

УДК 621.311.245

І.М.Кирпатенко, канд.техн.наук (Національний технічний університет України "КПІ", Київ)

Оптимізація автономних енергосистем на основі ВДЕ за критерієм максимальної ймовірності безперебійного енергопостачання споживачів

У статті запропоновано методику визначення встановленої потужності енергогенеруючого обладнання та ємності системи акумулювання автономної енергосистеми, яка базується на ймовірнісних характеристиках енергопотoku, з метою забезпечення максимальної ймовірності безперебійного енергозабезпечення споживачів. Розглянуто випадок використання джерела відновлюваної енергії одного виду.

В статье предложена методика определения установленной мощности энергогенерирующего оборудования и емкости системы аккумуляции автономной энергосистемы, основанная на вероятностных характеристиках энергопотока, с целью обеспечения максимальной вероятности бесперебойного энергообеспечения потребителей. Рассмотрен случай использования источника возобновляемой энергии одного вида.

Вступ. Основною метою автономних енергосистем на основі ВДЕ, за деякими винятками, є стабільне енергопостачання споживачів. Виходячи з цього, актуальною задачею є визначення такої структури енергосистеми, при якій забезпечувалася б максимально можлива ймовірність безперебійного енергопостачання споживачів за певної обмеженої вартості енергосистеми. Таким чином, необхідно розв'язати задачу оптимізації за критерієм мінімізації ймовірності перебою в енергопостачанні при обмеженні вартості системи.

Постановка задачі. У найбільш загальному вигляді до структури автономної енергосистеми на основі ВДЕ входять:

- енергогенеруюче устаткування;
- система акумулювання;
- споживачі.

В якості енергогенеруючого устаткування використовуються пристрої, що перетворюють енергію ВДЕ в електричну, теплову або механічну, та відповідно використовуються системи акумулювання електричної, теплової або механічної енергії.

Для математичного описання енергогенеруючого обладнання використано наступні величини: P_{inst} – встановлена потужність, Вт; C_{inst} – питома вартість обладнання, грн./кВт.

Для математичного описання системи акумулювання використовуються: Q – ємність системи

акумулювання, кВт·год; C_{acc} – питома вартість системи акумулювання, грн./кВт·год. Споживачі характеризуються середньодобовим споживанням енергії \bar{E} , кВт·год/добу.

Автономні енергосистеми на основі ВДЕ використовують енергопотоки, що існують у довікллі, а отже, перебіг в енергопостачанні споживача настане в той момент, коли інтенсивність енергопотoku знизиться нижче певного рівня, а в системі акумулювання не буде достатньо енергії, щоб забезпечити живлення споживачів на період зниження інтенсивності енергопотoku. Отже, умовою безперебійного енергопостачання споживачів є наявність системи акумулювання з ємністю, достатньою для зберігання енергії для живлення споживачів у періоди відсутності енергопотoku ВДЕ та наявність достатньо потужних енергогенеруючих установок, щоб у періоди достатньої інтенсивності енергопотoku ВДЕ забезпечити:

- живлення споживачів;
- надходження енергії до системи акумулювання в обсязі, достатньому для живлення споживачів у періоди зниження інтенсивності енергопотoku ВДЕ.

Методика розрахунку встановленої потужності енергогенеруючого обладнання та системи акумулювання. Внаслідок того, що енергопотоки ВДЕ мають ймовірнісний характер, методика розрахунку енергосистеми базуватиметься на

імовірнісних характеристиках цих енергопотоків. Нехай $P_a(t)$ – імовірність події A , тобто імовірність того, що період, під час якого інтенсивність енергопотоків ВДЕ знизилась нижче певного рівня, не перевищуватиме $t = n$ діб. Нехай також $P_b(t)$ – імовірність події B , тобто імовірність того, що період наявності енергопотоків з інтенсивністю, достатньою для живлення споживачів і надання енергії системі акумулювання, достатньою для живлення споживачів на час n , буде не менше $t = m$ діб. Тоді ймовірність безперебійного енергопостачання визначатиметься формулою:

$$P = P_a(t) \cdot P_b(t),$$

якщо події A і B є статистично незалежні, та формулою:

$$P = P(A \parallel B)(t),$$

де $P(A \parallel B)(t)$ – умовна ймовірність того, що відбулася подія A і подія B , у випадку наявності статистичного зв'язку між цими подіями.

Наявність або відсутність статистичного зв'язку між тривалістю періодів наявності і відсутності енергопотоків можна встановити шляхом обробки статистичних даних.

Розглянемо випадок статистичної незалежності тривалості періодів наявності та відсутності енергопотоків. Необхідно знайти максимум добутку $P = P_a(t) \cdot P_b(t)$ з умови обмеження вартості системи величиною S . Ємність системи акумулювання можна визначити за формулою:

$$Q = \bar{E} \cdot n, \quad (1)$$

а вартість системи акумулювання складатиме:

$$S_{acc} = \bar{E} \cdot n \cdot C_{acc}.$$

Встановлену потужність енергогенеруючих пристроїв можна визначити з рівняння:

$$P_{inst} \cdot m = \bar{E} \cdot n + \bar{E} \cdot m, \quad (2)$$

де перший доданок – це енергія, яку необхідно надати системі акумулювання для забезпечення споживачів енергією в період відсутності енергопотоків тривалістю n діб, другий доданок – енергія, необхідна для живлення споживачів у період наявності енергопотоків. Тобто

$$P_{inst} = \bar{E} \cdot \left(1 + \frac{n}{m}\right).$$

Вартість енергогенеруючого обладнання:

$$S_{gen} = C_{inst} \cdot \bar{E} \cdot \left(1 + \frac{n}{m}\right).$$

Задача оптимізації формулюється таким чином:

$$\begin{cases} \max \{P_a(t) \cdot P_b(t)\} \\ Q \cdot C_{acc} + P_{inst} \cdot C_{inst} = S. \end{cases}$$

З фізичних міркувань очевидно, що максимальну ймовірність безперебійного енергопостачання споживачів можна забезпечити, повністю використавши наявне фінансування S . Отже, максимальна ймовірність безперебійного енергопостачання знаходитиметься на прямій:

$$Q \cdot C_{acc} + P_{inst} \cdot C_{inst} = S. \quad (3)$$

За такої умови тільки одна зі змінних, Q або P_{inst} , є незалежною. Таким чином, задача зводиться до знаходження екстремуму функції однієї змінної:

$$P = P_a(t) \cdot P_b(t) = (1 - P(n)) \cdot P(m), \quad (4)$$

де $P(m)$ та $P(n)$ – ймовірності того, що період наявності енергопотоків не перевищуватиме m діб, а період відсутності енергопотоків не перевищуватиме n діб відповідно. Використовуючи (1)–(3), виразимо змінні m та n через відомі величини:

$$\begin{cases} m = \frac{Q \cdot C_{inst}}{S - Q \cdot C_{acc} - \bar{E} \cdot C_{inst}} \\ n = \frac{Q}{\bar{E}}, \end{cases}$$

таким чином, формула (4) набуває вигляду:

$$P = \left(1 - P\left(\frac{Q \cdot C_{inst}}{S - Q \cdot C_{acc} - \bar{E} \cdot C_{inst}}\right)\right) \cdot P\left(\frac{Q}{\bar{E}}\right).$$

В роботі [1] шляхом аналізу статистичних даних було показано, що у випадку використання енергії вітру $P(n)$ має експоненційний розподіл із щільністю ймовірності:

$$\frac{dP(n)}{dn} = \lambda \cdot \exp(-\lambda_1 \cdot n);$$

$$P(n) = 1 - \exp(-\lambda_1 \cdot n).$$

Використавши наведене в роботі [1] програмне забезпечення для статистичного аналізу даних

за 20 років спостереження для Донузлаву (АР Крим), було встановлено, що $P(m)$ також добре апроксимується експоненційним розподілом: $P(m) = 1 - \exp(-\lambda_2 \cdot m)$. Таким чином, імовірність безперебійного енергопостачання у випадку використання енергії вітру визначається за формулою:

$$P = \left(1 - \exp \left(-\lambda_2 \left(\frac{Q \cdot C_{inst}}{S - Q \cdot C_{acc} - \bar{E} \cdot C_{inst}} \right) \right) \right) \times \exp \left(-\lambda_1 \left(\frac{Q}{\bar{E}} \right) \right).$$

Визначивши величину ємності системи акумулювання, при якій імовірність безперебійного енергопостачання буде максимальною, з формули (1) визначимо необхідну встановлену потужність енергогенеруючого обладнання, в даному випадку – вітроелектрогенераторів.

```
function f=Opt(11,12,E,S,Ca,Cin)
d=(24*S-E*Cin)/(24*Ca);
Q=[0:0.01:d];
m=(Q*Cin)/(24*(24*S-24*Q*Ca-E*Cin));
r=Q*(E);
F=(1-exp(-11*m)).*(exp(-12*m));
F1=m;
plot(Q,F)
g=max(F)
Q=0;
h=0;
while h<=0
    m=(Q*Cin)/(24*(24*S-24*Q*Ca-E*Cin));
    r=Q*(E);
    F=(1-exp(-11*m)).*(exp(-12*m));
    m1=((Q+0.01)*Cin)/(24*(24*S-24*(Q+0.01)*Ca-E*Cin));
    n1=(Q+0.01)*(E);
    h=F-(1-exp(-11*n1)).*(exp(-12*m1));
    Q=Q+0.01;
end
Q
P=(S-Q*Ca)/Cin
```

Рис. 1. Програми для побудови графіка цільової функції та знаходження координати максимуму цільової функції.

Приклад оптимізації автономної енергосистеми на основі вітроелектрогенераторів. Необхідно побудувати автономну енергосистему для живлення споживачів із середньодобовим енерго-

споживанням $\bar{E} = 10 \text{ кВт} \cdot \text{год}/\text{добу}$ за наявного фінансування $S = 20000 \text{ грн}$. Питома вартість акумуляторів електричної енергії складає: $C_{acc} = 1500 \text{ грн./кВт} \cdot \text{год}$, питома вартість вітроелектрогенераторів – $C_{inst} = 2500 \text{ грн./кВт}$. Параметри законів розподілу за порогової швидкості вітру $v = 5,5 \text{ м/с}$: $\lambda_1 = 0,8$; $\lambda_2 = 0,6$. Для побудови графіка цільової функції та визначення її максимуму в програмному середовищі *MATLAB* були створені програми, текст яких наведено на рис. 1. Графік цільової функції наведено на рис. 2.

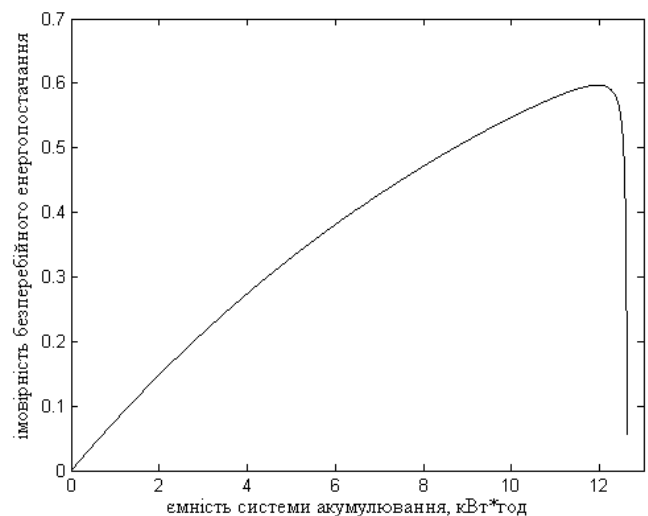


Рис. 2. Цільова функція – залежність імовірності безперебійного енергопостачання від ємності системи акумулювання.

Як видно з графіка, максимально можлива ймовірність безперебійного енергопостачання дорівнює $P = 0,5973$ при ємності системи акумулювання $Q = 11,99 \text{ кВт} \cdot \text{год}$. Відповідно, встановлена потужність вітроелектрогенераторів може бути визначена таким чином:

$$P_{inst} = \frac{S - Q \cdot C_{acc}}{C_{inst}};$$

$$P_{inst} = 0,806 \text{ кВт}.$$

За умови збільшення фінансування удвічі, тобто $S = 40000 \text{ грн}$., максимальна ймовірність безперебійного енергопостачання збільшується до значення $P = 0,8357$ при ємності системи акумулювання $Q = 24,16 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ та встановленої потужності $P_{inst} = 1,504 \text{ кВт}$ (рис. 3).

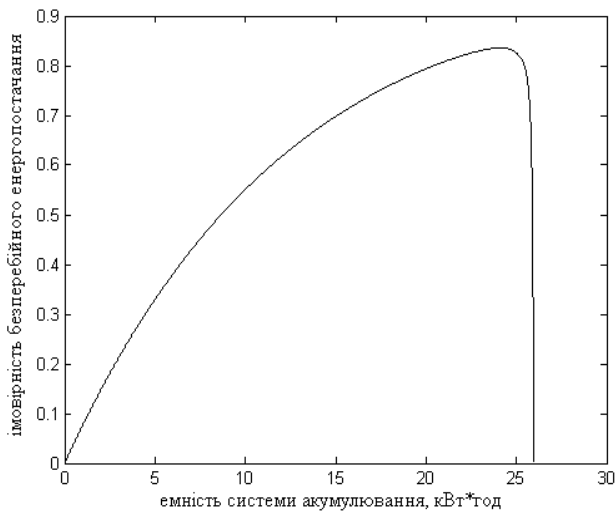


Рис. 3. Цільова функція – залежність ймовірності безперебійного енергопостачання від ємності системи акумуляції за умови збільшення фінансування вдвічі.

Висновки. Запропоновано метод оптимізації автономних енергосистем, які містять систему акумуляції та енергогенеруючі пристрої, що використовують відновлюване джерело енергії одного виду. Метод оптимізації базується на імовірнісних характеристиках енергопотоків. В програмному середовищі *MATLAB* створено програми для визначення оптимальної ємності системи акумуляції та встановленої потужності енергогенеруючого обладнання, за яких забезпечується максимально можлива ймовірність безперебійного енергопостачання споживачів.

1. Кирпатенко І.М., Кухарчук І.О. Імовірнісна методика розрахунку ємності системи акумуляції автономних енергосистем на основі вітроелектрогенераторів // Відновлювана енергетика. – 2011. – №3(26). – С. 20–24.

**ХІ МІЖНАРОДНА СПЕЦІАЛІЗОВАНА ВИСТАВКА
ЕНЕРГЕТИКА В ПРОМИСЛОВОСТІ-2013**

ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА І ЕНЕРГЕТИЧНЕ ОБЛАДНАННЯ • ПРОМИСЛОВА ЕЛЕКТРОТЕХНІКА • СИЛОВА ЕЛЕКТРОНІКА В ЕНЕРГЕТИЦІ
ПРОМИСЛОВЕ ОСВІТЛЕННЯ • АСУ ТП, КОНТРОЛЬНО-ВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ І ДІАГНОСТИКА • КАБЕЛЬ. АРМАТУРА. ДРОТИ

**ХІ МІЖНАРОДНИЙ ФОРУМ
ПАЛИВНО-ЕНЕРГЕТИЧНИЙ КОМПЛЕКС УКРАЇНИ:
СЬОГОДЕННЯ ТА МАЙБУТНЄ**

МІЖНАРОДНИЙ ВИСТАВКОВИЙ ЦЕНТР
Україна, 02660
Київ, Броварський пр-т, 15
М "Лівобережна"
тел./факс: (044) 201-11-57
e-mail: nsilova@iec-expo.com.ua
www.iec-expo.com.ua
www.tech-expo.com.ua

ОРГАНІЗАТОРИ:
Міністерство енергетики
та вугільної промисловості України
Міжнародний виставковий центр

Офіційне видання форуму:

Технічний партнер:

**24-26
вересня**