

УДК 621.311:621.3.016.3

*М.М. КУЛИК, академік НАН України, С.В. ДУБОВСЬКИЙ, канд. техн. наук, П.П. КОБРІН
(Інститут загальної енергетики НАН України, Київ)*

ПРОГНОЗУВАННЯ ГРАФІКІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ ОБ'ЄДНАНОЇ ЕНЕРГОСИСТЕМИ НА ДОВГОСТРОКОВУ ПЕРСПЕКТИВУ

У статті наведено метод формових відображень для довгострокового прогнозування графіків електричного навантаження об'єднаних енергосистем в умовах перехідної економіки. Метод розроблено в Інституті загальної енергетики НАН України. Принциповою його особливістю є те, що він не працює з часовими рядами та не використовує апарат виявлення залежностей. Метод побудовано на так званих формових відображеннях.

Графіки електричних навантажень (ГЕН) об'єднаної енергосистеми (ОЕС) розробляються для кожної країни на довгострокову (20-30 і більше років) перспективу, отже є фундаментом, на якому ґрунтуються такі доленосні для неї рішення, як формування перспективної структури генеруючих потужностей. У зв'язку з цим за тривалий період розвитку електроенергетичної науки було напрацьовано велику кількість методів прогнозування ГЕН [1-13]. Переважна більшість розроблених методів орієнтована на оперативне та короткострокове прогнозування ГЕН ОЕС, тобто глибина прогнозування для них становить години-дні та тижні-місяці відповідно.

Окрему групу методів прогнозування утворюють моделі довгострокового прогнозування ГЕН із глибиною прогнозування роки – десятки років.

Аналіз показує, що у сфері прогнозування ГЕН вибір найбільш ефективних моделей та методів визначається саме глибиною прогнозування. Як доводить світова практика, оперативне і короткострокове прогнозування найбільш раціонально проводити на основі методів виявлення залежностей в часовому вимірі. При цьому перевага надається різноманітним методам статистичного аналізу ретроспективних часових рядів споживання потужності та енергії з подальшою їх екстраполяцією. Слід визнати, що для таких глибин прогнозування зазначені методи є обґрунтованими як для країн з усталеними економіками, так і для тих, що перебувають у перехідному періоді. Щоправда, для країн із перехідною економікою існують часові інтервали, коли відбувається зміна знака приросту енергоспоживання з додатного на від'ємний і навпаки. Для таких інтервалів

прогнозного періоду застосування методів виявлення залежностей у часовому вимірі не є коректним і може призвести до неточних чи навіть неправильних прогнозів.

Зовсім інша ситуація має місце в разі довгострокового прогнозування. Відомо, що для надійного прогнозування необхідно використовувати ретроспективний базис, протяжність якого є співставною з глибиною прогнозування. Тобто залежно від глибини прогнозування ретроспективний базис може сягати десятків років. Навіть для країн з усталеною економікою використання часових рядів, що охоплюють десятки років, може призвести до відчутних похибок наприкінці інтервалу прогнозування, оскільки на останні роки інтервалу впливатимуть перші роки ретроспективного періоду. Вплив буде таким самим, як і вплив останніх років цього періоду, хоча їх віддаленість від останніх років прогнозного періоду майже вдвічі менша, що й зумовлює похибки.

Для країн із перехідною економікою використання для прогнозування довгострокових ГЕН методів виявлення залежностей у часовому вимірі є недопустимим. Для таких країн на ретроспективному базисі мають місце періоди з від'ємним приростом енергоспоживання, причому періоди падіння досить протяжні (до 10 років), а глибина зменшення енергоспоживання – значна (до 35-40%). Ця особливість є причиною того, що безпосереднє застосування методів виявлення залежностей до таких часових рядів призводить до грубо неправильних прогнозів електроспоживання та ГЕН ОЕС на глибоку перспективу.

В Інституті загальної енергетики (ІЗЕ) НАН України розроблено новий метод прогнозування ГЕН ОЕС на глибоку перспективу, який дає хороші результати саме для кра-

ін із перехідною економікою. Принципова особливість цього методу полягає в тому, що він не працює з часовими рядами та не використовує виявлені залежності. Метод побудований на так званих формових відображеннях.

Формою річного ГЕН ОЕС є залежність

$$F_j(t) = \frac{P_j(t)}{P_j^{\max}}, \quad (1)$$

де $P_j(t)$ – річний ГЕН ОЕС в j -му році; P_j^{\max} – максимальне значення потужності, що відбирається від ОЕС в j -му році; t – години точного року, $t = 0, \dots, T$; $T = 8760$.

Особливістю форми ГЕН є те, що її максимальне значення завжди відоме

$$\| F_j(t) \| = 1.$$

Крім того, диспетчерські служби ОЕС мають багаті статистичні дані щодо форм як об'єднаної енергосистеми, так і галузевих ГЕН.

Сутність методу формових відображень (МФВ) полягає в тому, що формі прогнозного ГЕН кожної галузі економіки ставиться у відповідність (відображається) певна форма ГЕН цієї ж галузі на відповідній репрезентативній ділянці ретроспективного періоду.

Як відомо, за умов швидкого економічного зростання, що відповідає ретроспективному періоду з позитивними темпами електроспоживання, нарощування обсягів виробництва відбувається інтенсифікацією використання вже встановленого обладнання (інтенсивне зростання). Після вичерпання можливостей інтенсифікації за рахунок максимально інтенсивного завантаження технологічного обладнання протягом робочої зміни та збільшення кількості робочих змін до рівня, зумовленого технологічними особливостями виробництва, подальше збільшення обсягів виробництва відбувається за рахунок введення нових виробничих потужностей (екстенсивне зростання). Реалізація інтенсивних чинників як таких, що не потребують помітних додаткових вкладень, відбувається значно швидше за екстенсивні. З огляду на це, погодинні графіки споживання електричної енергії сукупністю підприємств кожної галузі суспільного виробництва протягом певного року періоду зростання є пропорційними до відповідних графіків минулих років з коефіцієнтом пропорційності, що

дорівнює відповідним індексам річного електроспоживання. Природно, що означена економічна закономірність призводить до практичної незмінності безрозмірної форми графіка електроспоживання в період зростання, що добре підтверджує аналіз фактичних форм добових і сезонних графіків споживання електричної енергії всіма секторами економіки України у 1970-1990 рр.

Що стосується періоду кризового падіння суспільного виробництва, який характеризується відповідним падінням електроспоживання, то тут головним чинником, що визначає часову залежність споживання електричної енергії, є фактор зниження інтенсивності використання встановленого обладнання кожної галузі. При цьому на виробництвах, що припускають таку можливість, відбувається послідовне скорочення кількості робочих змін (ліквідація третьої та другої зміни), а також кількості одиниць технологічного обладнання, що залишається у роботі.

На енергоємних виробництвах із безперервним технологічним циклом, де ліквідація другої та третьої робочих змін неможлива, скорочення виробництва відбувається за рахунок змін кількості одиниць завантаженого обладнання (в роботі залишається найбільш економічне обладнання відповідної одиничної потужності): а також за рахунок переходу на режими часткового завантаження робочого обладнання. Перехід на режими часткового навантаження зумовлює можливість перерозподілу завантаження технологічного обладнання між змінами доби, що використовується на практиці з метою управління електроспоживанням в умовах адміністративних обмежень з боку енергопостачальних компаній, а також мінімізації витрат на електричну енергію за рахунок переходу на зонні тарифи електроспоживання, диференційовані за годинами доби. Природно, що ретроспективний період кризового падіння виробництва супроводжується відповідними змінами форми електричних навантажень сукупності підприємств кожної галузі, що позначається на відповідних змінах суміщеного графіка електронавантаження енергетичної системи [14].

У період відновлення національної економіки, що характеризується позитивними темпами зростання електроспоживання галузей суспільного виробництва, основним чинником нарощування обсягів виробництва є послідовна ін-

генсифікація виробничого процесу з мінімальним введенням нових виробничих потужностей. Природно, що процес відновлення виробництва зумовлюється тими самими економічними чинниками, що й процес його кризового падіння. Тому графіки електроспоживання галузей в період зростання виробництва повинні закономірно відповідати графікам ретроспективного періоду падіння виробництва з таким самим індексом річного електроспоживання. Виняток становитимуть часові ділянки, спричинені аварійними (віялковими) відключеннями електроживлення диспетчерами енергетичної системи. Втім, такі непрезентативні ділянки можуть бути виявленими та виправленими відповідними методами статистичного аналізу.

Отже, репрезентативною ділянкою ретроспективного періоду в методі МФВ вважається період часу падіння виробництва.

Підкреслимо неспівставність протяжностей ретроспективного $[\underline{J}, 0]$ та перспективного $[0, \underline{J}]$ періодів.

Якщо для умов таких країн, як Україна, оговорений ретроспективний період становить близько 10 років, то перспективний може сягати 25-30 років і більше. При цьому забезпечується необхідна точність прогнозування, що майже неможливо навіть для країн з усталеною економікою при застосуванні методів виявлення залежностей в часовому вимірі через велику розбіжність протяжностей ретроспективного і перспективного періодів. Ця істотна перевага МФВ забезпечується тим, що з аналізу виключено час як аргумент (він фігурує лише як параметр), а співставлення та формування ГЕН здійснюється з використанням як аргументу принципово нової величини, а саме – індексу річного електроспоживання.

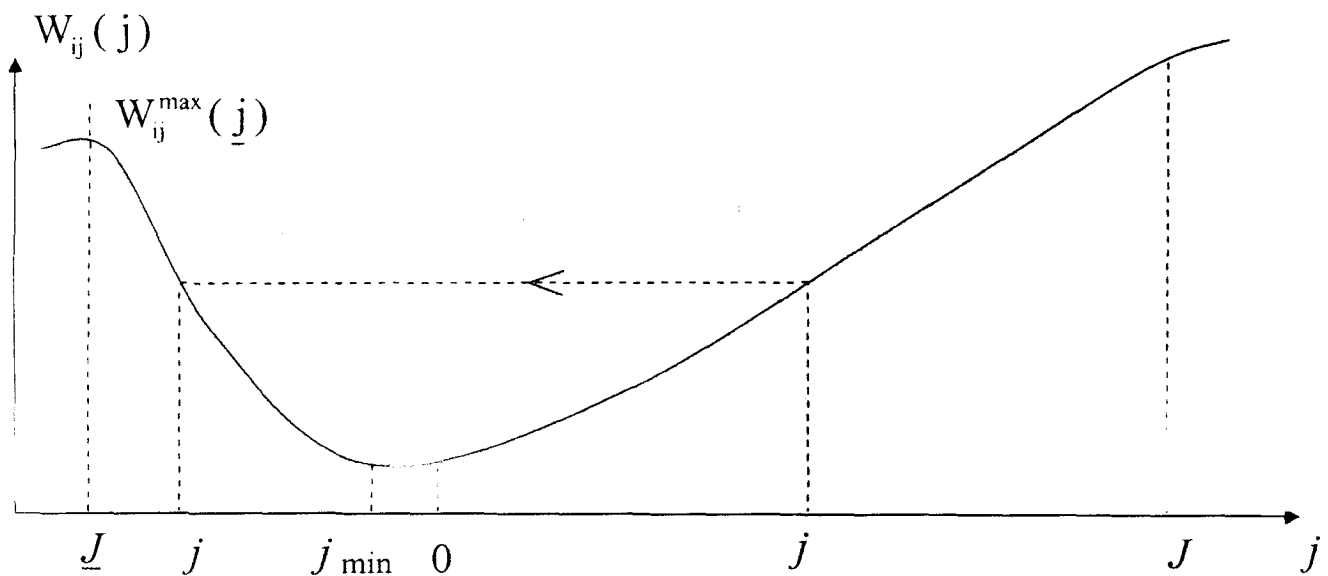


Рис. 1. Споживання електроенергії галуззю економіки по роках

На рисунку зображено графік споживання електричної енергії $W_{ij}(j)$ i -ю галуззю економіки по роках. Графік складається із двох періодів, а саме: ретроспективного $[\underline{J}, 0]$ та перспективного $[0, \underline{J}]$, де \underline{J} – максимальний рік періоду прогнозування.

Принциповою особливістю методу МФВ є те, що початок ретроспективного періоду \underline{J} співпадає з роком максимального електроспоживання i -ї галузі в минулому

$$W_{ij}(\underline{J}) = \max[W_{ij}(j)], \quad (2)$$

де \underline{j} – всі роки минулого періоду, для яких існує статистика $W_{ij}(j)$.

При застосуванні МФВ за вихідні дані беруться (окрім зазначених величин) річні ГЕН галузей національної економіки $P_{ij}(t)$ для кожного року ретроспективного періоду $[\underline{J}, 0]$ з поточним індексом року \underline{j} та повне електроспоживання галузей економіки на ретроспективному і перспективному періодах W_{ij} ; W_{ij} ; $i = \overline{1, I}$; $\underline{j} = \underline{J}, 0$; $j = \overline{0, \underline{J}}, I$ – загальна кількість галузей економіки, що фігурують у моделі.

МФВ містить такі операції з формування прогнозних ГЕН ОЕС на довгострокову перспективу:

1. Визначаються індекси річного електроспоживання галузей економіки за роками ретроспективного і прогнозного періодів:

$$\alpha_{i,\underline{j}} = \frac{W_{i,\underline{j}}}{W_{i,0}}, \quad (3)$$

$$\alpha_{i,j} = \frac{W_{i,j}}{W_{i,0}}, \quad (4)$$

де $i = \overline{1, I}$; $j = \overline{J, 0}$; $j = \overline{1, J}$, 0 – базовий рік.

2. Визначаються форми річних галузевих ГЕН для кожного року ретроспективного періоду:

$$F_{i,\underline{j}}(t) = \frac{P_{i,\underline{j}}(t)}{P_{i,\underline{j}}^{\max}}, \quad (5)$$

де $j = \overline{J, 0}$.

3. Для кожної галузі та кожного прогнозного року періоду $[0, J]$ визначаються нерівності

$$\alpha_{\underline{j}+1} \leq \alpha_{ij} \leq \alpha_{\underline{j}}, \quad (6)$$

або

$$\alpha_{ij} > \alpha_{i,\underline{j}}. \quad (7)$$

4. Для років, в яких справедлива залежність (6), визначаються квазіформи галузевих ГЕН за такою залежністю:

$$F_{i,j}^*(t) = F_{i,\underline{j}+1} + [F_{i,\underline{j}}(t) - F_{i,\underline{j}+1}(t)] \frac{\alpha_{i,j} - \alpha_{i,\underline{j}+1}}{\alpha_{i,j} - \alpha_{i,\underline{j}+1}}, \quad (8)$$

$i = \overline{1, I}$.

5. Для галузей та років, для яких справедлива залежність (7), квазіформи галузевих ГЕН обчислюються за формулою:

$$F_{ij}^*(t) = F_{i,\underline{j}}(t) + [F_{i,\underline{j}}(t) - F_{i,\underline{j}+1}(t)] \cdot \frac{\alpha_{ij} - \alpha_{i,\underline{j}}}{\alpha_{i,\underline{j}} - \alpha_{i,\underline{j}+1}} \exp\left(-\frac{\alpha_{ij} - \alpha_{i,\underline{j}}}{\alpha_{i,\underline{j}} - \alpha_{i,\underline{j}+1}}\right). \quad (9)$$

6. З використанням (8) та (9) обчислюються форми галузевих ГЕН (прогноз):

$$F_{ij}^{\text{прогноз}}(t) = \frac{F_{ij}^*(t)}{F_{ij}^{\text{макс}}}. \quad (10)$$

7. Для кожної галузі та кожного розрахункового року обчислюються коефіцієнти заповнення ГЕН (прогноз):

$$k_{ij}^{\text{зан}} = \frac{1}{T} \int_0^T F_{ij}^{\text{прогноз}}(t) dt, \quad (11)$$

$j = \overline{1, J}$.

8. Для кожної галузі та кожного розрахунко-

вого року обчислюються максимальні значення ГЕН (прогноз):

$$P_{ij}^{\text{макс прогноз}} = \frac{W_{ij}}{k_{ij}^{\text{зан}} \cdot T}, \quad (12)$$

$j = \overline{1, J}$.

9. Обчислюються галузеві ГЕН (прогноз):

$$P_{ij}^{\text{прогноз}} = P_{ij}^{\text{макс прогноз}} \cdot F_{ij}^{\text{прогноз}}(t), \quad (13)$$

$i = \overline{1, I}$; $j = \overline{1, J}$.

10. Обчислюються ГЕН ОЕС (прогноз):

$$P_j^{\text{прогноз}}(t) = \sum_{i=1}^I P_{ij}^{\text{прогноз}}(t), \quad (14)$$

$j = \overline{1, J}$.

11. У прогнозних залежностях (13), (14) не враховано тарифний фактор, а саме – деформація ГЕН під дією багатозонних тарифів. Для врахування цього фактора необхідно виконати корекцію ГЕН, отриманих за (13). З цією метою проаналізуємо дії тарифу, який має F зон. Для кожної галузі та кожного року прогнозування утворюємо F множин годин T_{ij1}, \dots, T_{ijF} та відповідні їм множини значень галузевих ГЕН $P_{ij1}^{\text{прогноз}}, \dots, P_{ijF}^{\text{прогноз}}$, що визначаються зонами тарифу $f \in [1, F]$.

12. Для кожної множини $P_{ijf}^{\text{прогноз}}$ обчислюються зкориговані значення величин галузевих ГЕН шляхом урахування тарифного фактора через функцію попиту (корекція):

$$P_{ijf}^{\text{кор}} = P_{ijf}^{\text{прогноз}} \left[1 + \varepsilon_{ij} \left(1 - \frac{s_{ij}(f)}{s_{ij}} \right) \right], \quad (15)$$

де $s_{ij}(f)$ – тариф зони $f = 1, \dots, F$ галузі i в рік j ; s_{ij} – середньодобовий тариф галузі i в рік j ; ε_{ij} – коефіцієнт еластичності попиту галузі i в рік j .

13. З використанням зкоригованих значень (15) формуються річні галузеві ГЕН $P_{ij}^{\text{кор}}(t)$ для всіх розрахункових років інтервалу прогнозування $[0, J]$ (корекція).

14. З використанням галузевих ГЕН обчислюються річні ГЕН ОЕС для всіх розрахункових років інтервалу $[0, J]$ (корекція):

$$P_j^{\text{кор}}(t) = \sum_{i=1}^I P_{ij}^{\text{кор}}(t).$$

15. Визначаються та обчислюються показники річних ГЕН ОЕС – $P_j^{\text{кор макс}}, F_j^{\text{кор}}(t), k_j^{\text{зан, кор}}(t)$ (корекція).

16. Шляхом сегментації визначаються харак-

терні добові ГЕН ОЕС: зимовий максимум, літній мінімум, зимові, літні вихідні та святкові дні тощо. Визначаються та обчислюються показники добових ГЕН ОЕС (аналогічно п. 15).

МФВ було реалізовано на спеціалізованому програмному комплексі в ІЗЕ НАН України. Метод продемонстрував хорошу точність і надійність отримуваних результатів.

1. Арзамасцев Д.А., Липес А.В., Мызин А.Л. *Модели и методы оптимизации развития энергосистем.* – Свердловск: изд. УПИ, 1976. – 146 с.
2. Веников В.А., Журавлев В.Г., Филипова Т.А. *Оптимизация режимов электростанций и энергосистем: Учебн. для вузов.* – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.
3. Тимченко В.Ф. *Колебания нагрузки и обменной мощности энергосистем. Анализ и синтез для решения задач управления режимами объединенных энергосистем / Под ред. Веникова В.А.* – М.: «Энергия», 1975. – 209 с.
4. Казанцев В.Н. *О прогнозировании нагрузки энергосистемы. В кн.: Вопросы оптимизации развития и эксплуатации энергосистем. Труды УПИ им. С.М. Кирова.* – Свердловск, 1966. – С. 39-44.
5. Лялик Г.Н., Урманцев В.И. *Методы определения перспективных режимов электропотребления энергосистем и их объединений. Материалы семинара. Проблемы прогнозирования электропотребления по предприятиям и энергосистемам.* – Выпуск 2. – Москва, 1970. – С. 24-31.
6. Шлимович В.А. *Прогнозирование и управление электропотреблением в электроэнергетических системах.* – В кн.: *Современные методы анализа и прогнозирования режимов электропотребления в электроэнергетических системах.* – М., 1988. – С. 36-52.
7. Тольмамедов Б.А., Мамедяров О.С. *Построение перспективных графиков нагрузки энергетических систем.* – Труды АЗНИИ. – Т. 20. – Баку, 1973. – С. 21-24.
8. Казанцев В.Н. *О прогнозировании нагрузки энергосистемы.* – Труды УПИ им. С.М. Кирова. *Вопросы оптимизации развития и эксплуатации энергосистем / Под ред. Д.А. Арзамасцева.* – Свердловск, 1966. – С. 39-44.
9. Панкратов Б.К. *Алгоритм для расчета перспективных нагрузок энергосистем.* – В кн.: *Технико-экономические вопросы развития энергетических систем и построение топливно-энергетических балансов.* – М.: Наука, 1969. – С. 80-96.
10. Эбин Л.Е., Левин М.С., Куленов Н.С. *Метод вероятностного моделирования графиков электрической нагрузки.* – В кн.: *Применение математических методов и вычислительных машин в энергетике.* – Кишинев. – Вып. 1, 1968. – С. 40-43.
11. Кобрин П.П., Крисанов Д.В. *Аналіз методів прогнозування графіків електричного навантаження об'єднаної енергосистеми та можливості їх вдосконалення // Проблеми загальної енергетики.* – 2001. – №4. – С. 24-29.
12. Приймак М.В. *Побудова прогнозних графіків енергонавантажень на основі періодичного лінійного випадкового процесу // Технічна електродинаміка.* – 2000. – №3. – С. 50-52.
13. Баранов Г.Л., Марченко Б.Г., Приймак Н.В. *Построение модели и анализ стохастически периодических нагрузок энергосистем // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт.* – 1991. – №2. – С. 12-21.
14. Дубовський С.В., Кобрин П.П. *Аналіз тенденцій зміни режимів електроспоживання в Україні // Технічна електродинаміка.* – 2003. – №3. – С. 73-77.