basic equations of the theory of fuzzy time series modeling and forecasting techniques. This approach provides the use of a fuzzy (including linguistic) and deterministic initial information. Experimental calculations have shown promising application of fuzzy approach to solve the forecasting problem of time series (for example, the cost of electricity), including in case of absence of some statistics or if data have errors.

Key words: fuzzy time series, Microgrid, short-term price forecasting, distributed generation

References

1. Afanas'eva, T. Modeling of time series fuzzy tendencies / T. V. Afanas'eva. – Ulyanovsk : UIGTU 2013. – 215 с.
2. Afanas'eva, T., Sapunkov, A., Tonerjan, M. The two-stage algorithm of choosing the fuzzy model for time series forecasting // *Avtomatizacija processov upravlenija*. – 2015. – № (4). – Pp. 75-80.
3. Veremiichuk, Yu., Prytyskach, I., Yarmoliuk, O., Opryshko, V. The analysis of the operating properties of integrated intelligent energy supply systems with energy hubs. // *ScienceRise*. – 2016. – № 9.2 (26). – Pp. 12-18.
4. Weron, R. Electricity price forecasting: A review of the state-of-the-art with a look into the future // *International journal of forecasting*. – 2014. – № 30(4). – Pp. 1030-1081.
5. Murthy, G., Sedidi, V., Panda, A., Rath, B. Forecasting Electricity Prices in Deregulated Wholesale Spot Electricity Market – A Review // *International Journal of Energy Economics and Policy*. – 2014. – № 4(1). – p. 32.
6. Popov, V., Zamkoviy, P., Dmytrenko, I., Luciane, N. Multicriteria choice of the structure and parameters of microgrid elements taking into account the uncertainty of the initial information // *Pratsi IED NANU*. – 2015. – № 42. – Pp. 8-12.
7. Song, Q., Chissom, B. Forecasting enrollments with fuzzy time series – Part I // *Fuzzy Sets and Systems*. – 1993. – № 54. – Pp. 1–9.

Надійшла 23.06.2017

Received 23.06.2017