



УДК 621.311:658.8.012.12.

## КОМПЛЕКСНЕ РЕГУЛЮВАННЯ РЕЖИМУ ЕЛЕКТРОНАВАНТАЖЕННЯ ПРОМИСЛОВИХ СПОЖИВАЧІВ



**Б.С. Серебренников,**  
канд. екон. наук,  
НТТУ «КПІ»



**К.Г. Петрова,**  
аспірант, КНТУ

Однією з нагальних проблем електроенергетики України є нерівномірність електроспоживання в часі, що обумовлюється характером попиту споживачів на електроенергію (ЕЕ) протягом доби, тижня, сезону, року.

Тому, особливої актуальності набуває дослідження методів комплексного цілеспрямованого регулювання електронавантаження на всіх рівнях електроенергетичної системи (ЕЕС). Добовий графік електронавантаження (ГЕН) енергосистеми характеризується двома піками — ранковим та вечірнім, а також зниженням навантаження у нічні години. Вирівнювання ГЕН сприятиме підтриманню балансу ЕЕ, заощадженню паливно-енергетичних ресурсів, зменшенню втрат і підвищенню якості ЕЕ тощо.

У [1] розглянуто алгоритм керування режимами електронавантаження промислових споживачів (ПС) організаційними заходами, відзначено

труднощі його реалізації, пов'язані з природною розбіжністю інтересів енергосистеми і ПС. Досвід [2] показує, що важелів, які застосовуються на сьогодні для вирішення проблеми нерівномірності ГЕН, явно недостатньо. Дослідження [3–5] зосереджені лише на одній специфічній галузі чи окремому методі і тому не дають інструментарію комплексного впливу на всі групи споживачів електроенергетичного ринку.

Запропонована у [6] концептуальна модель електроспоживання узагальненого технологічного процесу (ТП) з визначенням умов перерозподілу електричної потужності на інтервалі часу технологічного циклу вирізняється складністю і може бути застосована для обмеженого кола ТП.

У [7] наголошується, що для регулювання добового попиту на ЕЕ крім цінового методу необхідно залучати техніко-технологічні, інформаційно-пропагандистські та інші методи впливу. Ефективність застосування техніко-технологічного методу показано на прикладі вирівнювання ГЕН конкретного ПС у [8], а пріоритетно-крокового методу регулювання — у [9]. Вочевидь, більшого ефекту від залучення обох методів можна досягти при їх комплексному використанні.

Таким чином, аналіз досліджень та публікацій свідчить про актуальність подальших пошуків простих інженерних методів управління ГЕН та дієвих стимулів для зменшення нерівномірності добового електроспоживання.

**Метою роботи є** ранжування методів управління режимами електроспоживання по структурних рівнях ЕЕС для підвищення ефективності їх застосування та дослідження можливостей комплексного застосування методу лімітуючого шляху та пріоритетно-крокового методу для формування раціонального режиму електроспоживання ПС у часі.

Охарактеризуємо виокремлені структурні рівні ЕЕС (рис. 1).

За базовий **1-й рівень** доцільно прийняти технологічну операцію, оскільки вона інтегрує потужність окремих агрегатів і електрообладнання, задіяних на досліджуваному відрізку часу ГЕН.

В якості **2-го рівня** може бути прийнятий ТП, який підсумовує потужність, споживану окремими технологічними операціями.

На **3-у рівні** розглядається окремий споживач з комерційним обліком ЕЕ, як ринкова одиниця для обласної енергокомпанії.

Вузлова підстанція є локальним 4-м рівнем ЕЕС, від якого живляться абсолютно різні, але територіально близькі автономні споживачі (на підстанціях здійснюється облік і управління енергетичними потоками, забезпечення надійності і якості електропостачання).

**5-й рівень** складають 26 енергокомпаній, виокремлені за територіально-адміністративною ознакою, які проводять самостійну фінансово-економічну діяльність із виробництва, передачі та розподілу ЕЕ.

**6-й рівень** формують 8 регіональних ЕЕС (Дніпровська, Донбаська, Західна, Кримська, Південна, Південно-Західна, Північна і Центральна), які пов'язані між собою системоутворюючими та міждержавними лініями електропередачі.

На вищому **7-й щаблі** — об'єднана енергосистема, територіально обмежена державними кордонами України сукупність електростанцій, електромереж та інших об'єктів електроенергетики, що об'єднані централізованим управлінням спільним режимом виробництва, передачі та розподілу ЕЕ.

Раціональним є використання комплексу управляючих дій, направлених одночасно на всі структурні рівні ЕЕС; при цьому, для кожного рівня слід віднайти найбільш дієві важелі впли-

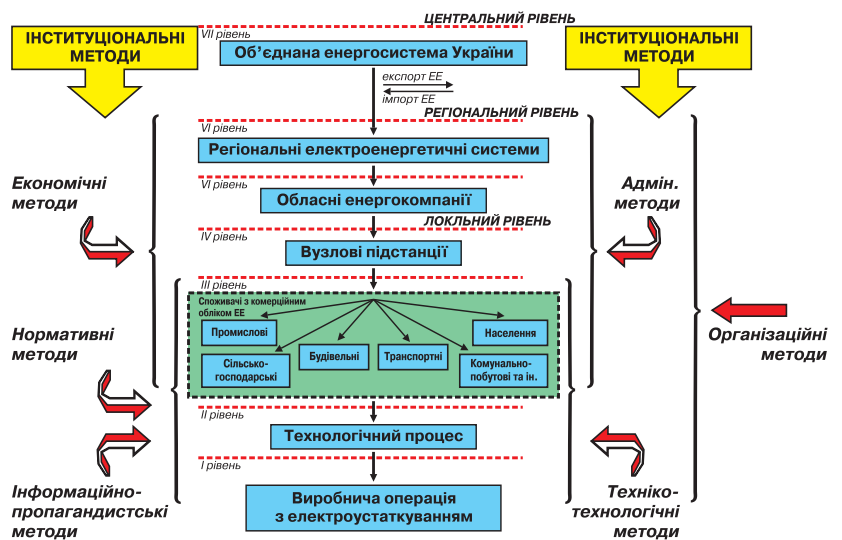


Рис. 1. Застосування методів управління ГЕН структурних рівнів ЕЕС

ву. Здійснювати управління електровикористанням слід за допомогою інструментальних методів прямого впливу (техніко-технологічних, адміністративних, організаційних) та інституційних методів непрямого впливу, які створюють умови для стимулювання регулювання (економічних, нормативних, інформаційно-пропагандистських та інших).

Техніко-технологічні методи (ТТМ) використовують технологічний ресурс і найбільш застосовні на 2, а частково — на 3 рівнях.

Організаційний метод (ОМ) вирівнювання результуючого ГЕН, шляхом взаємного адитивного зсуву його складових, може бути застосований на будь-якому структурному рівні ЕЕС — від 1 до 7.

Використання адміністративних методів (АМ) на 3–7 рівнях доцільне лише тоді, коли ринковий механізм і економічні засоби регулювання виявляються недостатніми або діють надто повільно. Наприклад, — примусове відключення споживачів 2 і 3 категорій, корекція сезонного відліку часу, обмеження добового попиту і т. п.

Економічні методи (ЕМ) використовують сукупність фінансово-економічних інструментів, що цілеспрямовано впливають на обсяги і процеси енергоспоживання; роль головного регулятора виконує ціна на ЕЕ. Найефективніше ЕМ можуть бути застосовані на 3–5 рівнях.

Нормативні методи (НМ) обґрунтовують питомі значення витрати енергії і здійснюють контроль за їх дотриманням. НМ можуть бути використані на 1–5 рівнях; при цьому слід зазначити, що нормування електроспоживання більшою мірою слугує енергоощадженню.

Інформаційно-пропагандистські методи (ІПМ) розраховані на людський фактор і включають заходи щодо популяризації цілей та змісту регу-

Таблиця 1. Результати ранжування методів для I рівня (операція)

| № експерта з/п                  | Найменування $k$ методів |      |      |      |      |      | $T_u$ |
|---------------------------------|--------------------------|------|------|------|------|------|-------|
|                                 | ТТМ                      | НМ   | ОМ   | АМ   | ЕМ   | ІПМ  |       |
|                                 | Ранги методів            |      |      |      |      |      |       |
| 1                               | 5                        | 3    | 3    | 1    | 5    | 2    | 12    |
| 2                               | 5                        | 2    | 2    | 1    | 3    | 1    | 12    |
| 3                               | 6                        | 1    | 4    | 3    | 2    | 1    | 6     |
| 4                               | 6                        | 5    | 4    | 3    | 4    | 1    | 6     |
| 5                               | 6                        | 5    | 3    | 2    | 4    | 1    | –     |
| 6                               | 6                        | 5    | 4    | 3    | 2    | 1    | –     |
| 7                               | 6                        | 4    | 5    | 1    | 3    | 2    | –     |
| 8                               | 6                        | 5    | 4    | 3    | 2    | 1    | –     |
| 9                               | 6                        | 5    | 4    | 3    | 2    | 1    | –     |
| 10                              | 6                        | 5    | 4    | 3    | 2    | 1    | –     |
| $S_i$                           | 58                       | 40   | 37   | 23   | 29   | 12   | 36    |
| Середня оцінка методу, $S_{cp}$ | 5,80                     | 4,00 | 3,70 | 2,30 | 2,90 | 1,20 | –     |
| $L_j$                           | 23                       | 5    | 2    | — 12 | — 6  | — 23 | –     |
| $L_j^2$                         | 529                      | 25   | 4    | 144  | 36   | 529  | –     |
| Ступінь впливу методу           | 1                        | 2    | 3    | 5    | 4    | 6    |       |

лювання (наприклад — ідеї енергетичної незалежності України, інформація про дифтарифи, засоби стимулювання, реклама багатозонних лічильників, енергетичне маркування продукції тощо).

Важливим є визначення пріоритету застосування перелічених методів впливу та селективної чутливості структурних рівнів ЕЕС до кожного з них, яка визначається ступенем економічної, технічної, екологічної, соціальної або іншої доцільності. Для оцінювання дієвості методів управління на різних рівнях ЕЕС було опитано 10 експертів-аналітиків, фахівців з управління режимами електроспоживання. Експертам було запропоновано оцінити пріоритет того чи іншого з 6 методів на певному рівні ЕЕС за 6-бальною системою, де 6 — відповідає найбільш сильному впливові, 1 — найменшому. Для визначення ступеню погодженості експертів та отримання кінцевого висновку застосовано методику статистичної обробки оцінки фахівців [10].

Результати опитування та їх обробки представлені у **табл. 1**, де на перетині рядка, що відповідає  $i$ -му експерту та стовпчика, що відповідає  $j$ -му методу, знаходиться оцінка  $i$ -го експерта для  $j$ -го методу.

Знаходимо суми рангів  $S_i$  відповідних методів:

$$S_i = \sum_{j=1}^m x_{ij}, \quad (1)$$

де  $m$  — кількість експертів, що беруть участь у оцінюванні,  $m=10$ ;  $x_{ij}$  — оцінка (ранг)  $i$ -го експерта для  $j$ -го методу.

Показник однаковості впливу  $k$  методів:

$$T_u = \sum_{u=1}^n (t_u^3 - t_u), \quad (2)$$

де  $n$  — число типів зв'язаних рангів у рядку (коли вплив декількох методів оцінено як однаковий);  $t_u$  — число рівних рангів у  $u$ -му рядку.

Наприклад, за думкою першого експерта, показник однаковості впливу з (2):

$$T_1 = 2^3 - 2 + 2^3 = 12.$$

Визначимо відхилення  $L_j$  та  $L_j^2$  для першого методу (ТТМ):

$$L_1 = S_1 - a = 58 - 35 = 23; \quad L_1^2 = 23^2 = 529, \quad (3)$$

де  $a$  — середнє арифметичне ряду натуральних чисел, розташованих в таблиці у різному порядку,  $a = 0,5 \cdot m \cdot (k+1) = 0,5 \cdot 10 \cdot (6+1) = 35$ ;  $k$  — число розглянутих методів.

Для всіх інших методів результати розрахунку зведені до **табл. 1**.

Погодженість думок експертів оцінюється коефіцієнтом конкордації; оскільки в ранжуваннях (**табл. 1**) є зв'язані ранги, то для I рівня ЕЕС  $W$  визначається згідно [10]:

$$W = \frac{12 \sum_{j=1}^k L_j^2}{m^2(k^3 - k) - m \sum_{u=1}^l T_u} = \frac{12 \cdot 1240}{10^2(6^3 - 6) - 10 \cdot 36} = 0,7209. \quad (4)$$

Коефіцієнт конкордації може змінюватися у межах  $0 \leq W \leq 1$ , причому чим ближче значення  $W$

Таблиця 2. Показники ранжування методів впливу за рівнями

| № рівня | Назва рівня                               | Коефіцієнт конкордації | Коефіцієнт Пірсона | Методи впливу у порядку значимості         |
|---------|-------------------------------------------|------------------------|--------------------|--------------------------------------------|
| 1       | Виробнича операція з електроустаткуванням | 0,7209                 | 36,05              | 1. ТТМ; 2. НМ; 3. ОМ; 4. ЕМ; 5. АМ; 6. ІПМ |
| 2       | Технологічний процес                      | 0,5294                 | 26,47              | 1. ТТМ; 2. ОМ; 3. НМ; 4. АМ; 5. ЕМ; 6. ІПМ |
| 3       | Окремий споживач з комерційним обліком ЕЕ | 0,3566                 | 17,83              | 1. ЕМ; 2. ТТМ; 3. АМ; 4. ОМ; 5. НМ; 6. ІПМ |
| 4       | Вузлова підстанція                        | 0,9224                 | 46,12              | 1. АМ; 2. ЕМ; 3. ОМ; 4. НМ; 5. ТТМ; 6. ІПМ |
| 5       | Обласна енергокомпанія                    | 0,5573                 | 27,86              | 1. ЕМ; 2. АМ; 3. НМ; 4. ІПМ; 5. ОМ; 6. ТТМ |

до 1, тим тісніший зв'язок між ранжуваннями експертів та надійніше групова оцінка. Оскільки  $W$  є випадковою величиною, то це вимагає додаткової перевірки її значимості, зокрема — з використанням коефіцієнта Пірсона:

$$\chi^2_{\text{розр}} = W \cdot m \cdot (k-1) = 0,7209 \cdot 10 \times (6-1) = 36,05.$$

Число ступенів свободи:  $\gamma = k-1 = 6-1=5$ . Порівняння розрахункового значення  $\chi^2_{\text{розр}}$  з табличним критичним значенням  $\chi^2_{\text{кр}}$  для 5% рівня значимості та  $\gamma=5$  дозволяє відкинути або підтвердити гіпотезу про визнання думок експертів узгодженими. З [10]:  $\chi^2_{\text{кр}} = 11,07$ ; оскільки  $\chi^2_{\text{розр}} > \chi^2_{\text{кр}}$ ,  $36,05 > 11,07$ , то думки експертів є узгодженими.

Результати ранжування методів згідно думок експертів наведені у вигляді гістограм (рис. 2) і табл. 2.

Отже, згідно табл. 2, думки експертів приймаються узгодженими для всіх рівнів, оскільки розрахункові коефіцієнти Пірсона більші за табличні. Наведені результати переконливо доводять, що диференціація методів на основні (1, 2, 3) і допоміжні (4, 5, 6) за ступенем впливу на ГЕН кожного рівня при комплексному їх використанні дозволить істотно підсилити вплив на формування енергоефективного режиму роботи споживачів ЕЕ.

Для ПС найбільш притаманними є техніко-технологічні, нормативні та організаційні методи управління режимом електроспоживання, то ж розглянемо їх більш детально.

Комплексне управління проведемо спочатку вирівнявши ГЕН окремих найбільш енергоємних ТП і цехів двох потужних ПС з використанням методу лімітуючого шляху (МЛШ) [8]. Після цього, раціонально вирівнювати вже їх сумарний ГЕН, застосовуючи до них пріоритетно-кроковий метод (ПКМ) [9] і т. д.

Scp

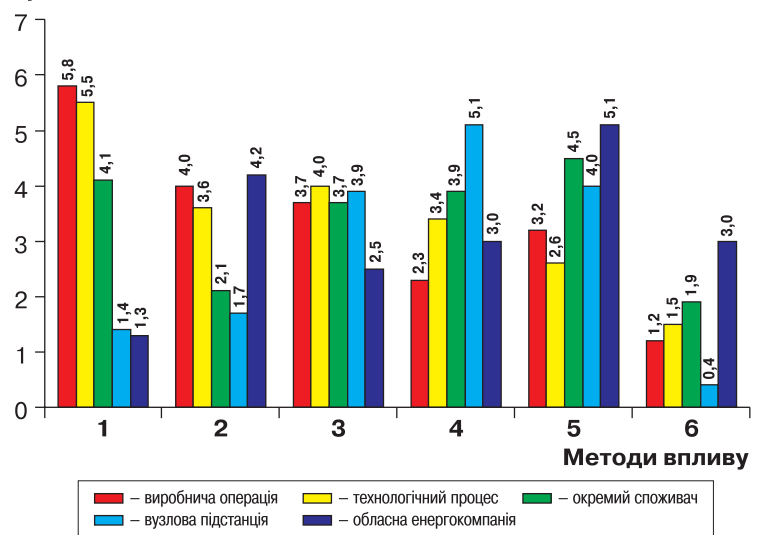


Рис. 2. Гістограми ранжування методів для I-V рівнів ЕЕС (1 — ТТМ; 2 — НМ; 3 — ОМ; 4 — АМ; 5 — ЕМ; 6 — ІПМ)

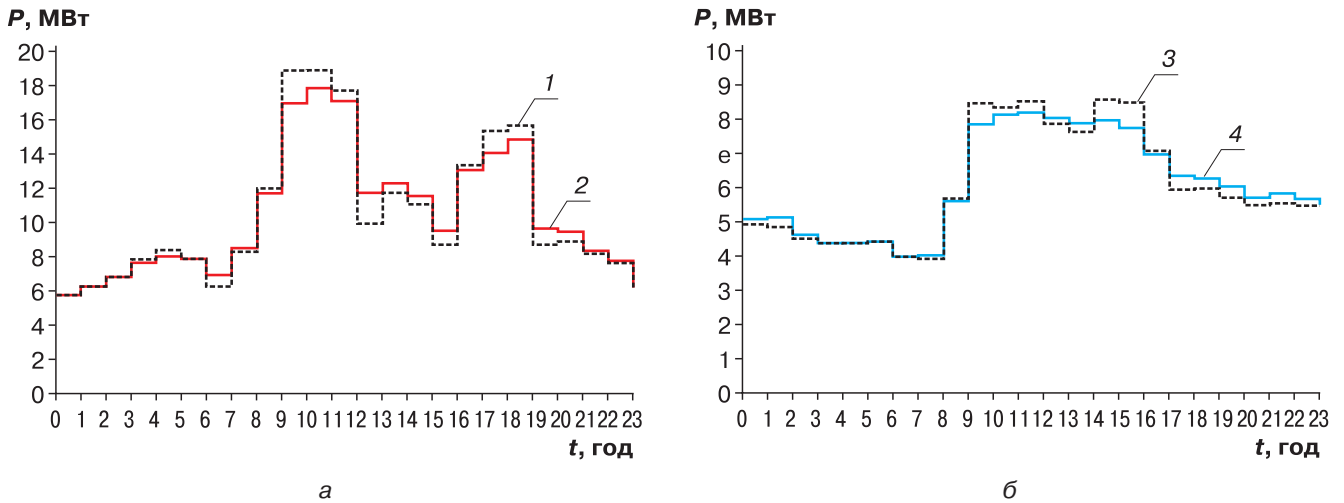
На рис. 3 представлено зимові ГЕН двох реальних машинобудівних ПС (ПС-1 — крива 1 на рис. 3а та ПС-2 — крива 3 на рис. 3б). Проведемо їх вирівнювання, застосувавши МЛШ аналогічно до [8] для більшості енергоємних цехів.

Виявлені резерви часу  $R_t$  визначають величину можливого зміщення електронавантажень паралельних операцій вздовж ТП. Після перерозподілу навантажень у межах  $R_t$ , ГЕН обох ПС набудуть вигляду відповідно кривих 2 та 4 на рис. 3.

Порівняння основних показників вирівнювання графіків 1 та 2 (табл. 3) показує, що  $K_{3r}$  зріс на 5,8%,  $K_{\phi}$  — на 1,4% та  $D_p$  — на 23,7%. Трансформація графіка 3 у 4 супроводжується зростанням  $K_{3r}$  на 4,7%,  $K_{\text{НР}}$  на 6,4% і зменшенням  $K_M$  на 4,7%,  $K_{\phi}$  на 0,6% та  $D_p$  на 21,2%.

Оскільки ГЕН кожного вищого рівня ЕЕС є суперпозицією ГЕН складових нижчого, то вирівнювання ГЕН окремих споживачів призведе до вирівнювання результуючого графіку.





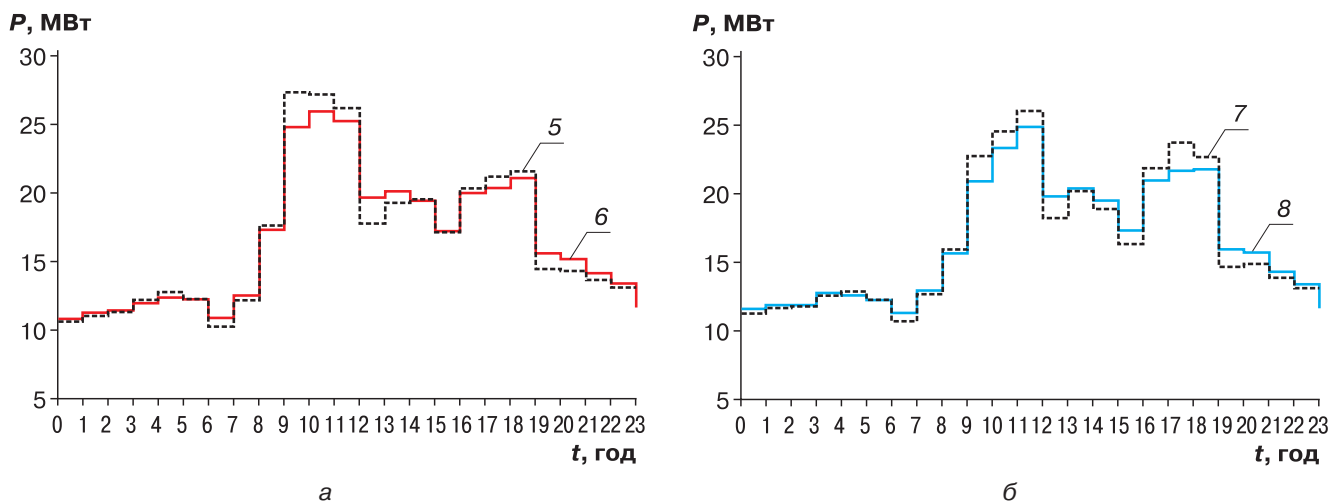
**Рис. 3.** Графіки електроспоживання: а — ПС-1 (1 — до регулювання, 2 — після вирівнювання МЛШ); б — ПС-2 (3 — до регулювання, 4 — після вирівнювання)

**Таблиця 3.** Порівняння основних показників нерівномірності ГЕН двох ПС до та після регулювання МЛШ

| № з/п | Варіанти регулювання | Основні показники нерівномірності ГЕН |        |          |          |        |
|-------|----------------------|---------------------------------------|--------|----------|----------|--------|
|       |                      | $K_{3г}$                              | $K_M$  | $K_{НР}$ | $K_\Phi$ | $D_p$  |
| 1     | ПС-1 до регулювання  | 0,5516                                | 1,8127 | 0,3044   | 1,0723   | 17,027 |
| 2     | ПС-1 після МЛШ       | 0,5843                                | 1,7114 | 0,3225   | 1,0574   | 13,415 |
| 3     | ПС-2 до регулювання  | 0,7078                                | 1,4128 | 0,4576   | 1,0335   | 2,6229 |
| 4     | ПС-2 після МЛШ       | 0,7418                                | 1,3481 | 0,4877   | 1,0272   | 2,1208 |

На **рис. 4а** представлено результуючі сумарні графіки двох ПС (крива 5 отримана сумуванням вихідних ГЕН 1 та 3 з **рис. 3**; крива 6 отримана сумуванням ГЕН 2 та 4 з **рис. 3** після регулювання МЛШ). Видно, що відрегульований ГЕН 6 є більш рівним, ніж вихідний ГЕН 5.

Тепер розглянемо взаємодію двох ГЕН при їх взаємному зміщенні [9]. Ефект вирівнювання сумарного ГЕН двох ПС підсилюмо застосувавши до них ПКМ, який заснований на зсуві  $\tau$  між їх ГЕН часовими "кроками"; пріоритетність надається варіанту з мінімумом взаємкореляційної функції (ВКФ) [3].



**Рис. 4.** Сумарний графік двох ПС при різних методах регулювання: а — крива 5 — вихідний сумарний ГЕН, 6 — після регулювання лише МЛШ; б — крива 7 — після застосування тільки ПКМ (зсув на -2 год); 8 — після комплексного регулювання обома методами — МЛШ та ПКМ при зсуві на -2 год

Таблиця 4. Показники нерівномірності сумарних ГЕН двох ПС

| № з/п | Варіанти регулювання                    | Основні показники сумарного ГЕН |        |          |          |        |
|-------|-----------------------------------------|---------------------------------|--------|----------|----------|--------|
|       |                                         | $K_{зг}$                        | $K_M$  | $K_{НР}$ | $K_\Phi$ | $D_p$  |
| 1     | До регулювання                          | 0,6031                          | 1,6581 | 0,3755   | 1,0495   | 28,827 |
| 2     | Після регулювання лише МЛШ              | 0,6347                          | 1,5756 | 0,4161   | 1,0411   | 23,731 |
| 3     | Після регулювання тільки ПКМ            | 0,6305                          | 1,586  | 0,4072   | 1,0418   | 24,264 |
| 4     | При комплексному регулюванні МЛШ та ПКМ | 0,6607                          | 1,5134 | 0,4514   | 1,0335   | 19,353 |

Як показали розрахунки, зсув  $\tau$ , при якому значення ВКФ є мінімальним ( $k(p_{RS}(\tau)) = -3,9$  МВт), набуває  $\tau = 13$  год, що на практиці є важко досяжним. Тому, раціонально розглядати результат взаємного зсуву ГЕН 1 і 3 та 2 і 4 у реально досяжних межах зсуву (на  $\tau = \pm |1...2|$  год один відносно другого). Порівняльний аналіз значень основних показників нерівномірності ГЕН при чотирьох варіантах зсувів (а саме — при зсувах на 1, 2, 22, і 23 години) показав, що найкраще вирівнювання сумарного графіка досягається при  $\tau = 22$  год (що еквівалентно  $-2$  год), тому, що: для ГЕН 1 і 3 співвідношення ВКФ становить —  $k(p_{13}(1)) > k(p_{13}(2)) > k(p_{13}(23)) > k(p_{13}(22))$ , оскільки  $4,5745 > 3,8915 > 3,4828 > 2,3276$ ; для ГЕН 2 і 4 —  $k(p_{24}(1)) > k(p_{24}(2)) > k(p_{24}(23)) > k(p_{24}(22))$ , бо  $4,2339 > 3,8453 > 3,1766 > 1,9363$ .

На **рис. 4б** наведено сумарні графіки ПС (7 — із застосуванням тільки ПКМ при  $\tau = -2$  год (без МЛШ); 8 — після комплексного регулювання спочатку МЛШ, а потім із застосуванням ПКМ (з 4-х варіантів кращого результату досягнуто також при  $\tau = -2$  год).

Порівняння показників нерівномірності сумарних ГЕН двох ПС з **табл. 4** підтверджують, що в результаті розглянутих варіантів регулювання всі показники для сумарного графіка покращи-

лись: наприклад після МЛШ коефіцієнт заповнення графіка  $K_{зг}$  зріс на 5,1%, а після комплексного застосування МЛШ та ПКМ — на 9,1%.

Слід зазначити, що апробовані методи управління добовими ГЕН є достатньо універсальними та можуть бути застосовані для більшості рівнів електроенергетичної системи. Подальшого вирівнювання результуючого ГЕН можна досягти при застосуванні, окрім розглянутих, й інших інструментальних та інституціональних методів впливу.

## ВИСНОВКИ

1. Статистична обробка результатів експертних оцінок довела коректність ранжування інституціональних та інструментальних методів управління за ступенем впливу на виокремлених структурних рівнях ЕЕС.

Селективне застосування методів на певних рівнях дозволяє суттєво підвищити результативність регулювання режимів електроспоживання.

2. Ефективність управління графіками електронавантажень промислових підприємств зростає при послідовному використанні методів “лімітуючого шляху” та “пріоритетно-крокового”. Комплексне застосування обох методів підвищило рівномірність добового ГЕН майже удвічі.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Розен В.П. Управління режимом електроспоживання промислового підприємства / В.П. Розен // Промелектро. — 2005. — № 6. — С. 35–41.
2. Находов В.Ф. Методологія аналізу та корегування впливу диференційованих тарифів на конфігурацію графіків навантаження енергосистеми України / В.Ф. Находов, Т.В. Яроцька, А.О. Горбоненко // Вісник Вінницького політехнічного університету. — Вінниця: ВНТУ, 2011. — № 6. — С. 72–75.
3. Гордеев В.И. Регулирование максимума нагрузки промышленных электрических сетей / В.И. Гордеев. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 184 с.
4. Калінчик В.П. Структура системи моніторингу та управління електроспоживанням дробильно-помольного комплексу / В.П. Калінчик, О.В. Мейта. — К.: 2009. — 6 с. — Деп. в ДНТБ України 07.12.09, № 97-Ук2009.
5. Дикмаров С.В. Регулирование мощности при производстве и потреблении электроэнергии / С.В. Дикмаров, Г.Г. Садовский. — К.: Техніка, 1981. — 126 с.
6. Розен В.П. Використання внутрішніх резервів технологічних процесів при керуванні режимами електроспоживання промислових підприємств / В.П. Розен, М.В. Прокопеч // Автоматизація виробничих процесів: Всеукр. наук.-техн. журн. — 2006. — № 1 (22). — С. 26–30.
7. Серебренников Б.С. Формування динамічних цін на електроенергію залежно від нерівномірності графіку електроспоживання / Б.С. Серебренников, К.Г. Петрова // Енергетика та електрифікація. — 2012. — № 10. — С. 18–23.
8. Серебренников Б.С. Повышение энергетической эффективности технологических процессов промышленных предприятий / Б.С. Серебренников, Е.Г. Петрова // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. — 2013. — № 1. — С. 15–20.
9. Серебренников С.В. Удосконалення критеріїв пріоритетно-крокового методу регулювання електроспоживання / С.В. Серебренников, К.Г. Петрова // Електротехніка та електроенергетика. — 2012. — № 1. — С. 65–69.
10. Петрова К.Г. Ранжування методів управління режимами електроспоживання за експертною оцінкою / К.Г. Петрова, С.В. Серебренников // Енергетика і автоматика. — 2013. — № 2 (16). — С. 1–6.