

В статье рассматривается подход к постановке расширенной задачи координации в технологических комплексах непрерывного типа. В частности рассматривается сложный технологический комплекс сахарного завода. Описаны основные особенности решения поставленной задачи координации.

*A.Ladanuk, D. Shumigay, R.Boyko*

#### **System task of co-ordination in the technological complexes of continuous type**

The paper considers an approach to setting the extended task of the coordination in technological complex of continuous type. In particular technological complex of sugar factory is considered. The main features of the solution of the coordination problem are described.

Одержано 19.03.12

**УДК 621.311.153**

**К.Г. Петрова, асп., С.В. Серебренников, доц., канд. техн. наук**

*Кіровоградський національний технічний університет*

## **Управління добовими графіками електричного навантаження промислових споживачів техніко-технологічними методами**

Наведено результати досліджень із застосування техніко-технологічних методів регулювання режиму електроспоживання промислових споживачів у часі. Доведено ефективність комплексного використання пріоритетно-крокового методу і методів сітьового планування та управління при вирівнюванні добових графіків електричних навантажень.

**режим електроспоживання, методи регулювання, рівні електроенергетичної системи, промислові споживачі, технологічний процес**

**Вступ.** Характерною особливістю добового графіка навантаження об'єднаної енергосистеми (ОЕС) є наявність двох піків: ранкового та вечірнього, а також значне зниження навантаження в нічні години, причому коливання між максимальним та мінімальним значеннями потужності складає 15...30 % [1].

Вирівнювання графіків електронавантаження (ГЕН) сприяє підтриманню балансу електроенергії (ЕЕ), скороченню кількості маневрових електростанцій, заощадженню паливно-енергетичних ресурсів, зменшенню втрат ЕЕ та підвищенню її якості тощо.

Тому, вельми актуальним є дослідження методів і засобів цілеспрямованого регулювання режиму електроспоживання на всіх рівнях електроенергетичної системи – від окремої операції технологічного процесу до ОЕС в цілому.

**Аналіз досліджень та публікацій.** Питання вирівнювання добових та річних ГЕН почали розглядатись з 30-х років минулого сторіччя [2]. Серйозні результати у формуванні ефективних режимів електроспоживання гірничодобувних та збагачувальних підприємств отримано у [3]. У роботах [4-6] досліджується вплив технологічних та виробничих факторів на енергоспоживання гірничо-металургійних

комплексів. Регулювання електроспоживання залізничним транспортом за рахунок використання обладнання споживачів-регуляторів здійснюється у [7]. Основним недоліком перелічених досліджень за даною тематикою є їх зосередженість тільки на одній досить специфічній галузі і, як наслідок, відсутність інструментарію комплексного впливу на всі групи споживачів.

У [8] окреслюється шість незалежних способів зменшення електричних навантажень у пікові години; проте означені підходи найбільш прийнятні лише для промислових споживачів (ПС), а інші суб'єкти електроенергетичного ринку не розглядаються.

Вперше автори [9] намагаються розробити універсальну методику для керування режимами електроспоживання ПС з використанням ресурсу технологічного процесу (ТП) шляхом побудови концептуальної моделі електроспоживання узагальненого ТП. Такий підхід дозволяє визначити умови перерозподілу потужності електроспоживання на інтервалі часу технологічного циклу та, за допомогою функції щільності розподілу енергії, встановити відповідність між параметрами процесу електроспоживання, фазовим станом та швидкістю його зміни в точці фазової траєкторії. Водночас, в [9] зазначається, що запропоновані методи не можуть бути застосовані в певних галузях виробництва, так як «це спричинить погіршення якісних характеристик ТП» (до ТП, що допускають зміну швидкості реалізації, було віднесено лише електроліз, транспортування нафти з використанням регульованих електроприводів, подрібнення корисних копалин в технологічних млинах). Таким чином, запропоновані в [9] підходи не є достатньо універсальними.

У [10, 11] до регулювання, в основному, залучаються споживачі допоміжного виробництва, зміна режиму роботи котрих мало впливає на функціонування основного ТП, а обрані таким чином споживачі-регулятори не мають достатньої потужності для суттєвого впливу на загальну нерівномірність ГЕН. Наприклад, згідно з [8], в таких галузях промисловості як лісова, деревообробна та целюлозно-паперова, хімічна, будівельних матеріалів, потужність, що може бути регульована таким способом, складає приблизно 30...38 % від максимально споживаної даними галузями потужності, в легкій та електротехнічній – від 10 %, у вугільній – приблизно 30 %.

Натомість, у [9] зазначається, що для підприємств машинобудівної, хімічної, целюлозно-паперової, текстильної промисловості електроспоживання ТП складає 60...80 % від загального електроспоживання, а для кольорової металургії електроємність ТП може становити й понад 80 %; при цьому не обґрунтовується, який саме відсоток піддається регулюванню.

Такі цифрові дані свідчать про доцільність залучення до регулювання не окремих споживачів-регуляторів з обмеженою потужністю, а виявлення можливостей управління за рахунок ресурсу, безпосередньо пов'язаного з основним виробництвом.

Тому, на часі, залишається вдосконалення та розробка простих інженерних методів, які дозволять знизити загальну нерівномірність (ГЕН) як окремих споживачів ЕЕ, так і ОЕС в цілому.

Для оцінювання ступеня вирівнювання режиму електроспоживання використовується ряд показників нерівномірності ГЕН [12], проте, як показали проведені у [13] дослідження, певні критерії вирівнювання в окремих ситуаціях вступають у протиріччя один з одним. А отже, доцільним є пошук нових узагальнених характеристичних параметрів, котрі однозначно реагуватимуть на будь-які зміни конфігурації ГЕН.

**Метою роботи** є дослідження можливостей застосування техніко-технологічних методів для управління режимами електроспоживання у часі як окремих промислових підприємств, так і галузей промисловості.

**Матеріал і результати дослідження.** Максимуми більшості ГЕН потужних промислових підприємств збігаються у часі з піковим навантаженням ОЕС. Такий характер ГЕН визначається біологічним ритмом людської діяльності та технологічним процесом виробництва. А отже, за принципом суперпозиції, вирівнювання ГЕН окремих споживачів призведе до вирівнювання результуючого графіку обласних енергокомпаній (ЕК) та ОЕС.

Електроенергетична система України є складною динамічною системою з певною впорядкованою ієрархічною структурою в якій виокремимо наступні рівні:

(1) виробнича операція → (2) технологічний процес → (3) промислове підприємство (окремий споживач з комерційним обліком ЕЕ) → (4) вузлова підстанція → (5) обласна ЕК → (6) електроенергетична система → (7) ОЕС.

За початковий рівень прийнято операцію (а не окремий потужний агрегат), оскільки саме вона інтегрує потужність, споживану електроустановками, задіяним на відрізьку часу, що розглядається. Операційна структурна одиниця є елементарною складовою ТП і дозволяє, варіюючи моменти стартів та фінішів, здійснювати пошук прихованих часових резервів з метою цілеспрямовано перерозподілу електронавантаження вздовж ТП при незмінному обсязі спожитої енергії.

Для ефективного управління та синхронізації процесу виробництва-споживання ЕЕ необхідно спрямовувати управляючі дії одночасно на всі структурні рівні електроенергетичної системи.

Загалом чинити регулюючий вплив на споживачів ЕЕ можна за допомогою таких важелів, як: техніко-технологічні, нормативні, організаційні, адміністративні, економічні, інформаційно-пропагандистські тощо. З метою визначення пріоритетності їхнього застосування необхідно дослідити селективну ефективність кожного з методів для певного рівня ієрархічної структури.

Розглянемо застосування техніко-технологічних методів для базових 1-5 рівнів.

Виокремимо дві групи методів регулювання: 1 – котрі ґрунтуються на адитивному зсуві ГЕН у часі (без зміни технологічного процесу (ТП)) та 2 – котрі пов'язані зі зміною ТП (з використанням технологічного ресурсу).

Регулювання зі зміною ТП потребує складних досліджень специфіки технологій, стадій, операцій, виявлення їх почерговості, тривалості, енергоємності, пріоритетності та ін. До того ж підприємства значно різняться за характером виробництва, режимами робочого дня, навантаженням, устаткуванням, а ТП постійно удосконалюються, що ускладнює застосування універсальних методів, безпосередньо пов'язаних з технологічним ресурсом.

Регулювання без зміни ТП не потребує спеціальних знань, а тому, ця група методів, вочевидь, є простішою в реалізації. Одним з таких методів є кореляційно-резонансний або так званий пріоритетно-кроковий метод (ПКМ) [2]. Даний метод заснований на теорії кореляції електричних навантажень, відповідно до якої зсуви між двома ГЕН вибираються часовими «кроками», а послідовність задається пріоритетним рядом екстремумів (мінімумів) взаємокореляційної функції (ВКФ):

– на першому кроці обирається зсув між парою графіків, котрі мають максимальне від'ємне значення ВКФ при цьому зсуві;

– на другому кроці обирається зсув між парою графіків, від'ємний екстремум котрих посідає друге місце в пріоритетному ряді і т.д.

У процесі вибору можливе коректування обраних зсувів, обумовлене необхідністю врахування технологічних обмежень.

Головною перевагою даного методу є його універсальність, оскільки він може бути застосований на будь-якому структурному рівні системи – від 2 до 6.

Для прикладу проведемо вирівнювання сумарного ГЕН підгалузі сільськогосподарського машинобудування обласної ЕК (5 рівень) шляхом взаємного зсуву його складових за викладеною в [13] методикою.

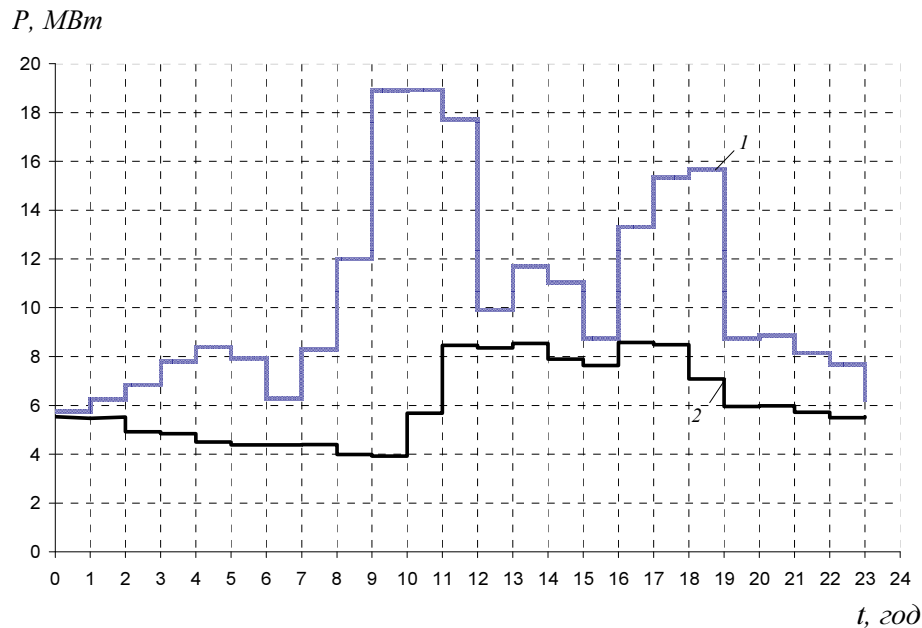


Рисунок 1 – Добові ГЕН виокремлених за потужністю ПС (1 – заводу «Червона Зірка», 2 – «Гідросили»)

Розглянемо ГЕН двох найбільш енергоємних споживачів в підгалузі сільськогосподарського машинобудування обласної ЕК – заводу «Червона Зірка» з середньодобовим значенням потужності 10,437 МВт, що складає 63,1 % від добової споживаної потужності всієї підгалузі (крива 1 на рис.1) та заводу «Гідросила» з потужністю 6,073 МВт, що становить відповідно 36,7 % (крива 2 на рис.1). Шляхом зсуву ГЕН цих двох галузей один відносно одного досягаємо зменшення нерівномірності сумарного графіку всієї підгалузі (при цьому загальне енергоспоживання залишається сталим). Вибір найкращого варіанту зсуву проводиться за критерієм мінімальних значень ВКФ (рис. 2) та дисперсії сумарного графіка, отриманого після зсуву [2].

ВКФ двох періодичних графіків визначався за формулою:

$$k(p_{RS}(\tau)) = \left[ \frac{1}{t_{II}} \left( \int_0^{t_{II}-\tau} p_R(t) p_S(t+\tau) dt + \int_{t_{II}-\tau}^{t_{II}} p_R(t) p_S(t-t_{II}+\tau) dt \right) \right] - p_R p_S, \quad (1)$$

де  $\tau = t_{RS}$  – значення зсуву між першим та другим графіками, год;

$t_{II}$  – тривалість циклу (період),  $t_{II} = 24$  год;

$p_R(t); p_S(t)$  – потужність обох ГЕН у момент  $t$ , МВт;

$p_R$  – середня потужність першого ГЕН, МВт;

$p_S$  – середня потужність другого ГЕН, МВт.

Дисперсія  $Dp$  оцінює нерівномірність групового графіка, який складається із суми двох ГЕН, МВт<sup>2</sup>:

$$Dp_{\Sigma} = Dp_1 + Dp_2 + 2k(p_{12}(\tau)), \quad (2)$$

де  $Dp_1$  – значення дисперсії першого графіка,  $\text{МВт}^2$ ;

$Dp_2$  – значення дисперсії другого графіка,  $\text{МВт}^2$ .

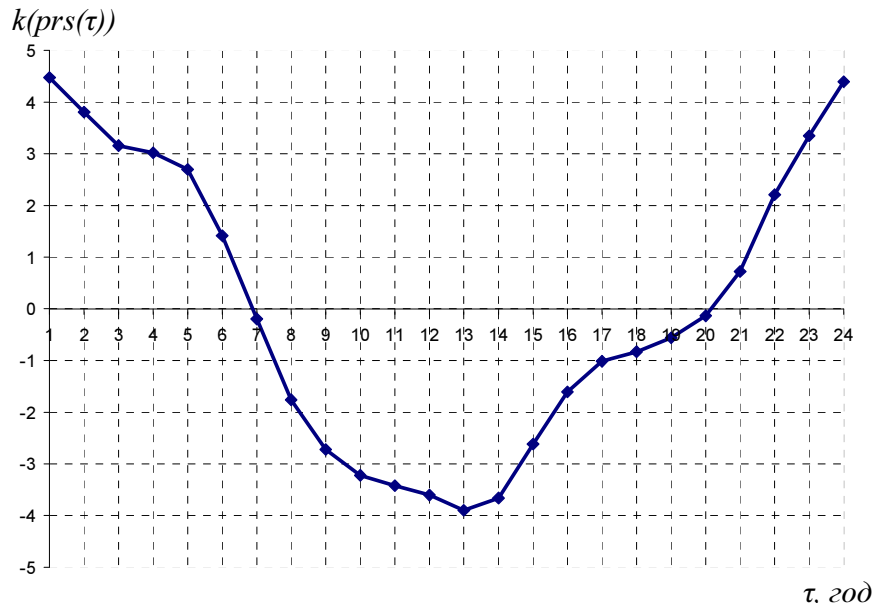


Рисунок 2 – Залежність ВКФ від взаємного погодинного зсуву  $k(p_{RS}(\tau))$  ГЕН заводів «Гідросила» та «Червона Зірка»

Із розрахованої за (1) і наведеної на рис.2 кривої зміни ВКФ при погодинному зсуві ГЕН у межах  $\tau=1\dots 24$  год видно, що мінімум ВКФ, а відповідно й дисперсії  $Dp_{\Sigma}$ , сумарного графіка підгалузі припадає на зсув у 13 годин другого графіка відносно першого (представлених на рис.1). Результуючий сумарний графік підгалузі с/г машинобудування при теоретично оптимальному зсуві показано на рис. 3 (крива 2).

Вочевидь, що на практиці неможливо настільки суттєво змінити режими роботи машинобудівних підприємств, тому раціонально дослідити більш реальні варіанти зміщень у межах  $-1\dots -2$  год  $\leq \tau \leq +1\dots +2$  год (лівий і правий краї рис. 2; за додатній напрямком прийнято зсув праворуч).

З рис. 2 видно, що значення  $k(p_{12}(1)) > k(p_{12}(23)) > k(p_{12}(2)) > k(p_{12}(22))$ , тому обираємо найменший з можливих в цьому діапазоні ВКФ, а саме – при 22-годинному зсуві (що еквівалентний  $\tau=-2$ ). Результуючий сумарний графік підгалузі с/г машинобудування при практично досяжному зсуві його складових на  $\tau=-2$  год показано на рис. 3 (крива 2).

Порівняльний аналіз основних показників ГЕН до та після зсувів (табл. 2) свідчить, що шляхом зсуву ГЕН двох заводів один відносно одного досягається зменшення нерівномірності сумарного графіку всієї підгалузі (при цьому загальне енергоспоживання залишається незмінним).

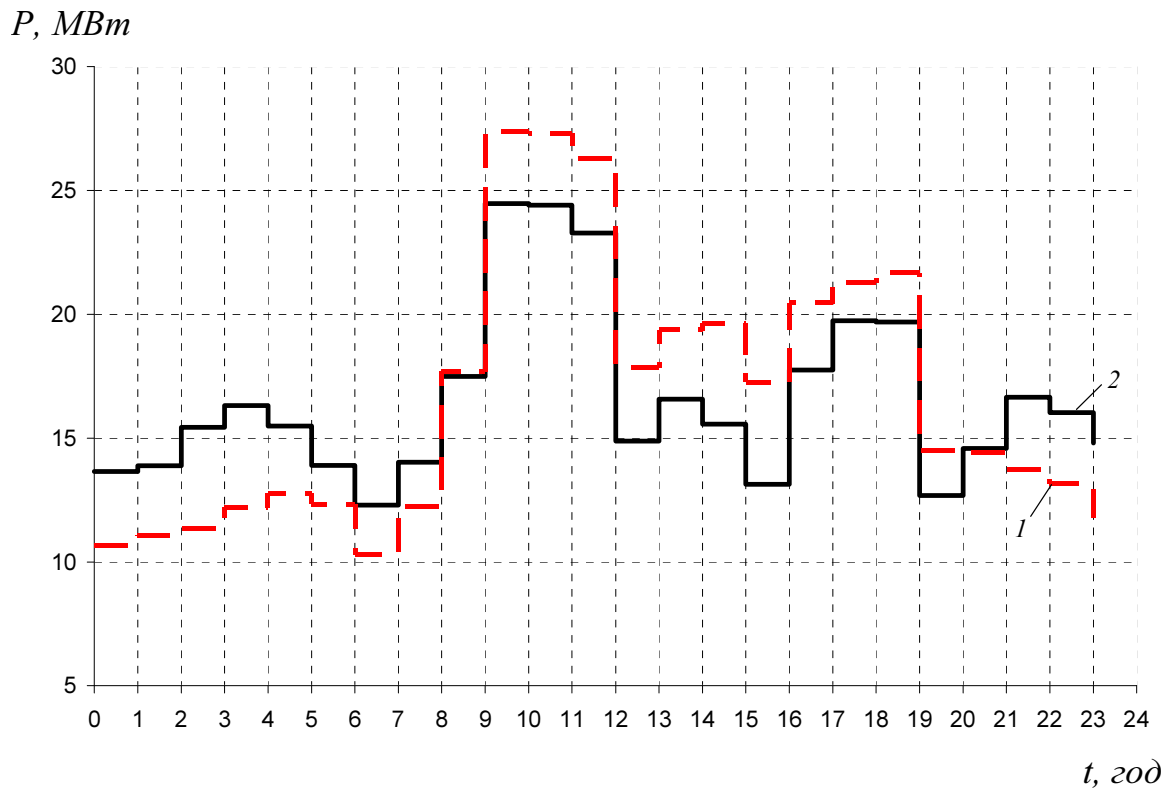


Рисунок 3 – Результуючий сумарний графік підгалузі с/г машинобудування (1 - до зсуву; 2 - оптимальний зсув на 13 год)

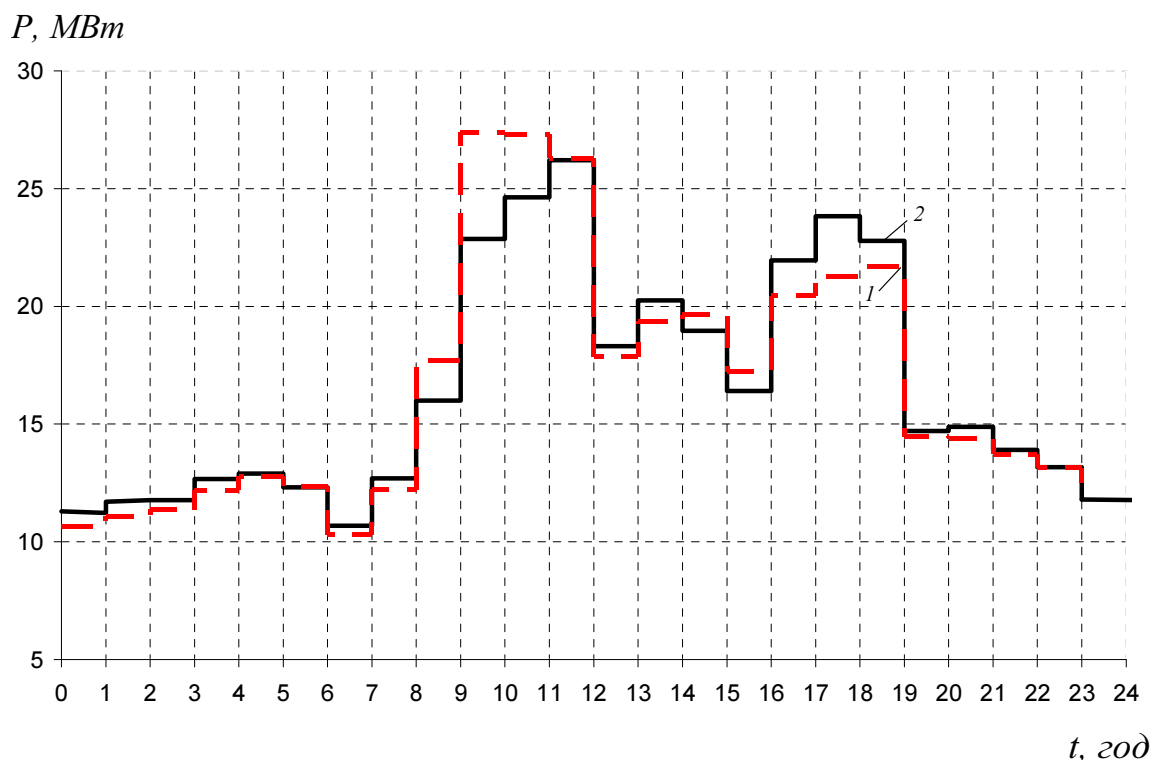


Рисунок 4 – ГЕН підгалузі сільськогосподарського машинобудування до (1) та після зсуву на -2 год (2)

Таблиця 1 – Порівняння основних показників ГЕН до та після зсувів

| № з/п | Варіанти зсуву              | Основні показники [12] графіків навантажень |        |          |          |         |            |
|-------|-----------------------------|---|--------|----------|----------|---------|------------|
|       |                             | $K_{зГ}$                                    | $K_M$  | $K_{HP}$ | $K_\phi$ | $Dp$    | $\sigma_p$ |
| 1     | До зсуву                    | 0,6034                                      | 1,6574 | 0,3761   | 1,0494   | 28,8555 | 5,3717     |
| 2     | Теоретично оптимальний зсув | 0,6754                                      | 1,4806 | 0,5022   | 1,0210   | 12,1276 | 3,4825     |
| 3     | Практично можливий зсув     | 0,6834                                      | 1,4633 | 0,4428   | 1,0365   | 21,1900 | 4,6033     |

З порівняння показників ГЕН (табл. 1) та графіків на рис. 3, 4 видно, що режим електроспоживання після зсуву за обома варіантами значно покращився. Зокрема, при реалізації практично досяжного зсуву:

-  $K_{зГ}$  збільшився з 0,6034 до 0,6834, а отже, і загальна нерівномірність, котру він характеризує зменшилась (для рівномірного ГЕН  $K_{зГ} \rightarrow 1$ );

-  $K_M$  зменшився з 1,6574 до 1,4633, що говорить про зменшення нерівномірності графіку в окремих точках, у даному випадку – це відсутність яскраво виражених ранішніх піків о 9-11 год;

-  $K_{HP}$  збільшився з 0,3761 до 0,4428, тобто зменшилась різниця між  $P_{MIN}$  та  $P_{MAX}$  (розмах графіку).

Вочевидь, кращих результатів при застосуванні ПКМ можна було б досягти після попереднього вирівнювання ГЕН обох ПС за рахунок використання їх технологічного ресурсу.

Одним з таких підходів є використання методів сітьового планування та управління (СПУ) [14]. Розглянемо застосування методів СПУ на прикладі вирівнювання добового електроспоживання інструментального цеху «Червоної Зірки», схема сітьової моделі ТП якого має розгалужену структуру, що включає паралельні стадії та цикли і допускає зміну щільності розподілу енергії вздовж ТП. Використання методів СПУ дозволило виявити наявні резерви часу в основному ТП та реалізувати локальні зміщення певних операцій в середині технологічного циклу, без впливу на швидкість та якість перебігу інших операцій і ТП в цілому. Перерозподіл моментів стартів та фінішів виробничих операцій виконувався за критерієм зменшення нерівномірності режиму електроспоживання та мінімізації оплати споживаної ЕЕ за диференційованим тарифом.

Результати вирівнювання для інструментального цеху «Червоної Зірки» наведені на рис.5 (крива 2), а характеристичні показники нерівномірності ГЕН зведені до табл.2.

Таблиця 2 - Порівняння показників нерівномірності ГЕН інструментального цеху до та після регулювання режиму електроспоживання методами СПУ

| Варіанти режиму електроспоживання | Основні показники нерівномірності ГЕН |         |          |          |        |
|-----------------------------------|---------------------------------------|---------|----------|----------|--------|
|                                   | $K_{зГ}$                              | $K_M$   | $K_{HP}$ | $K_\phi$ | $Dp$   |
| Вихідний                          | 0,52355                               | 1,91003 | 0,2038   | 1,10077  | 0,3166 |
| Після регулювання                 | 0,5995                                | 1,66819 | 0,2333   | 1,07121  | 0,2206 |

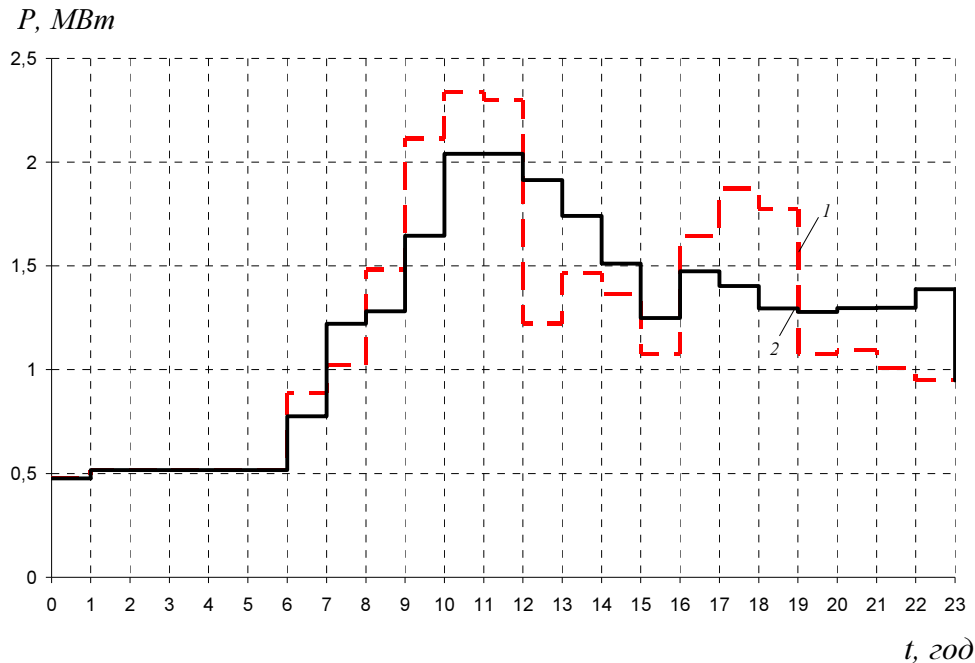


Рисунок 5 – Графік добового режиму електроспоживання інструментального цеху заводу «Червона Зірка» (1 – до регулювання, 2 – після регулювання методами СПУ)

Послідовно провівши подібне регулювання для всіх ТП і цехів заводів «Червона Зірка» та «Гідросила» можна спочатку вирівняти їхні ГЕН по окремо, а після цього, застосувавши ПКМ, – і сумарний ГЕН підгалузі сільськогосподарського машинобудування, що зрештою відповідним чином вплине на ГЕН всіх інших рівнів ієрархічної структури електроенергетичної системи України.

#### Висновки:

1. Диференціація електроенергетичної системи на структурні рівні та селекція методів і засобів за ступенем їх впливу на ГЕН для кожного рівня дозволяє суттєво покращити режими електроспоживання та полегшити забезпечення перманентного балансу на електроенергетичному ринку.

2. Регулювання режиму електроспоживання ПКМ за критерієм мінімуму взаємкореляційної функції та дисперсії показало, що теоретично оптимальний з точки зору найбільшого вирівнювання сумарного ГЕН зсув його складових становить занадто велике значення – 13 год. Тому вибір найбільш прийняттого варіанту зсуву в реальних межах слід здійснювати за експертною оцінкою всього комплексу показників вирівнювання.

3. Використання методів СПУ для управління режимом електроспоживання ПС за рахунок технологічного ресурсу, безпосередньо пов'язаного з основним виробництвом, дозволяє просто і наочно аналізувати можливість проведення локальних зміщень певних операцій у межах технологічного циклу, регулюючи таким чином щільність розподілу енергії вздовж ТП.

4. Розглянуті методи управління добовими графіками електричного навантаження, апробовані на 1-3 рівнях ієрархічної структури, цілком можуть бути застосовані і для решти рівнів 4-6.

5. Подальшого підвищення ступеня вирівнювання режиму електроспоживання ЕК і ОЕС можна досягти за рахунок поширення розглянутих методів регулювання на ПС інших галузей, варіювання швидкості перебігу певних операцій і стадій ТП, а також комплексного використання всіх наявних методів і важелів.



## Список літератури

1. <http://www.ukrenergo.energy.gov.ua/>
2. Гордеев В.И. Регулирование максимума нагрузки промышленных электрических сетей / В.И. Гордеев. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 184 с.
3. Праховник А. В. Управление электрической нагрузкой предприятий / А. В.Праховник, П. Я. Экель, В. П. Калинин // Общие вопросы энергетики и энергосбережения – К. : ИПЭ АН УССР. – 1991. – С. 97–105.
4. Синчук О. М. Оптимізація управління процесами енергоспоживання збагачувальних фабрик гірничо-металургійних комплексів / О. М. Синчук, В.О. Удовенко // Технічна електродинаміка. - К. : Силова електроніка та енергоефективність. - 2002 – Ч. 3. - С. 72-75.
5. Шеметов А.Н. Моделирование электропотребления при агломерации железных руд с использованием методов нечеткой идентификации / А.Н. Шеметов. – М., 2002. -9 с. Деп. в ВИНТИ 28.05.02, № 944 - В 2002.
6. 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.
7. Мухамбетов С.Б. Управление режимом электропотребления предприятий железнодорожного транспорта / С.Б. Мухамбетов // Современные информационные технологии в научных исследованиях, образовании и управлении: Сб. науч. трудов СФ. - Саратов: СГТУ, – 2005 – С. 85-88.
8. Дикмаров С.В. Регулирование мощности при производстве и потреблении электроэнергии / С.В. Дикмаров, Г.Г.Садовский. – К.: Техніка, 1981. – 126 с.
9. 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.
10. Калінчик В. П. Комплексне управління електричним навантаженням виробничих споживачів / В. П. Калінчик // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 1999. – №1. – С. 37–41.
11. Праховник А. В. Вирівнювання графіків електричних потужностей енергосистем за допомогою споживачів-регуляторів дискретної дії / А. В Праховник, В. П. Розен, В. Є. Майстренко // Математичне моделювання в електротехніці й електроенергетиці: І міжнар. наук.-техн. конф., 19–22 вер. 1995. : тези доп. – Львів, 1995. – С. 269–270.
12. Петрова К.Г. Порівняльний аналіз типових та реальних добових графіків електричних навантажень промислових споживачів / К.Г. Петрова // Наукові записки КНТУ.– Вип.11, Ч. І.– Кіровоград: КНТУ, 2011. – С. 274–278.
13. Серебренніков С.В., Петрова К.Г. Регулювання режимів електроспоживання у часі із застосуванням пріоритетно-крокового методу / С.В.Серебренніков К.Г. Петрова // Энергетика та енергетичні системи. Зб. наук. пр. X Міжнарод. НТК мол. учених і спец. у м. Кременчук, 28–29 березня 2012 р. – Кременчук: КрНУ, 2012. – у друці.
14. Петрова К. Регулювання режимів електроспоживання промислових підприємств з використанням технологічного ресурсу / К. Петрова // Энергетика та системи керування: Матер. III Міжнарод. конф. мол. вчених ЕРЕС-2011. – Львів: Вид. Львівської політехніки, 2011. – С.100 – 103.

*Е. Петрова, С. Серебренников*

### **Управление суточными графиками электрической нагрузки промышленных потребителей технико-технологическими методами**

Приведены результаты исследований по применению технико-технологических методов регулирования режима электропотребления промышленных потребителей во времени. Доказана эффективность комплексного использования приоритетно-шагового метода, методов сетевого планирования и управления при выравнивании суточных графиков электрических нагрузок.

*К. Petrova, S.Serebrennikov*

### **Control of daily schedules of electric loads industrial consumers with the use of technical-technological methods**

Presented the results of studies on the application of technical- technological methods of regulation mode power consumption of industrial consumers in time. Proved the efficiency of an integrated priority-step method and methods of network planning and management in control of daily schedules of electric loads.

Одержано 19.03.12