

УДК 004.942

М.О. Медиковський, д.т.н.
О.Б. Шуневич**БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНИЙ МЕТОД ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ
ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ**

Національний університет "Львівська політехніка", oleh.shunevych@gmail.com

В статті здійснена характеристика основних критеріїв ефективності вітрової електроустановки. Проведений аналіз відомих методів інтегральної оцінки об'єктів. Здійснений аналіз методів визначення вагових коефіцієнтів важливості критеріїв. Удосконалено методику вирішення багатокритеріальної задачі шляхом згорання векторного критерію в скалярну функцію. Як результат роботи, було запропоновано використовувати дану методику для синтезу оптимальної структури вітрової електростанції.

Ключові слова: багатокритеріальний вибір, інтегральна оцінка, вагові коефіцієнти важливості, експертні оцінки, нормалізація шкал, адитивна функція.

Вступ

З необхідністю оцінювання об'єктів, що характеризуються неоднорідними параметрами, дослідники зустрічаються зустрічалась досить часто. Наприклад, порівнюючи навіть досить прості об'єкти, необхідно оцінювати і враховувати велику кількість неоднорідних параметрів (масу, розмір, колір, механічні властивості і ін.). Найчастіше таку оцінку людина робить інтуїтивно і при цьому часто і "грубо" помиляється [1]. Зробити таку оцінку об'єктивно складно. Один із способів вирішення такої багатокритеріальної задачі полягає у врахуванні відносної важливості часткових критеріїв ефективності. Вітрові електроустановки (ВЕУ), до прикладу, володіють декількома критеріями ефективності, які, зазвичай, суперечливі, тобто покращення однієї характеристики зумовлює погіршення іншої.

Метою даної роботи є розроблення аналітичного методу, за допомогою якого можна здійснити інтегральну (сумарну, узагальнюючу) оцінку ефективності використання вітрової електроустановки.

Характеристика основних критеріїв ефективності ВЕУ

Встановлено, що основними критеріями, які ідентифікують (вирізняють) ВЕУ є:

- час T напрацювання кожної установки в годинах (K_1);
- час, який потрібний на увімкнення ВЕУ (K_2);
- технічний стан кожної установки (K_3);
- мінімальна стартова швидкість вітру, на якій допустима робота установки (K_4);
- доступність ВЕУ по розміщенню сонця (чи не падає тінь від лопастей) (K_5);
- участь ВЕУ у виробленні електроенергії (K_6).

Вибір вітроенергетичних установок з врахуванням таких критеріїв сприяє зростанню економічної і технічної ефективності використання як окремої ВЕУ, так і вітрової електростанції в цілому. У результаті ми отримуємо: рівномірне спрацювання елементів вітроенергетичної станції (ВЕС); покращуємо коефіцієнт використання вітрового потоку; сприяємо безумовному виконанню графіка навантаження; зменшуємо ймовірність аварійних режимів ВЕС; зменшуємо ризик негативного впливу на здоров'я жителів і обслуговуючого персоналу та суміжних районів ВЕС і ін.

Математичний опис вітроенергетичних установок парку при наявності багатьох критеріїв складається з трьох елементів: множина ВЕУ V , векторний критерій K і відношення переваг і байдужості, які будуть позначатися відповідно літерами P і I . Кожний елемент v із множини всіх варіантів V характеризується значеннями критеріїв K_i , $i = 1, \dots, m$, які називаються частковими і, будучи записані за порядком, складають векторний критерій $K = (K_1, \dots, K_m)$. Під критерієм K_i розуміємо функцію, яка визначена на V і яка приймає значення із множини X_i , що називається шкалою, а також множиною оцінок, градацією цього критерію. В загальному випадку шкала може мати будь-яку природу: оцінки можуть бути числовими,

словесними, символічними і т.д. Важливо лише те, що ці оцінки впорядковані по уподобанні.

Область допустимих значень кожного критерію характеризується як $a_i \leq K_i \leq b_i$, де a_i, b_i - фіксовані значення i -го критерію, що визначає область доступних значень, які, в свою чергу, залежать від експлуатаційних, технологічних, фізичних характеристик [2].

Таким чином, кожний варіант ν характеризується m оцінками за критеріями (тобто значеннями цих критеріїв) $K_1(\nu), \dots, K_m(\nu)$. Ці числа складають вектор $(K_1(\nu), \dots, K_m(\nu))$, який називається векторною оцінкою варіанту:

$$K(\nu) = (K_1(\nu), \dots, K_m(\nu)) \quad (1)$$

Порівняння варіантів за перевагами зводиться до співставлення їх векторних оцінок. Множину всіх векторних оцінок позначимо через X .

Переходячи від теорії до поточної задачі, необхідно відзначити, що в ролі варіантів виступають окремі вітроенергетичні установки ν^1 -ВЕУ 1 і т.д., тому $V = \{\nu^1, \dots, \nu^m\}$. У нашому випадку критеріїв всього шість ($m = 6$). Вихідна шкала у всіх критеріїв не є однаковою. Слід зауважити, що число різних векторів може бути меншим аніж кількість варіантів (ВЕУ). Адже дві ВЕУ можуть мати одну векторну оцінку (коли всі критерії є ідентичні).

Аналіз існуючих методів розв'язання задачі

Для спрощеного порівняння об'єктів, що характеризуються різними частковими критеріями ефективності, використовують кількісні оцінки. При цьому кожній якісній оцінці критерію присвоюється певний бал. Після цього об'єкти можуть оцінюватися за допомогою чисельних методів. Якщо об'єкт характеризується великою кількістю часткових критеріїв, використовують узагальнені (інтегральні, глобальні, комплексні, агреговані, синтетичні) оцінки. Як правило, в якості інтегральної оцінки використовується арифметична сума оцінок часткових критеріїв:

$$K_{\Sigma} = K_1 + K_2 + \dots + K_m \quad (2)$$

де K_{Σ} - інтегральна оцінка об'єкту, K_i - оцінка i -того критерію.

Не дивлячись на простоту і зрозумілість, цьому методу притаманний цілий ряд серйозних недоліків, що суттєво обмежує можливість отримання за його допомогою обґрунтованих рекомендацій щодо вибору оптимальних варіантів складних і відповідальних рішень.

Однією із проблем інтегральних оцінок є необхідність врахувати неодинакову важливість часткових критеріїв. Однак чітких визначень цьому поняттю розробники методів розв'язання багатокритеріальних задач не давали, обмежуючись інтуїтивними уявленнями про нього. Багаторічні дослідження цієї проблеми завершилися успіхом. Спочатку були сформовані визначення понять "один критерій важливіший за інший" і "критерії рівноважливі" (тобто мають однакову важливість) і розвинута теорія "якісної важливості". А потім на основі цієї теорії вдалось запропонувати визначення поняття "один критерій важливіший від іншого в стільки разів" і розробити теорію "кількісної важливості" [3].

Як правило, цю проблему вирішують методом введення вагових коефіцієнтів важливості критеріїв. Кожному критерію певним чином присвоюється ваговий коефіцієнт важливості, що відображає важливість цього критерію в конкретній ситуації. Тоді залежність (2) для підрахунку інтегральної оцінки приймає вигляд:

$$K_{\Sigma} = \alpha_1 K_1 + \alpha_2 K_2 + \dots + \alpha_m K_m \quad (3)$$

де α_i - коефіцієнт важливості i -того критерію [4]. Їх величина характеризує (відносну або порівняльну) важливість критеріїв: чим важливіший критерій K_i (відносно інших, або в порівнянні з іншими), тим більший відповідний йому коефіцієнт α_i , що забезпечує великий "вклад" цього критерію в загальну суму, або, іншими словами, більший його вплив на K_{Σ} і, тим самим, на кінцевий результат.

Якщо критерії вважаються однаково важливими, то тоді присвоюють кожному критерію значення вагових коефіцієнтів важливості $\alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_m = 1/m$.

Область допустимих значень D_{α} вагових коефіцієнтів важливості визначається за такою

залежністю [2]:

$$D_{\alpha} = \{\alpha \mid \alpha_i \geq \alpha_1 \geq 0, i = \overline{1, m}; \sum_{i=1}^m \alpha_i = R; \alpha_i \geq \xi_l \alpha_j, \xi_l \geq 1\} \quad (4)$$

В деяких випадках застосовується множення оцінок часткових критеріїв:

$$K_{\Pi} = K_1 \cdot K_2 \cdot \dots \cdot K_m \quad (5)$$

Окрім арифметичного сумування або множення оцінок часткових критеріїв, можуть використовуватися інші способи визначення узагальнених оцінок, наприклад, сумування квадратів оцінок часткових критеріїв:

$$K_{\Sigma v} = \sqrt{(\alpha_1 K_1)^2 + (\alpha_2 K_2)^2 + \dots + (\alpha_m K_m)^2} \quad (6)$$

Слід відмітити, що при порівнянні складних об'єктів, інтегральні оцінки яких розраховуються різними способами, ранжування може давати різні результати. Наприклад, при порівнянні складних об'єктів T1 і T2 (див. табл. 1) оцінки критеріїв змінюються від 1 до 5, а оцінки коефіцієнтів вагомості від 1 до 3. Бали підібрані так, щоб інтегральні оцінки, розраховані за залежністю (3) співпадали. Результати розрахунку інтегральних оцінок зведені в таблицю 1.

Таблиця 1

Порівняння інтегральних оцінок

Об'єкти	α_1	α_2	α_3	α_4	K_1	K_2	K_3	K_4	K_{Σ}	K_{Π}	$K_{\Sigma v}$
T1	1	1	1	3	1	5	5	3	20	75	11,49
T2	1	1	1	3	4	5	5	2	20	200	10,1

Як бачимо з результатів, поданих в таблиці 1, при використанні залежності (3) у T1 і T2 ранг однаковий (20=20). А при використанні залежностей (5) і (6) ранг у T1, відповідно менший (75<200) і більший (11,49>10,1) аніж у T2. У зв'язку з цим виникає питання про те, яке ранжування є правильним.

Якщо інтегральна оцінка розраховується за залежністю (3), то її абсолютна і відносна похибка розраховується відповідно за залежностями (7) і (8):

$$\overline{\Delta K_{\Sigma}} = \sum_{i=1}^m K_i \overline{\Delta \alpha_i} + \sum_{i=1}^m \alpha_i \overline{\Delta K_i} \quad (7)$$

$$\overline{\delta K_{\Sigma}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^m \alpha_i K_i} \left(\sum_{i=1}^m \alpha_i K_i \overline{\delta(\alpha_i)} + \sum_{i=1}^m \alpha_i K_i \overline{\delta(K_i)} \right) \quad (8)$$

де $\overline{\Delta}$ і $\overline{\delta}$ - верхня границя абсолютної і відносної похибок відповідної величини.

Методи визначення вагових коефіцієнтів важливості критеріїв

Як було зазначено, вагові коефіцієнти важливості критеріїв можуть бути якісними і кількісними. Якісними оцінками важливості є судження виду “один критерій важливіший іншого” і “обидва критерії рівноважливі”. Кількісними оцінками важливості є судження виду “один критерій важливіший від іншого в стільки-то разів”.

Однорідні критерії. Порівняння критеріїв за важливістю, тобто з'ясування, чи є один із них важливішим, аніж інший, або ж вони однакові по важливості, припускає, що критерії є однорідні, тобто мають зіставний вигляд. Це означає, що у критеріїв повинна бути єдина (спільна) шкала. Більше того, повинна виконуватися наступна умова однорідності: кожна градація шкали повинна відзеркалювати однаковий рівень переваг для кожного із критеріїв. Ця умова виконується, наприклад, в тому випадку, коли градації є вербальними (словесними), причому мають смисл, який є однаковий для всіх критеріїв. Зазвичай градації номерують в порядку зростання важливості.

Неоднорідні критерії. На практиці часто зустрічаються задачі, в яких критерії є неоднорідними, наприклад, виражають потужність (в кіловатах), масу (в кілограмах), дизайн (в балах).

Тому для побудови загального критерію K_{Σ} усі критерії спочатку потрібно перетворити – привести до співставного (зазвичай безрозмірного) вигляду, або, як говорять, нормалізувати. Дуже часто нормалізацію здійснюють шляхом ділення вихідного (додаткового) критерію K_i на його максимальне значення K_i^+ . При цьому фактично вважається, що переваги рівномірно зростають (причому від нуля до K_i^+). Необхідно відразу застережити, що “проста нормалізація” містить в собі небезпеку отримання невірних рекомендацій. Тому постає проблема підбору (і обґрунтування) залежностей перетворення для здійснення нормалізації вихідних неоднорідних критеріїв.

Для приведення всіх критеріїв до одного типу на інтервалі $[\alpha, \beta]$ використовують лінійне перетворення. Для цього перетворення повинна здійснюватися умова $0 \leq \alpha < \beta$. Значення перетвореного критерію \overline{K}_i на даному інтервалі визначають за наступним співвідношенням:

$$\overline{K}_i = \frac{K_i - K_i^-}{K_i^+ - K_i^-}(\beta - \alpha) + \alpha \quad (9)$$

$$K_i^+ = \max K_i; K_i^- = \min K_i; K_i^+ \neq K_i^-, i = \overline{1, m}$$

В даній моделі коефіцієнт $a_i = (\beta - \alpha) / (K_i^+ - K_i^-)$ характеризує шкалу (визначає одиницю кроку, також часто вживають термін “ціна кроку”), коефіцієнт $b_i = (\alpha K_i^+ - \beta K_i^-) / (K_i^+ - K_i^-)$ дозволяє перетворити часткові критерії до загального початку відліку і до однакового інтервалу вимірювання.

У [5] пропонується спосіб визначення вагових коефіцієнтів важливості шляхом порівняння двох векторних оцінок, у яких відрізняються лише два критерії за значеннями. Суть такого методу полягає у зміні значення одного з критеріїв до тих пір, поки не настане момент рівнозначності у виборі між цими варіантами. В результаті визначаємо числовий коефіцієнт, який буде відображати відношення одного вагового коефіцієнта важливості до іншого. Таким чином ми можемо визначити відношення між іншими ваговими коефіцієнтами важливості.

Інший метод визначення вагових коефіцієнтів важливості використовує графи. Якісна інформація може бути представлена у вигляді орієнтованого графа $G(I, \Omega)$, де I - множина вершин, що відповідає частковим критеріям, I - множина ребер, що з'єднують i -ту вершину і j -ту тоді і тільки тоді, коли виконується відношення $K_i > K_j$.

Метод впорядкування критеріїв по важливості передбачає ранжування критеріїв в порядку їх значимості. Допустимо, наприклад, ЛПР вважає, що $K_2 > K_1 > K_4 > K_3$. Звідси відповідно і $\alpha_2 > \alpha_1 > \alpha_4 > \alpha_3$. Після цього слід зробити більш тонкіші порівняння, наприклад порівняти K_2 і $K_{1,3,4}$. Якщо в цій парі K_2 є більше переважаючим, то ми могли б зробити висновок, що $\alpha_2 > 0,5$ [5].

Метод розв'язання задачі

Допустимо, що ефективність ВЕУ характеризується такими критеріями (таблиця 2):

Таблиця 2

Критерії ефективності ВЕУ

Найменування критерію	Тип	Розмірність
1. Час напрацювання ВЕУ (K1)	MIN	Години
2. Час на увімкнення ВЕУ (K2)	MIN	Секунди
3. Технічний стан ВЕУ (K3)	MAX	Бали
4. Мінімальна стартова швидкість вітру, на якій допустима робота ВЕУ (K4)	MAX	М/С
5. Доступність ВЕУ за положенням сонця (K5)	MAX	1-так; 0-ні
6. Залученість ВЕУ до вироблення електроенергії (K6)	MAX	1-так; 0-ні

Критерій №1 має кількісний характер, власне його будемо прагнути мінімізувати, тобто

обрати ВЕУ з найменшим часом напрацювання (такий крок робимо для синхронного зношування елементів ВЕС). Критерій №2 має також кількісний характер, що відображає час, який необхідний для увімкнення ВЕУ. Будемо обирати таку ВЕУ, для якої цей час є мінімальним. Критерій №3 має якісний характер (лінгвістична змінна) і його значення будемо інтерпретувати в бали. Один із можливих варіантів бальної оцінки поданий в таблиці 3.

Таблиця 3

Бальна оцінка технічного стану ВЕУ	
Технічний стан ВЕУ	Бальна оцінка
Незадовільний	0
Задовільний	1
Добрий	2
Відмінний	3

Даний критерій необхідно максимізувати. Критерій №4 має кількісний характер. Числове значення цього критерію визначається шляхом віднімання поточної швидкості вітру від стартової швидкості вітру. Чим більший “запас” швидкості – тим бажаніша ВЕУ буде. Критерій №5 загалом є якісним, але може бути перетворений в кількісний. Бажана та ВЕУ, що є доступна за положенням сонця. Критерій №6 має також якісну характеристику, але його також слід перетворити в кількісний.

Отже, перший і другий критерії мають тип опрацювання-мінімізація, всі інші максимізація.

Розглянемо приклад, у якому сім ВЕУ мають оцінки за критеріями, що вказані в таблиці 4.

Таблиця 4

Часткові критерії	Оцінки ВЕУ за критеріями						
	Вихідні оцінки варіантів ВЕУ по критеріях						
	1	2	3	4	5	6	7
K1	6912	5784	14712	13584	8208	17352	7753
K2	270	270	210	210	160	210	160
K3	3	2	2	3	1	2	2
K4	4	4	5	5	5,5	5	5,5
K5	1	1	1	1	1	0	1
K6	1	1	0	1	0	1	1

Після приведення всіх критеріїв до одного типу опрацювання (мінімізації) шляхом обертання шкал і до інтервалу [1,2] (залежність 9), отримуємо нормалізовані безрозмірні оцінки, які відображені в таблиці 5.

Таблиця 5

Часткові критерії	Нормалізація шкал						
	Нормалізовані оцінки по критеріям						
	1	2	3	4	5	6	7
K1	1,0975	1	1,7718	1,6743	1,2095	2	1,1702
K2	2	2	1,4545	1,4545	1	1,4545	1
K3	1	1,5	1,5	1	2	1,5	1,5
K4	2	2	1,3333	1,3333	1	1,3333	1
K5	1	1	1	1	1	2	1
K6	1	1	2	1	2	1	1

Визначення вагових коефіцієнтів важливості ВЕУ. За допомогою заданих експертних даних встановлено такі якісні важливості критеріїв: $K4=K6>K1=K3>K2=K5$. $K4=K6$ означає, що дані критерії мають однакову важливість, тобто вони однакові за перевагою. $K3>K5$ означає, що критерій K3 важливіший від K5.

Прийmemo, що область допустимих значень $R=1$ (за залежністю 4). Критерію K5 призначимо найменший бал з десятибальної шкали, і за ступенем якісної важливості будемо збільшувати значення наступних критеріїв на одиницю. В результаті отримаємо такий набір вагових коефіцієнтів важливості: $K4=K6=3>K1=K3=2>K2=K5=1$. Оскільки $R=1$, то всі коефіцієнти нормовано до відповідного вигляду (таблиця 6).

Таблиця 6

Вагові коефіцієнти важливості

Часткові критерії	Бал	Коефіцієнт
1. Час напрацювання ВЕУ (К1)	2	0,166
2. Час на увімкнення ВЕУ (К2)	1	0,083
3. Технічний стан ВЕУ (К3)	2	0,166
4. Мінімальна стартова швидкість вітру, на якій допустима робота ВЕУ (К4)	3	0,25
5. Доступність ВЕУ по положенні сонця (К5)	1	0,083
6. Залученість ВЕУ у виробленні електроенергії (К6)	3	0,25

Визначення інтегральної оцінки. Використавши адитивний метод для визначення інтегральної оцінки ВЕУ, отримуємо результати, які подані в таблиці 7.

Таблиця 7

Вагові коефіцієнти важливості

Варіанти	Значення інтегральної оцінки
1	1,347185
2	1,414
3	1,5801
4	1,2309
5	1,4487
6	1,4570
7	1,1092

Аналіз отриманих результатів показує, що оптимальним варіантом в цьому випадку є варіант №7.

Висновки

Здійснений системний аналіз методів багатокритеріальної оптимізації забезпечив можливість виокремити, як найбільш придатні до застосування при розв'язанні задач оптимізації у вітровій енергетиці. На підставі чого удосконалено методику вирішення багатокритеріальної задачі шляхом згортання векторного критерію в скалярну функцію. Необхідно відзначити, що він є відкритим і може бути використаний при різних числах та видах критеріїв.

Отримані з використанням розробленого методу алгоритм застосування та практичні результати у вигляді скалярних функцій інтегрального оцінювання дають можливість реалізувати задачу автоматизації синтезу оптимальної структури вітрової електростанції.

Список літературних джерел

1. Безрук В. М. Векторна оптимізація та статистичне моделювання в автоматизованому проектуванні систем зв'язку / В. М. Безрук. – Харків: ХНУРЕ, 2002. – 164 с.
2. Батищев Д. И. Многокритериальный выбор с учетом индивидуальных предпочтений / Д. И. Батищев, Е. Д. Шапошников. – ИПФ РАН, Нижний Новгород, 1994. – 92 с.
3. Подиновский В. В. Введение в теорию важности критериев в многокритериальных задачах принятия решений / В. В. Подиновский. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 64 с. – ISBN 978-5-9221-0743-3.
4. Минакер В. Е. Проблемы интегральных оценок технических систем / В. Е. Минакер, М. В. Быховский // ТРИЗ-Саммит-2006: Санкт-Петербург, 13-14 октября 2006 года.
5. Кини Р. Л. Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения / Р. Л. Кини, Х. Райфа: Пер. с англ./Под ред. И. Ф. Шахнова. – М.: Радио и связь, 1981. – 560 с.