

МОДЕЛІ ПРОГНОЗУВАННЯ ЕКОНОМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ОПТОВОГО РИНКУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В УКРАЇНІ

Основними принципами роботи ринку електричної енергії в Україні є конкурентність, крім діяльності суб'єктів природних монополій, недискримінаційна участь на ринку електричної енергії, рівність прав на продаж і купівлю електричної енергії. Структура та організація оптової частини ринку електричної енергії (ЕЕ) після прийняття Закону України «Про ринок електричної енергії» стала відповідною до структури європейських ринків електричної енергії, який складається з наступних сегментів: ринок «на добу наперед», внутрішньодобовий та балансуєчий ринки, а також довготривалі двосторонні договори [1].

Відмітна особливість процесів виробництва і споживання ЕЕ полягає в тому, що вони визначаються досить складним характером взаємодії сукупності взаємозалежних стаціонарних, нестаціонарних і неоднорідних випадкових величин. Аналіз результатів попередніх робіт та літературних джерел дозволяє зробити висновок про те, що універсального методу, здатного вирішити проблему прогнозування характеристик випадкових динамічних процесів різної природи не існує. З огляду останніх результатів відомо, що затребуваними для практичного застосування можна вважати моделі прогнозування, які забезпечують прогнози цін з похибкою до 11%, і для обсягів електроспоживання – до 7,5% для ринку на добу вперед [2].

Об'єктом досліджень є динаміка економічних показників оптового ринку електричної енергії в часі та під впливом загальноекономічних факторів. Вихідними даними є статистичні відомості про економічні показники, які характеризують оптовий ринок електричної енергії в Україні та теоретичні відомості про їх взаємозв'язок. Відтак можна сформулювати предмет досліджень наступним чином: побудова систем прогнозування економічних показників оптового ринку електроенергії на основі багатofакторних, нейромережевих та автокореляційних моделей.

Метою дослідження є удосконалення існуючих методів прогнозування економічних показників оптового ринку електроенергії за рахунок застосування факторного аналізу і систем самонавчання.

На початковому етапі аналізу даних було виконано задачі нормалізація факторів і приведення їх до єдиної шкали, перевірка на мультиколінеарність та гетероскедастичність, вибір оптимального набору факторів, що описують досліджуване явище та підвищення інформативності ознак, що лишилися.

¹ студентка групи 124-19м, НТУ «Дніпровська політехніка»

² доцент кафедри САіУ, НТУ «Дніпровська політехніка», к. т. н.

В ході попередньої обробки з'ясовано, що більшість вхідних змінних мають високі значення парної кореляції, що не дозволяє адекватно побудувати регресійну модель без виконання операції декореляції. Більшість обраних змінних мають тісний зв'язок з оптовими цінами, 11 з 28 – з усіма одночасно. З урахуванням викладеного, в якості операції декореляції запропоноване виконання процедури факторного аналізу з пониженням розмірності методом головних компонент.

Цільові змінні оптових цін мають високу попарну кореляцію між собою, тому не можуть розглядатися як окремі незалежні змінні. Відтак кожна зі змінних має прогнозуватися в порядку утворення ціни: спочатку оптова ціна ринку довгострокових договорів; потім оптова ціна на ринку «на добу наперед»; далі оптова ціна на внутрішньодобовому ринку; нарешті оптова ціна на балансовому ринку. Прогнозування кожної наступної ціни має відбуватись з урахуванням відомого значення попередніх цін в поточному періоді.

Аналіз автокореляційних залежностей для розглянутих цільових змінних показав, що для оптових цін електроенергії на всіх ринках автокореляція відсутня. Відтак, моделі для прогнозування цих змінних будувалися як факторні без урахування попередніх періодів.

Водночас, рівень споживання електроенергії на оптовому ринку має яскраво виражений періодичний характер і слабо корелює зі змінами в часі основних факторів, що впливають на ціноутворення електричної енергії. Виходячи з цього, для побудови моделі прогнозування споживання електроенергії на наступні періоди запропонована автокореляційна модель, що враховує показники ряду з лагами -1, -6 та -12 місяців.

Результати факторного аналізу що ілюструє рис. 1, дають шість ортогональних факторів, що пояснюють 96,02% дисперсії простору, описаного 28 початковими незалежними змінними. При цьому перші два фактори несуть понад 70% інформаційного навантаження. Надалі ці 6 факторів використовуються для побудови прогнозуючих моделей.

Оптову ціну електроенергії на ринку довгострокових договорів пропонується прогнозувати за моделлю, отриманою за методом групового врахування аргументів, що спирається на 5 з 6 факторів, визначених у методі головних компонент. В якості оціночних можна також застосовувати моделі на основі послідовної регресії або наперед навчену нейронну мережу прямого поширення.

Мастер обработки - Факторный анализ (5 из 7)

Факторный анализ
 Уточнение числа выделяемых факторов в соответствии с желаемой долей воспроизводимой ими дисперсии (правый столбец)

Главные компоненты	Собственное значение	Вклад в результат	Суммарный вклад
<input checked="" type="checkbox"/> Значение 1	10,638	37,9924 %	37,9924 %
<input checked="" type="checkbox"/> Значение 2	9,111	32,5382 %	70,5306 %
<input checked="" type="checkbox"/> Значение 3	3,624	12,9441 %	83,4747 %
<input checked="" type="checkbox"/> Значение 4	1,657	05,9177 %	89,3924 %
<input checked="" type="checkbox"/> Значение 5	1,243	04,4379 %	93,8303 %
<input checked="" type="checkbox"/> Значение 6	0,613	02,1909 %	96,0212 %
<input type="checkbox"/> Значение 7	0,434	01,5516 %	
<input type="checkbox"/> Значение 8	0,330	01,1768 %	
<input type="checkbox"/> Значение 9	0,204	00,7279 %	
<input type="checkbox"/> Значение 10	0,099	00,3529 %	

Рисунок 1 – Навантаження та внесок у загальну дисперсію виділених факторів

Для прогнозування оптової ціни на ринку «на добу наперед» запропоновано модель послідовної лінійної регресії з 5 коефіцієнтами, яка враховує три фактори з шести, отриманих методом головних компонент, та також значення оптової ціни ЕЕ на ринку довгострокових договорів.

Для прогнозування оптової ціни електроенергії на внутрішньодобовому ринку запропоновано модель на основі послідовної регресії, яка має три параметри, і враховує 2 з 6 факторів, визначених у методі головних компонент та значення оптової ціни на ринку «на добу наперед». Модель на основі нейронної мережі, входними даними для якої є ті ж фактори, приймаємо як додаткову, оціночну.

Для прогнозування оптової ціни електроенергії на балансовому ринку запропоновано модель на основі нейронної мережі прямого поширення з трьома входами (перша та друга головні компоненти плюс оптова ціна на ринку «на добу наперед») та трьома нейронами з логістичною активаційною функцією в прихованому шарі.

Всі перелічені моделі мають точність, вищу ніж у аналогів, що не використовують попередній факторний аналіз для декореляції входів і зменшення простору змінних. Помилка прогнозування оптових цін на різних ринках не перевищує 5%. Порівняння моделей-претендентів за критеріями регулярності наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Критерії регулярності для моделей-претендентів

Показник	Модель прогнозування							
	Множинна регресія		Покрокова регресія		Нейронна мережа		МГВА	
	MSE	R ²	MSE	R ²	MSE	R ²	MSE	R ²
Y1	0.071	0.8851	0.0587	0.8836	0.0225	0.9347	0.0179	0.9919
Y2	0.019	0.9887	0.022	0.9714	Перенавчання		Незначима	
Y3	0.0967	0.9994	0.0456	0.9351	0.0861	0.9643	Незначима	
Y4	0.165	0.9395	0.1105	0.7706	0.0195	0.9946	Незначима	

Для прогнозування обсягів споживання електроенергії на оптовому ринку пропонується застосування нейронечіткої моделі на типу ANFIS з трьома входами (лаг -1, лаг -6 та лаг -12), кожен з яких має дві функції належності задані нечіткими множинами у діапазоні варіювання. Мережа, навчена на достатній кількості історичних прикладів, здатна прогнозувати значення електроспоживання на 1-3 місяці наперед з помилкою не вище 1%, що значно точніше відомих аналогів.

Висновки. Виконаний факторний аналіз впливу незалежних змінних та побудовані моделі для прогнозування оптових цін на ринках довгострокових договорів, «на добу наперед», внутрішньодобовому та балансовому ринках. Вирішено задачу прогнозування рівня споживання електроенергії на оптовому ринку.

Наукова новизна роботи полягає в удосконаленні алгоритму прогнозування оптових цін на різних ринках електроенергії та рівня її споживання на основі факторного аналізу, використання покрокової регресії та систем з самонавчанням, що забезпечує відносно помилку прогнозування меншу ніж у відомих аналогів.

Практична цінність роботи полягає в отриманні комплексного математичного забезпечення, яке дозволяє за рахунок підвищення точно прогнозу знизити витрати Регулятора на забезпечення збалансованого постачання електроенергії всім групам споживачів.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Закон України «Про ринок електричної енергії» / Верховна Рада України // URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2019-19#Text>.
2. Борукаев З.Х. Математическое обеспечение методики расчета прогнозной оптовой цены на рынке электроэнергии / З.Х. Борукаев, К.Б. Остапченко, О.И. Лисовиченко // Энергетика та електрифікація. – 2015. – № 9. – С. 33 – 43.