

УДК 621.314

КАПЛУН В. В.<sup>\*</sup>, ДОНЧИК Є. М.<sup>\*\*</sup>, МАКАРЕВИЧ С. С.<sup>\*\*\*</sup>

Київський національний університет технологій та дизайну\*

ТОВ «Сімкорд», м. Харків\*\*

Національний університет біоресурсів та природокористування України\*\*\*

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ВИЗНАЧЕННЯ УМОВНОГО ДИНАМІЧНОГО ТАРИФА МІКРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ З ВІДНОВЛЮВАНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ

**Мета.** Розроблення теоретичних основ управління процесами генерації, накопичення і споживання електроенергії у мікроенергетичній системі при детермінованому добовому графіку електроспоживання з декількома джерелами на основі одного критерію - умовного динамічного тарифу.

**Методика.** З огляду на дискретний і комбінаторний характер математичних задач для систем такого роду, застосовані принципи структурування, декомпозиції, а також методи дискретної оптимізації, теорії множин, алгебри матриць.

**Результати.** У роботі обґрунтовано основні положення методу математичного моделювання функціонування мікроенергетичної системи з традиційними і поновлюваними джерелами та її оптимізації на основі умовного динамічного тарифу з використанням спектрального аналізу. Показано, що створення електроенергетичних комплексів на основі взаємно-інтегрованих розподілених джерел електроенергії (традиційних і відновлюваних) потребує використання автоматизованих систем управління з урахуванням топології, базових і змішаних режимів функціонування, контролю генерації і споживання електроенергії.

**Наукова новизна.** Вперше запропоновано використання математичної моделі функціонування мікроенергетичної системи з взаємно-інтегрованими розподіленими джерелами електроенергії і комп'ютерними системами управління з урахуванням топології, контролю генерації і споживання електроенергії на основі спектрального аналізу, що дало змогу оптимізувати такі електротехнічні комплекси за одним критерієм – умовним динамічним тарифом.

**Практична значимість.** Одержані результати створюють передумови для вирішення завдань, пов'язаних із математичним моделюванням функціонування складних багатокомпонентних систем, визначення процедур аналізу їх ефективності та оптимальності, удосконалення алгоритмів управління, створення відповідного програмного забезпечення.

**Ключові слова:** мікроенергетична система, традиційні та поновлювані джерела енергії, умовний динамічний тариф, спектральний аналіз.

**Вступ.** Сучасні мікроенергетичні системи, в тому числі і локальних об'єктів, перспективно розглядати, як енергоінформаційні комплекси, у яких підвищення рівня енергоефективності досягається за рахунок нової організації управління їх функціонуванням. При цьому передбачається, що вирішення цього наукового завдання буде покладене в основу забезпечення надійності електроживлення, гарантованої якості енергії, можливості її акумулювання, управління міжсистемними перетіканнями, сегментації та ієрархії силових енергетичних та інформаційних потоків, прийняття оптимальних управлінських рішень (поточних і перспективних).

Однозначно, що подальший розвиток *smart grid* дозволить вирішувати нові завдання оптимального управління функціонуванням електроенергетичними системами комбінованого типу зі значною часткою джерел розподіленої генерації. Навіть досяжний на сьогодні рівень використання ІТ для технічного забезпечення інтелектуального моніторингу, обліку та управління технологічними процесами у електричних мережах є достатнім для

впровадження нових ринкових механізмів ціноутворення в енергетичній сфері. [1] Ключовим завданням на даному етапі є не тільки оптимізація роботи енергосистем, а і формування технічних і економічних передумов залучення до реалізації нових принципів управління енергосистемою споживачів на основі динамічного ціноутворення на електроенергію в режимі реального часу [1,2].

В роботі запропонований метод формування алгоритмів управління енергобалансом мікроенергетичної системи з відновлюваними джерелами шляхом впровадження інтелектуальної системи управління на основі добового прогнозування рівнів генерації джерел, визначення ємності накопичувача для забезпечення заданого графіка електроспоживання, включення в структуру енергетичного модуля таких джерел, які б забезпечили мінімальні експлуатаційні витрати на електрозабезпечення локального об'єкта. На першому етапі завдання полягає в розробці теоретичних основ управління процесами генерації, накопичення і споживання електроенергії при детермінованому добовому графіку електроспоживання з трьома джерелами: зовнішня енергосистема, вітросонячна установка та автономна електростанція з двигуном внутрішнього згоряння на основі одного критерію - умовного динамічного тарифу. Умовний динамічний тариф (УДТ) - це інтегральний показник наведеної поточної вартості електроенергії на основній шині перед розподілом між споживачами локального об'єкта, який формується на основі реальної собівартості електроенергії кожного з джерел, що входять в енергетичний модуль мікро-мережі. Умовою визначення УДТ на заданому інтервалі часу є прогноз незмінності вартості електроенергії та ймовірність, з якою цей прогноз здійснюється на обраному інтервалі часу [1].

Одним із можливих способів прогнозування УДТ може бути метод стохастичного управління. Даний метод базується на наступних припущеннях [3]:

- динаміка процесу описується лінійними диференціальними рівняннями, є одна вхідна і одна вихідна змінна;
- збурення можуть бути стаціонарними гауссівськими процесами з дрібно-раціональними спектральними щільностями.

На початковій стадії необхідно мати деякі експериментальні дані, які характеризують величину збурень, що зустрічаються в процесі експлуатації мікроенергетичної системи. В даному випадку, за допомогою звичайного спектрального аналізу можна визначити характер флуктуацій (чи є флуктуації стаціонарними або нестаціонарними процесами). Так само можна визначити і розподіл можливих збурень. При експлуатації системи можуть виникати так звані «порушення», які призводять до великих відхилень параметрів (значне відхилення напруги, скачки струму, викликані ненормальними або аварійними режимами роботи мікроенергетичної системи і ін.). Так, причинами «порушень» можуть бути деякі особливості роботи окремих компонентів системи, таких як зовнішня мережа електроживлення, традиційні і відновлювані джерела, автоматизована система управління, зміна характеру електроспоживання і т.д. Треба зауважити, що «порушення» можуть бути викликані також несправностями компонентів системи. Процес функціонування мікроенергетичної системи може так само характеризуватися значним коливаннями попиту на електроенергію. У даній роботі приймаємо умову, що добовий графік електроспоживання заданий споживачем і виконується.

**Постановка завдання.** Як зазначалось вище, необхідно дослідити флуктуації наявних параметрів, визначити їх числові характеристики (математичне сподівання, дисперсію і т.і.). При прогнозуванні УДТ на параметри системи, що входять в цільову функцію (функцію вартості) повинні будуть накладені деякі обмеження. Крім обмежень, прийнятих для використання у моделюванні, УДТ повинен бути обраний з точки зору мінімізації дисперсії вихідних параметрів системи, таких як загальна споживана потужність, електричні параметри мікромережі, диференційних тарифів зовнішньої мережі і їх часових зон і т.п. Таким чином, для коректної постановки завдання необхідно дати описати динаміки процесу формування енергетичного балансу мікроенергосистеми з декількома джерелами.

У якості вхідних параметрів для математичної моделі прогнозування енергоспоживання, які впливають на УДТ, приймаємо встановлену потужність джерел електроенергії та вид первинної енергії, яка використовується у генеруючих установках. Так, потужність генерації сонячної батареї залежить від інтенсивності (потужності) сонячного випромінювання. Сонячне випромінювання має явну циклічність і стохастичну складову, яка носить як сезонний, так і добовий характер. Сезонна циклічність обумовлена зміною кількості сонячних днів і інтенсивності випромінювання, добова - тривалістю світлового дня. Однак, поряд з циклічністю, в процесі зміни потужності сонячного випромінювання присутній випадкова (стохастична) складова, пов'язана з раптовою зміною погоди. Подібні міркування справедливі і для процесу генерації електроенергії вітроенергетичною установкою з тією лише різницею, що відсутня яскраво виражена добова циклічність. Безумовно, УДТ залежить від інтенсивності споживання (попиту) на електроенергію в мікроенергетичній системі, яка також залежить і від добової, і від сезонної циклічності. Крім того, математична модель повинна включати коефіцієнти, уточнюючий відповідний енергетичний потенціал сонця і вітру для різних кліматичних зон. Сформовані за таким принципом статистичні дані будуть використовуватися в якості вхідних параметрів.

У першому наближенні приймаємо, що взаємозв'язок між вхідними параметрами буде лінійним. Тоді для опису зміни параметрів можна використовувати моделі у вигляді диференціальних рівнянь, що зв'язують зміни на вході і виході [3-5]. Диференціальні рівняння запишемо в дискретно-різницевого вигляді:

$$\nabla y(t) = \frac{b_0 + b_1 q^{-1} + \dots + b_{n-1} q^{n-1}}{1 + a_1 q^{-1} + \dots + a_n q^{-n}} \nabla u(t - k) + \lambda \frac{1 + c_1 q^{-1} + \dots + c_n q^{n-1}}{1 + a_1 q^{-1} + \dots + a_n q^{-n}} e(t), \quad (1)$$

де  $\nabla(t) = y(t) - y(t - 1)$ ,

$e(t)$  – послідовність розподілів (це може бути білий шум, віннеровський процес і ін.),

$q^n x(t) = x(t + n)$  – оператор зсуву,

$u(t)$  – вхідні параметри,

$y(t)$  – вихідний параметр (у нашому випадку – умовний динамічний тариф),

$$u(t) = \sum_{i=1}^k u_i(t),$$

$u_i(t)$  – вхідні параметри,  $i = \overline{1, k}$ .

В якості вхідних параметрів приймаємо зміну потужності джерел живлення і зміну інтенсивності споживання електроенергії на відповідному інтервалі часу.

Інтенсивність споживання електроенергії залежить від типу і кількості споживачів, параметри яких можна використовувати в якості вхідних у моделі (1).

Рівняння (1) можна переписати у вигляді:

$$y(t) = \frac{b_0 + b_1 q^{-1} + \dots + b_{n-1} q^{n-1}}{1 + a_1 q^{-1} + \dots + a_n q^{-n}} u(t - k) + \lambda \frac{1 + c_1 q^{-1} + \dots + c_n q^{-n}}{(1 - q^{-1})(1 + a_1 q^{-1} + \dots + a_n q^{-n})} e(t), \quad (2)$$

де  $\lambda$  – параметр оцінювання функції максимуму подібності.

Важливою при вирішенні поставленого завдання є процедура ідентифікації [6,7], яка здійснюється послідовно: спочатку для системи 1-го порядку, потім 2-го і т.д.

Математична модель визначення оптимальної ємності акумуляторних батарей від  $q$ -го числа джерел енергії. Для формування принципів алгоритмізації оцінювання функцій спектральної щільності використані підходи, викладені у [8,9]. У якості вхідних процесів обрані потужності автономних джерел, що змінюються в часі  $N_i(t), i = 1 \dots q$ . Розроблена модель дозволяє управляти рівнем заряду акумуляторних батарей, використовуючи вартісну пріоритетність наявних джерел енергії. Статистичні характеристики процесу «заряд-розряд» акумуляторних батарей істотно впливають на формування динамічного тарифу мікроенергосистеми.

Нехай число джерел живлення -  $q$ . Кожне з наявних джерел здатне генерувати певну кількість електроенергії за обраний проміжок часу. Представимо цей процес наступною залежністю:  $X_i(t), i = 1 \dots q$ . Тоді процес функціонування мікроенергосистеми можна представити у вигляді моделі з декількома входами  $X_i(t), i = 1 \dots q$  і одним виходом  $Y$ . У нашому випадку вхідні процеси є впорядкованим набором умовних вхідних процесів, які можуть обчислюються як фінітні перетворення Фур'є. При довільному  $i$  підрядковий індекс  $i (i - 1)!$  означає, що  $i$ -й вхідний процес обумовлений попередніми  $i - 1$  процесами, тобто лінійні внески  $x_1(t), x_2(t), \dots$  аж до  $x_{i-1}(t)$  виключені з  $x_i(t)$ . В оптимальних частотних характеристиках перший індекс позначає вхід, другий - вихід.

Таким чином, для підвищення ефективності мікроенергосистеми необхідна оптимізація ємності акумуляторних батарей в залежності від графіка електроспоживання в цілому (як функції зміни потужності споживачів  $N(t)$  у часі. У нашому випадку критерієм ефективності є мінімальний УДТ мікроенергосистеми.

При  $q$  вхідних процесах можна побудувати  $q!$  різних упорядкованих умовних моделей з кількома входами і одним виходом (шляхом перестановки). Система визначається в частотній області

$$Y = \sum_{i=1}^q L_{i,y} \cdot X_{i(i-1)!} + N.$$

Якщо вихідний процес  $Y$  та шум  $N$  - як  $(q + 1)$  -й процес, обумовлений попередніми  $q$  процесами, то  $N = X(q + 1)q!$  і буде мати місце:

$$X_{(q+1)} = \sum_{i=1}^q L_{i,(q+1)} \cdot X_{i \cdot (i-1)!} + X_{(q+1) \cdot q!}.$$

Важливе значення мають різні підмножини умов. Для перших  $r$  умовних вхідних процесів можна записати при  $r \in q$ :

$$X_{(q+1)} = \sum_{i=1}^r L_{i,(q+1)} \cdot X_{i \cdot (i-1)!} + X_{(q+1) \cdot r!}.$$

Тоді алгоритм умовного перетворення Фур'є можна представити:

$$X_{j \cdot r!} = X_{j \cdot (r-1)!} - L_{r,j} \cdot X_{r \cdot (r-1)!}.$$

Введемо поняття взаємної спектральної щільності

$$G_{ij}(f) = G_{x_i x_j}(f) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{2}{T} E[X_i(f)X_j(f)],$$

де  $X_i(f) = \int_0^T x_i(t) e^{-j2\pi f t} dt$  - фінітні перетворення Фур'є окремої реалізації  $x_i(t)$ ,  $X_i^*(f)$  - величина комплексно сполучена  $X_i(f)$ ,  $E[x]$  - математичне сподівання  $x$ .

Результат для вихідного процесу  $y(t)$  одержуємо шляхом заміни  $x_{q+1}(t)$  на  $y(t)$ . Тоді записуємо розширену спектральну матрицю (матр. 1):

$$\begin{pmatrix} G_{1,1} & G_{1,2} & G_{1,3} & \dots & G_{1,q-1} & G_{1,q} & G_{1,y} \\ G_{2,1} & G_{2,2} & G_{2,3} & \dots & G_{2,q-1} & G_{2,q} & G_{2,y} \\ G_{3,1} & G_{3,2} & G_{3,3} & \dots & G_{3,q-1} & G_{3,q} & G_{3,y} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ G_{q-1,1} & G_{q-1,2} & G_{q-1,3} & \dots & G_{q-1,q-1} & G_{q-1,q} & G_{q-1,y} \\ G_{q,1} & G_{q,2} & G_{q,3} & \dots & G_{q,q-1} & G_{q,q} & G_{q,y} \\ G_{y,1} & G_{y,2} & G_{y,3} & \dots & G_{y,q-1} & G_{y,q} & G_{y,y} \end{pmatrix}$$

Матриця 1.

Алгоритм оцінювання функцій умовної спектральної щільності за допомогою тільки алгебраїчних операцій реалізується в такий спосіб: для будь-яких значень  $j \geq i$  та  $r < j$  де  $i = 1, 2, \dots, q, q + 1; r = 1, 2, \dots, q, i$  на будь-якій фіксованій частоті  $f_k$  маємо:

$$G_{i,j,r!}(f_k) = G_{i,j \cdot (r-1)!}(f_k) - L_{r,j}(f_k) \cdot G_{i,r \cdot (r-1)!}(f_k),$$

$$L_{r,j}(f_k) = \frac{G_{r,j \cdot (r-1)!}}{G_{r,r \cdot (r-1)!}} \quad (3)$$

Починаючи зі значення  $r = 1$ , кожний наступний член розраховується за значенням попереднього. При  $r = 1$  формула (3) дає можливість обчислити для кожної частоти:

$$G_{i,j-1} = G_{i,j} - L_{1,j} \cdot G_{i,1}, L_{1,j} = \frac{G_{1,j}}{G_{1,1}}, \quad (4)$$

$$i, j = 2, 3, \dots, q, q + 1.$$

Члени  $L_{ij}$  обчислюються за елементами першого рядка матриці взаємних спектральних щільностей (матр. 1). Рівності (3) визначають функції виду  $\{G_{i,j-1}\}$  через  $\{G_{i,j}\}$ . При  $j = q + 1 = y$  маємо:

$$G_{i,y-1} = G_{i,y} - L_{1,y} \cdot G_{i,1} \quad (5)$$

В результаті для кожної частоти  $f_k$  одержуємо умовну спектральну матрицю  $\{G_{i,j-1}\}$  розмірністю  $q \times q$ .

При  $r = 2$  для кожної частоти  $f_k$  маємо:

$$G_{i,j-2!} = G_{i,j-1} - L_{2,j} \cdot G_{i,2-1}, L_{2,j} = \frac{G_{2,j-1}}{G_{2,2-1}}, \quad (6)$$

Члени виду  $L_{2j}$  обчислюються за елементами першого рядка матриці (матр. 2). Рівності (6) визначають функції виду  $\{G_{i,j-2}\}$  через  $\{G_{i,j-1}\}$ . При  $j = q + 1 = y$  одержуємо:

$$G_{i,y-2!} = G_{i,y-1} - L_{2,y} \cdot G_{i,2-1}, L_{2,y} = \frac{G_{2,y-1}}{G_{2,2-1}}$$

$$\begin{pmatrix} G_{2,2-1} & G_{2,3-1} & \dots & G_{2,(q-1)-1} & G_{2,q-1} & G_{2,y-1} \\ G_{3,2-1} & G_{3,3-1} & \dots & G_{3,(q-1)-1} & G_{3,q-1} & G_{3,y-1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ G_{(q-1),2-1} & G_{(q-1),3-1} & \dots & G_{(q-1),(q-1)-1} & G_{(q-1),q-1} & G_{(q-1),y-1} \\ G_{q,2-1} & G_{q,3-1} & \dots & G_{q,(q-1)-1} & G_{q,q-1} & G_{q,y-1} \\ G_{y,2-1} & G_{y,3-1} & \dots & G_{y,(q-1)-1} & G_{y,q-1} & G_{y,y-1} \end{pmatrix}.$$

#### Матриця 2.

В результаті для кожної частоти  $f_k$  одержуємо умовну спектральну матрицю  $\{G_{i,j-2!}\}$  з розмірністю  $(q - 1) \times (q - 1)$ .

При  $r = 3$  кожної частоти  $f_k$  маємо:

$$G_{i,j-3!} = G_{i,j-2!} - L_{3,j} \cdot G_{i,3-2!}, L_{3,j} = \frac{G_{3,j-2!}}{G_{3,3-2!}},$$

$$i, j = 4, 5, \dots, q, q + 1.$$

В цьому випадку члени  $L_{3j}$  знаходимо за елементами першого рядка матриці (матр. 3). Функції виду  $\{G_{i,j-3!}\}$  визначається через  $\{G_{i,j-2!}\}$  і т. д.

$$\begin{pmatrix} G_{3,3 \cdot 2!} & \dots & G_{3,(q-1) \cdot 2!} & G_{3,q \cdot 2!} & G_{3,y \cdot 2!} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ G_{(q-1),3 \cdot 2!} & \dots & G_{(q-1),(q-1) \cdot 2!} & G_{(q-1,q \cdot 2!} & G_{(q-1,y \cdot 2!} \\ G_{q,3 \cdot 2!} & \dots & G_{q,(q-1) \cdot 2!} & G_{q,q \cdot 2!} & G_{q,y \cdot 2!} \\ G_{y,3 \cdot 2!} & \dots & G_{y,(q-1) \cdot 2!} & G_{y,q \cdot 2!} & G_{y,y \cdot 2!} \end{pmatrix}.$$

Матриця 3.

Обчислення повторюємо і через  $q - 2$  кроків та одержуємо у відповідності з (1) функції

$$G_{i,j \cdot (q-2)!} = G_{i,j \cdot (q-3)!} - L_{(q-2),j} \cdot G_{i,(q-2) \cdot (q-3)!}, L_{(q-2),j} = \frac{G_{(q-2),j \cdot (q-3)!}}{G_{(q-2),(q-2) \cdot (q-3)!}},$$

$$i, j = q - 1, q, q + 1.$$

При цьому, на кожній частоті  $f_k$  формується умовна спектральна матриця  $\{G_{i,j \cdot (q-2)!}\}$  розмірністю  $(3 \times 3)$ .

На  $(q - 1)$ -му кроці з формули (1) маємо:

$$G_{i,j \cdot (q-1)!} = G_{i,j \cdot (q-2)!} - L_{(q-1),j} \cdot G_{i,(q-1) \cdot (q-2)!}, \quad (7)$$

$$L_{(q-1),j} = \frac{G_{(q-1),j \cdot (q-2)!}}{G_{(q-1),(q-1) \cdot (q-2)!}}, i, j = q, q + 1$$

Члени вигляду  $L_{(q-1),j}$  обчислюються за елементами першого рядка матриці 4.

$$\begin{pmatrix} G_{q-1,(q-1) \cdot (q-2)!} & G_{q-1,q \cdot (q-2)!} & G_{q-1,y \cdot (q-2)!} \\ G_{q,(q-1) \cdot (q-2)!} & G_{q,q \cdot (q-2)!} & G_{q,y \cdot (q-2)!} \\ G_{y,(q-1) \cdot (q-2)!} & G_{y,q \cdot (q-2)!} & G_{y,y \cdot (q-2)!} \end{pmatrix}.$$

Матриця 4.

Рівність (7) формує на кожній частоті  $f_k$  умовну спектральну матрицю  $\{G_{i,j \cdot (q-1)!}\}$  розмірністю  $(2 \times 2)$ . На  $q$ -му кроці одержуємо у відповідності з формулою (3) для кожної частоти  $f_k$  скалярну функцію:

$$G_{y,y \cdot q!} = G_{y,y \cdot (q-1)!} - L_{q,y} \cdot G_{y,q \cdot (q-1)!},$$

$$L_{q,y} = \frac{G_{q,y \cdot (q-1)!}}{G_{q,q \cdot (q-1)!}}.$$

де  $G_{y,y \cdot q!}$  – спектр вихідного шуму в моделі з  $q$  вхідними процесами і одним вихідним процесом. Всі виміряні спектри можуть бути представлені на кожній частоті у вигляді функцій, які мають фізичний зміст:

$$G_{j,j} = \sum_{i=1}^j |L_{i,j}|^2 G_{i,i-(i-1)!}$$

Таким чином, ми послідовно вираховуємо із загального спектру ті частоти, на яких ємність накопичувальної батареї достатня для забезпечення безперервну роботу мікроенергосистеми. Для таких реалізацій будемо мати певний частотний спектр.

Проілюструємо це на деяких прикладах.

*Приклад 1.* Припустимо, що кореляція між джерелами енергії  $x_1(t)$  та  $x_2(t)$  проявляється у деякому взаємному впливі  $x_1(t)$  на  $x_2(t)$ . Необхідно визначити оптимальний лінійний вклад  $x_1(t)$  в  $x_2(t)$ ; позначимо його  $x_{2:1}(t)$ , а умовний (залишковий процес) -  $x_{2-1}(t)$ . Тоді  $x_2(t) = x_{2:1}(t) + x_{2-1}(t)$ .

Перейдемо до перетворень Фур'є і одержимо  $x_2(f) = x_{2:1}(f) + x_{2-1}(f)$ ,

де  $X_{2:1}(f) = L_{1,2}(f) + X_1(f)$ ,  $L_{1,2}(f) = \frac{G_{1,2}(f)}{G_{1,1}(f)}$  визначає оптимальний

лінійний прогноз  $x_2(t)$  по  $x_1(t)$ .

*Приклад 2.* Розглянемо інший процес, обумовлений використанням в мікроенергосистемі з трьома джерелами (рис. 1).

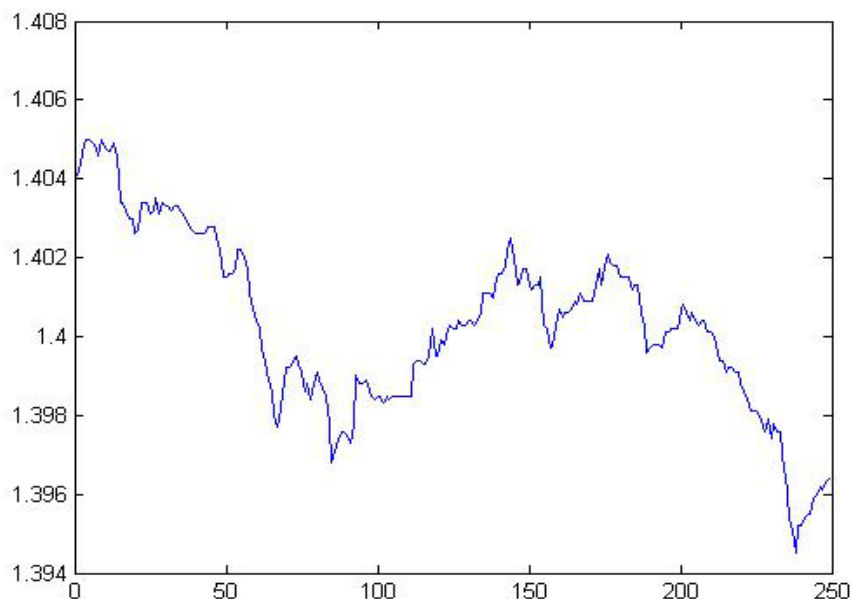


Рис. 1. Спектральна щільність перешкод (шумів), присутніх в системі з трьома джерелами

Тоді шум, обумовлений першим процесом, можна представити наступним чином:

$$\begin{pmatrix} G_{1,1} & G_{1,2} & G_{1,3} & G_{1,y} \\ G_{2,1} & G_{2,2} & G_{2,3} & G_{2,y} \\ G_{3,1} & G_{3,2} & G_{3,3} & G_{3,y} \\ G_{y,1} & G_{y,2} & G_{y,3} & G_{y,y} \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} G_{2,2-1} & G_{2,3-1} & G_{2,y-1} \\ G_{3,2-1} & G_{3,3-1} & G_{3,y-1} \\ G_{y,2-1} & G_{y,3-1} & G_{y,y-1} \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} G_{3,3-2!} & G_{3,y-2!} \\ G_{3,y-2!} & G_{y,y-2!} \end{pmatrix} \rightarrow G_{y,y-2!}$$

В результаті ми отримуємо спектральну щільність перешкод (шумів), присутніх в



нашій системі. Маючи спектральну щільність шумів, можемо виділити таку складову в нашій системі, яка не є білим шумом.

Структурно-алгоритмічна оптимізація мікроенергетичної системи з декількома джерелами. Представимо мікроенергосистему як сукупність елементів, кожен з яких має свою передавальну функцію  $H_j(q), j = 1, \dots, m$ , де  $q$  – оператор зсуву [10].

В результаті ми отримуємо спектральну щільність перешкод (шумів), присутніх в нашій системі. Маючи спектральну щільність шумів, можемо виділити таку складову в нашій системі, яка не є білим шумом.

Розглянемо процес формування умовного УДТ мікроенергосистеми з декількома джерелами енергії і детермінованим графіком електроспоживання (рис. 2). Нехай  $X(t)$  – потужність джерел живлення, а  $Y(t)$  – умовний динамічний тариф, який також є функцією часу. Під функцією  $A(q)$  мається на увазі залежність, яка відображає закон формування умовного динамічного тарифу.

Функції  $H(q)$  і  $K(q)$  можуть бути представлені у вигляді:

$$H(q) = \frac{b_0 + b_1q^{-1} + \dots + b_{n-1}q^{-n+1}}{1 + a_1q^{-1} + \dots + a_nq^{-n}},$$

$$K(q) = \frac{c_0 + c_1q^{-1} + \dots + c_{m-1}q^{-m+1}}{d_0 + d_1q^{-1} + \dots + d_mq^{-m}},$$

де  $q^n x(t) = x(t + n)$  – оператор зсуву.

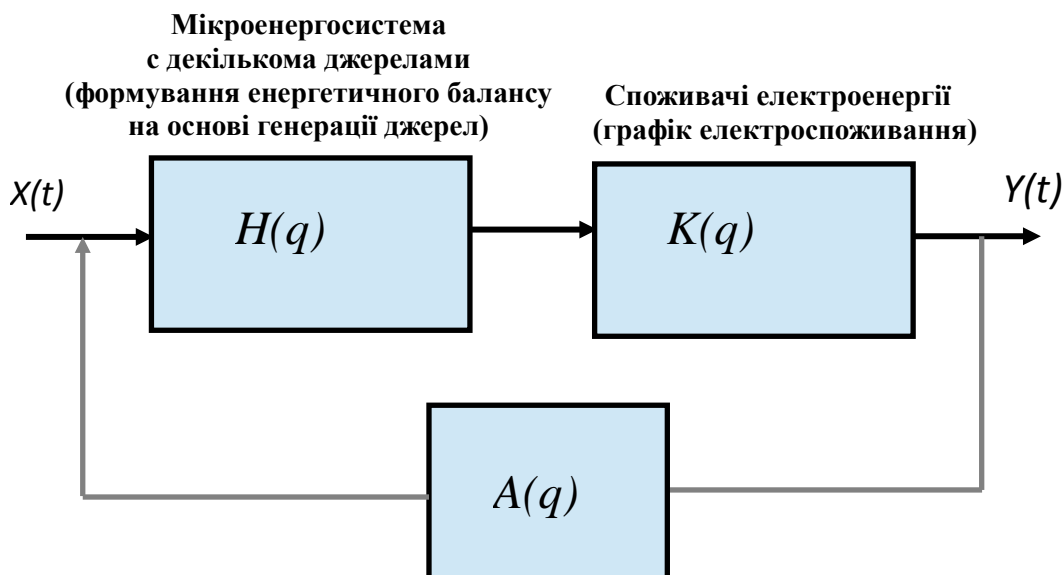


Рис. 2. Структурна схема процесу формування умовного динамічного тарифу

В процесі моделювання проводимо ідентифікацію моделі першого порядку, починаючи з точки  $n = 1$ . Перший крок алгоритму ідентифікації дає можливість оцінювати параметри за методом найменших квадратів. Потім це оцінювання послідовно поліпшуються

доти, поки функція втрат не стане мінімальною, тобто поки не буде одержана оцінка за методом максимуму правдоподібності.

**Висновки.** Розроблено метод математичного моделювання багатокomпонентної мікроенергетичної системи з традиційними і поновлюваними джерелами на основі використанням спектрального аналізу. Запропонована математична модель дозволяє здійснювати як короткостроковий так і довгостроковий прогноз генерації електроенергії в мікроенергосистемі з декількома традиційними і поновлюваними джерелами з урахуванням процесів генерації, накопичення і споживання електроенергії за умов детермінованого добового графіка електроспоживання та прийняття оптимальних управлінських рішень користувачем на основі одного критерію - умовного динамічного тарифу. Дослідивши флуктуації вхідних і вихідних параметрів системи, обґрунтована можливість прогнозування умовного динамічного тарифу як цільової функції (функції вартості) при мінімізації дисперсії вихідних параметрів системи. Запропонований інтегральний показник наведеної поточної вартості електроенергії формується на основі реальної собівартості електроенергії кожного з джерел, що входять в енергетичний модуль мікроенергосистеми. Розроблена модель дозволяє також оптимізувати ємність акумуляторних батарей, використовуючи вартісну пріоритетність джерел енергії, що входять в енергетичний модуль мікроенергосистеми. Статистичні характеристики процесу «заряду-розряду» акумуляторних батарей істотно впливають на формування динамічного тарифу мікроенергетичної системи і надійність електроживлення.

#### Література

1. Каплун В. В., Павлов П. А., Штепа В. Н. Моделирование динамической стоимости электроэнергии в микроэнергетической системе с распределенными источниками в синхронном режиме // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія Технічні науки. - 2017. - № 3 (110). - С. 11-24.
2. Osypenko V., Kaplun V. On Modeling-Based Elements of an Intelligent System for Cost-Effective Dispatching of Energy Islands with Photovoltaic Sources // Матеріали XIII Міжнародної науково-технічної конференції «Комп'ютерні науки та інформаційні технології (CSIT-2018)». Том 1. – Львів : Видавництво «Вежа і Ко», 2018 . – 540
3. Astrom K. J., Bohlin T., Wensmark S., Automatic Construction of Linear Stochastic Dynamic Models for Stationary industrial Processes with Random Disturbances using Operating Records, Tech. Paper TP 18.150, IBM Nordic Laboratory (1965).
4. Priestley MB. Spectral analysis and time series, volume 1: Univariate series, volume 2: Multivariate series, prediction and control. London (UK): Academic Press; 1987. Fifth printing.
5. Bendat J, Piersol AG. Random data: Analysis and measurement procedures. New York (NY): Wiley; 1986.

#### References

1. Kaplun V. V., Pavlov P. A., Shtepa V.N. *Modelyrovanye dynamycheskoi stoyimosti elektrozenerhyu v mykrozenerhetycheskoi systeme s raspredelennymy ystochnykamy v synkhronnom rezhyme* [Simulation of dynamic electricity pricing in mikrogrid with distributed sources in synchronous mode] «Bulletin of the Kyiv National University of Technologies and Design» 2017 Tom 3 (110). P. 11--24.
2. Osypenko V., Kaplun V. On Modeling-Based Elements of an Intelligent System for Cost-Effective Dispatching of Energy Islands with Photovoltaic Sources // Матеріали XIII Міжнародної науково-технічної конференції «Комп'ютерні науки та інформаційні технології (CSIT-2018)». Том 1. – Львів : Видавництво «Вежа і Ко», 2018 . – 540
3. Astrom K.J., Bohlin T., Wensmark S., Automatic Construction of Linear Stochastic Dynamic Models for Stationary industrial Processes with Random Disturbances using Operating Records, Tech. Paper TP 18.150, IBM Nordic Laboratory (1965).
4. Priestley MB. Spectral analysis and time series, volume 1: Univariate series, volume 2: Multivariate series, prediction and control. London (UK): Academic Press; 1987. Fifth printing.
5. Bendat J, Piersol AG. Random data: Analysis and measurement procedures. New York (NY): Wiley;

6. Priestley MB. Non-linear and non-stationary time series analysis. London (UK): Academic Press; 1988.
  7. Corotis RB, Vanmarcke EH, Cornell CA. First passage of nonstationary random processes. Journal of Engineering Mechanics Division, ASME 1972;98(EM2):401–14.
  8. Barbato M, Conte JP. Spectral characteristics of non-stationary stochastic processes: Theory and applications to linear structural systems. Report SSR-07-23. La Jolla (CA): University of California at San Diego; 2007.
  9. Privalsky V. E., Protsenko I. G., Fogel G.A. The sampling variability of autoregressive spectral estimates for hydrometeorological processes, Transactions of the 1<sup>st</sup> World Congress of the Bernouilli Society for Mathematical Statistics and Probability, Tashkent, September 1986, VNU Science Press, Utrecht, 1987.
  10. Hamming R. W., Digital filters, 2<sup>nd</sup> ed., Prentice-Hall, Englewood-Cliffs, New Jersey, 1983.
- 1986.
  6. Priestley MB. Non-linear and non-stationary time series analysis. London (UK): Academic Press; 1988.
  7. Corotis RB, Vanmarcke EH, Cornell CA. First passage of nonstationary random processes. Journal of Engineering Mechanics Division, ASME 1972;98(EM2):401–14.
  8. Barbato M, Conte JP. Spectral characteristics of non-stationary stochastic processes: Theory and applications to linear structural systems. Report SSR-07-23. La Jolla (CA): University of California at San Diego; 2007.
  9. Privalsky V. E., Protsenko I. G., Fogel G. A. The sampling variability of autoregressive spectral estimates for hydrometeorological processes, Transactions of the 1<sup>st</sup> World Congress of the Bernouilli Society for Mathematical Statistics and Probability, Tashkent, September 1986, VNU Science Press, Utrecht, 1987.
  10. Hamming R. W., Digital filters, 2<sup>nd</sup> ed., Prentice-Hall, Englewood-Cliffs, New Jersey, 1983.

**KAPLUN VIKTOR**

*kaplun.v@knutd.edu.ua*

ORCID: 0000-0001-7040-9344

Researcher ID: B-8704-2017

*Pro-Rector for Research and Innovation,  
Kiev National University of Technologies & Design*

**DONCHIK E. M.**

*Simkord Ltd., Kharkiv*

**MAKAREVICH S. S.**

*National University of Life and Environmental Sciences of  
Ukraine*

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УСЛОВНОГО ДИНАМИЧЕСКОГО ТАРИФА МИРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С ВОЗОБНОВЛЯЕМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ

**КАПЛУН В. В. \* ДОНЧИК Е. М. \*\*, МАКАРЕВИЧ С. С. \*\*\***

*Киевский национальный университет технологий и дизайна\**

*ООО «Симкорд», г. Харьков \*\**

*Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины \*\*\**

**Цель.** Разработка теоретических основ управления процессами генерации, накопления и потребления электроэнергии в микроэнергетической системе при детерминированном суточном графике электропотребления с несколькими источниками на основе одного критерия - условного динамического тарифа.

**Методика.** Учитывая дискретный и комбинаторный характер математических задач для систем такого рода, применены принципы структурирования, декомпозиции, а также методы дискретной оптимизации, теории множеств, алгебры матриц.

**Результаты.** В работе обоснованы основные положения метода математического моделирования функционирования микроэнергетической системы с традиционными и возобновляемыми источниками и ее оптимизации на основе условного динамического тарифа с использованием спектрального анализа. Показано, что создание электротехнических комплексов на основе взаимно интегрированных распределенных источников электроэнергии (традиционных и возобновляемых) требует использование автоматизированных систем управления с учетом топологии, базовых и смешанных режимов функционирования, контроля генерации и потребления электроэнергии.

**Научная новизна.** Впервые предложено использование математической модели функционирования микроэнергетической системы с взаимно-интегрированными распределенными источниками электроэнергии и компьютерными системами управления с учетом топологии, контроля генерации и потребления электроэнергии на основе спектрального анализа, что позволило оптимизировать такие электротехнические комплексы по одному критерию - условному динамическому тарифу.

**Практическая значимость.** Полученные результаты создают предпосылки для решения задач, связанных с математическим моделированием функционирования сложных многокомпонентных систем, определение процедур анализа их эффективности и оптимальности, совершенствование алгоритмов управления, создание соответствующего программного обеспечения.

**Ключевые слова:** микроэнергетическая система, традиционные и возобновляемые источники энергии, условный динамический тариф, спектральный анализ.

## MATHEMATICAL MODEL OF ELECTRICITY DINAMIC PRISING IN MIRO GRIG WITH RENEWABLE SOURCES

KAPLUN V. V. \*, DONCHIK E. M. \*\*, MAKAREVICH S. S. \*\*\*

Kyiv National University of Technologies and Design\*

Simkord Ltd., Kharkiv \*\*

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine\*\*\*

**Purpose.** Development of theoretical bases for managing the processes of generation, accumulation and consumption of electricity in the microenergy system with a deterministic daily electricity consumption schedule with several sources based on one criterion - the conditional dynamic tariff.

**Methodology.** Given the discrete and combinatorial nature of mathematical problems for systems of this kind, the principles of structuring, decomposition, as well as methods of discrete optimization, set theory, matrix algebra, are applied.

**Results.** The paper substantiates the main provisions of the method of mathematical modelling of the functioning of the micro-energy system with traditional and renewable sources and its optimization based on the conditional dynamic tariff using spectral analysis. It is shown that the creation of electrical systems based on mutually integrated distributed sources of electricity (traditional and renewable) requires the use of automated control systems taking into account the topology, basic and mixed modes of operation, control of generation and consumption of electricity.

**Originality.** For the first time, it was proposed to use a mathematical model of the functioning of a micro grid with mutually integrated distributed sources of electricity and computer control systems with regard to topology, control of generation and consumption of electricity based on spectral analysis, which made it possible to optimize such electricity complexes according to one criterion - conditional dynamic tariff.

**Practical significance.** The obtained results create prerequisites for solving problems related to mathematical modelling of the operation of complex multicomponent systems, the definition of procedures for analyzing their effectiveness and optimality, the improvement of control algorithms, the creation of appropriate software.

**Keywords:** micro grid, traditional and renewable energy sources, conditional dynamic tariff, spectral analysis.