УДК 621.311 DOI: https://doi.org/10.15407/techned2019.01.055

КОМБІНОВАНИЙ СТОХАСТИЧНИЙ МЕТОД. ПОРІВНЯННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ, ОТРИМАНИХ РІЗНИМИ МЕТОДАМИ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОГО РАНЖУВАННЯ РОЗВ'ЯЗКІВ

Л.М. Лук'яненко*, канд.техн.наук, **І.С. Гончаренко****, канд.техн.наук
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна. **E-mail: okjraa@gmail.com**

Для розв'язання задачі визначення оптимальних потужностей, типів та місць приєднання розосереджених джерел енергії (РДЕ) до електричної мережі (ЕМ) розроблено комбінований стохастичний метод [5], у якому при багатокритеріальній оптимізації компоненти цільової функції стандартизовано та збалансовано ваговими коефіцієнтами. Визначення останніх виконується експертним методом. Однак такий підхід не обґрунтований. Тому метою цієї статті є встановити, чи визначені експертним методом значення вагових коефіцієнтів відповідають постановці задачі, згідно з якою особливості ЕМ та РДЕ повинні мати однаковий вплив на оцінку розв'язку задачі. Для досягнення мети оптимальний розв'язок задачі визначено методами TOPSIS, VIKOR та VIKOR-ядро. Вагові коефіцієнти для цих методів визначено методом ваги ентропії інформації. Проведене порівняння отриманих результатів з відомими показало, що вони між собою практично збігаються, а це підтверджує правильність визначених експертним методом значень вагових коефіцієнтів. Бібл. 9, рис. 1, табл. 5.
Ключові слова: відновлювані джерела енергії, розосереджені джерела енергії, комбінований стохастичний метод, багатокритеріальна оптимізація, TOPSIS, VIKOR, VIKOR-ядро.

Вступ. Прийняття будь-якого рішення у своїй суті є оптимізаційною задачею, часто – багатокритеріальною. Розв'язання таких задач полягає у визначенні оптимально допустимого розв'язку згідно з обраними критеріями та обмеженнями. Однак ці критерії зазвичай суперечать одне одному, і може статися так, що не існуватиме єдиного розв'язку, який був би оптимальним за усіма критеріями одночасно [1].

В оптимізаційних задачах для порівняння різних розв'язків розробляються адитивні та/або мультиплікативні цільові функції (ЦФ), компоненти яких збалансовані ваговими коефіцієнтами. Якщо компоненти ЦФ мають різну розмірність, то їх необхідно нормувати або стандартизувати [2]. Однак виникають проблеми розробки адекватної ЦФ та визначення вагових коефіцієнтів. І якщо перша проблема зазвичай не викликає особливих труднощів, то вирішення останньої є наріжним каменем багатокритеріальної оптимізаційної задачі. Таким чином, певні значення вагових коефіцієнтів мають бути обґрунтовані особою, яка розробила ЦФ або яка використовує її.

Серед багатокритеріальних оптимізаційних задач не є винятком і задача оптимального приєднання розосереджених джерел енергії (РДЕ), яку необхідно розв'язувати при впровадженні РДЕ в електричні мережі (ЕМ). Під задачею оптимального приєднання мають на увазі задачу визначення оптимальних потужностей, типів та місць приєднання РДЕ до ЕМ, а під РДЕ у цій роботі слід розуміти сонячні (СЕС) та вітряні (ВЕС) електростанції, оскільки вони є найпоширенішими серед усього різноманіття РДЕ. В Україні такі джерела займають поки що незначну частку у структурі генерування, однак обсяги їх впровадження постійно зростають [3]. Збільшення частки таких джерел у виробництві електроенергії обумовлено суттєвими їхніми перевагами над традиційними електростанціями. Насамперед для будівництва РДЕ необхідні значно менші капіталовкладення, а вироблена ними електроенергія є екологічно чистою. Неоптимальне впровадження таких джерел може призвести до виникнення низки проблем та погіршення техніко-економічних показників роботи мережі [4].

Для розв'язання цієї задачі у роботі [5] було розроблено комбінований стохастичний метод (КСМ), оптимальний розв'язок за допомогою якого визначається так. Спочатку виконується обробка параметрів моделі електричної мережі (етап 1), у результаті відкидаються вузли мережі та певні значення потужності РДЕ, які можуть призвести до виникнення очевидно неефективних варіантів приєднання РДЕ до мережі. Далі ітераційно створюється множина розв'язків (етап 2) та за значенням ЦФ (1) визначається оптимальний з множини розв'язок (етап 3). Еволюційними алгоритмами крок за кроком зменшується перелік вузлів, до яких можуть бути приєднані РДЕ, та уточнюються діапазони можливої потужності джерел, з яких формується множина розв'язків. Завершення розрахунків відбувається, коли оптимальний розв'язок задачі не змінюється протягом двох ітерацій.

© Лук'яненко Л.М., Гончаренко І.С., 2019
ORCID ID: *https://orcid.org/0000-0003-1749-5209, **https://orcid.org/0000-0002-9022-6083

При визначенні оптимального розв'язку (етап 3) різні розв'язки задачі оцінюються ЦФ $W^{(ID)}$, компоненти якої стандартизовані та збалансовані відповідними ваговими коефіцієнтами

$$W^{(ID)} = \left(\alpha_1 \cdot Z_1^{(ID)} + \alpha_2 \cdot Z_2^{(ID)}\right) \cdot D^{(ID)} \to \max, \quad (1)$$

де (*ID*) – номер варіанта (ідентифікатор розв'язку задачі) оптимального приєднання РДЕ, у якому закодовано $N^{(ID)}$ кількість джерел відповідного типу та потужності приєднаних до певних вузлів мережі; Z_1 – стандартизований компонент ЦФ, який дає змогу врахувати особливості мережі; Z_2 – стандартизований компонент ЦФ, який дає змогу врахувати особливості РДЕ; α_1, α_2 – вагові коефіцієнти відповідних компонентів ЦФ; D – штрафна функція, що дає змогу врахувати порушення режимних обмежень.

Перевагою стандартизування над нормуванням є нечутливість до викидів – окремих значень, що суттєво відрізняються від переважної більшості у множині значень. Якщо множина значень містить викид, то решта значень множини після нормування будуть знаходитися у невеликому діапазоні.

Цільова функція має два врівноважених ваговими коефіцієнтами компонента згідно з постановкою задачі [5], що дає змогу збалансовано для обох сторін врахувати інтереси системного оператора (компонент Z_1), який керує та/або володіє мережею, та інвестора (компонент Z_2), який робить капіталовкладення у спорудження електростанції на базі РДЕ. У компоненті Z_1 враховано зміну вартості втрат електроенергії у мережі від роботи встановлюваних РДЕ. У компоненті Z_2 враховано вартість спорудження, обслуговування та приєднання джерел певної потужності та певних типів до певних вузлів мережі, а також вартість виробленої джерелами електроенергії. Компоненти Z_1 та Z_2 цільової функції стандартизовано, оскільки вони мають різну розмірність. Детальніше про стандартизування компонентів ЦФ та її вагові коефіцієнти йдеться у [5].

Існує три основних підходи до розв'язання задачі, кожен з яких має власні вагові коефіцієнти. Підхід 1 враховує лише інтереси системного оператора. Підхід 2 враховує лише інтереси інвестора. Підхід 3 – компромісний варіант, коли враховано інтереси як мережі, так і інвестора. Останній є найскладнішим з точки зору визначення вагових коефіцієнтів, які запропоновано визначати експертним методом. Однак такий підхід необґрунтований.

Тому **мета цієї статті –** встановити, чи визначені експертним методом значення вагових коефіцієнтів відповідають постановці задачі оптимального приєднання розосереджених джерел енергії, згідно з якою особливості електричної мережі та розосереджених джерел енергії повинні мати однаковий вплив на оцінку розв'язку задачі.

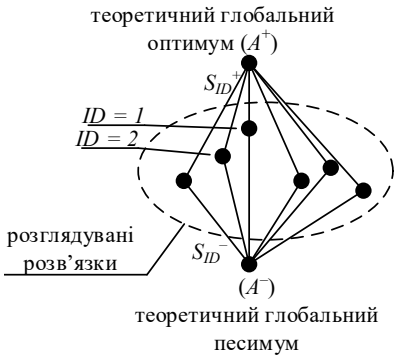
Методи багатокритеріального ранжування. Для порівняння розв'язків багатокритеріальних задач існують методи багатокритеріального ранжування. З одного боку такі методи так чи інакше знімають відповідальність з особи, яка приймає рішення, а з іншого – уніфікують процес визначення оптимального розв'язку різних задач і таким чином дають змогу пояснити, чому те чи інше рішення прийнято.

Поширеними методами, що можуть бути використані для багатокритеріального ранжування, є TOPSIS та VIKOR. Ці методи визначають оптимальний розв'язок задачі з врахуванням відстані до теоретичного глобального оптимуму [6]. Детальне порівняння методу VIKOR з методом TOPSIS та деякими іншими наведено у дослідженні [1]. Модифікацію методу VIKOR, суть якої полягає у формуванні ядра – множини перспективних для аналізу розв'язків (альтернатив), представлено у [7]. Використовувати разом декілька методів багатокритеріального ранжування пропонується у роботі [6].

Метод TOPSIS [8] засновано на ідеї, що оптимальний розв'язок повинен мати найкоротшу відстань S_{ID}^{+} до теоретичного глобального оптимуму A^{+} та найдовшу відстань S_{ID}^{-} до теоретичного глобального песимуму A^{-} (песимум – це поняття, протилежне за значенням до оптимуму). Теоретичними глобальними оптимумом та песимумом позначаються розв'язки, які є відповідно кращим та гіршим у порівнянні з усіма іншими розв'язками. У [8] припускається, що коли кожен критерій монотонно зростає чи спадає, тоді легко визначити теоретичний глобальний оптимум. Такий розв'язок містить у собі найкращі досяжні значення критеріїв, тоді як теоретичний глобальний песимум має найгірші досяжні значення критеріїв. Однак варто зазначити, що такі розв'язки з різних причин можуть не бути представленими серед запропонованих для порівняння і відповідно вони не є оптимальним та найгіршим розв'язками, а є лише орієнтирами (див. рисунок). Критерієм оптимальності є максимум відносного наближення *RC* до теоретичних глобальних оптимуму та песимуму.

Метод VIKOR [1, 6] визначає оптимальним той розв'язок, який є найближчим до теоретичного глобального оптимуму. На відміну від попереднього методу у цьому не враховується відстань до теоретичного глобального песимуму. Метод VIKOR має декілька критеріїв оптимальності, основним з яких є мінімум показника *Q*.

Метод VIKOR-ядро розроблено, аби усунути деякі недоліки методу VIKOR. Дослідники [7] вважають неприпустимою залежність кінцевих результатів від кількості альтернатив у вихідному наборі даних. Іншим проблемним аспектом вони вважають відсутність наочності у змістовному трактуванні узагальненого показника *Q*, тоді як часткові показники *S* та *R* [1, 6] характеризують відстань *ID*-го розв'язку до теоретичного глобального оптимуму. Тому автори запропонували модифікацію методу, яка спрямована не на впорядкування розв'язків, а на зменшення їхньої кількості, тобто на формування ядра, що буде містити розв'язки, які є найперспективнішими для подальшого аналізу.



Перші два кроки алгоритму у методі VIKOR-ядро повторюють алгоритм базового методу VIKOR, який описано у [1, 6]. На третьому кроці здійснюють попарне порівняння розв'язків (*A* та *B*) відповідно до правил, наведених у табл. 1. Це порівняння по суті є знаходженням меншої з двох змінних min{*A*, *B*}. При цьому кожна така змінна має по два значення – *S* та *R*. Розв'язки, визнані гіршими, одразу виключаються з подальшого розгляду. Після розгляду всіх пар альтернатив сформується ядро, яке буде містити або один (оптимальний) розв'язок, або декілька непорівнянних альтернатив. Таким чином, метод VIKOR-ядро здійснює бінарне ранжування розв'язків, у результаті якого отримують лише найкращі та найгірші розв'язки.

Таблиця 1

Умови		Належність до ядра
$S_A > S_B$	$R_A < R_B$	$A + B$
	$R_A \geq R_B$	B
$S_A = S_B$	$R_A > R_B$	B
	$R_A = R_B$	$A + B$
	$R_A < R_B$	A
$S_A < S_B$	$R_A > R_B$	$A + B$
	$R_A \leq R_B$	A

Як бачимо, наведені методи дають змогу досліднику не розробляти ЦФ, але все одно залишається необхідність задавати вагові коефіцієнти. Тому у [8] пропонується використовувати метод ваги ентропії інформації для визначення вагових коефіцієнтів. З урахуванням наведеного доцільним є дещо розширити рамки дослідження та додатково проаналізувати використання ентропії для визначення вагових коефіцієнтів цільової функції КСМ, компоненти якої нормовано, а не стандартизовано.

Результати розрахунково-модельних випробувань. Комбінованим стохастичним методом проведено шість дослідів, у кожному з яких на етапі 3 багатокритеріальне ранжування виконано іншим методом.

Дослід 1. Визначення оптимального розв'язку задачі описаним у роботі [5] КСМ без жодних змін. Базовий дослід.

Дослід 2. На етапі 3 КСМ замість ЦФ (1) оптимальний розв'язок задачі визначено ЦФ виду (2). Для визначення вагових коефіцієнтів використано ентропію

$$W^{(i)} = \left(\alpha_1 \cdot C_1^{(i)\prime} + \alpha_2 \cdot C_2^{(i)\prime}\right) \cdot D^{(i)} \to \max, \tag{2}$$

де C_1' – нормований компонент ЦФ, який дає змогу врахувати особливості мережі; C_2' – нормований компонент ЦФ, який дає змогу врахувати особливості РДЕ.

Дослід 3. Так само як у досліді 2, але оптимальним розв'язком задачі визначено ЦФ виду

$$W^{(i)} = \alpha_1 \cdot C_1^{(i)\prime} + \alpha_2 \cdot C_2^{(i)\prime} + \alpha_3 \cdot D^{(i)\prime} \to \max, \tag{3}$$

де D' – нормована штрафна функція.

Дослід 4. На етапі 3 КСМ ранжування розв'язків задачі виконано методом TOPSIS. Для визначення вагових коефіцієнтів використано ентропію.

Дослід 5. Так само як у досліді 4, але методом VIKOR.

Дослід 6. Так само як у досліді 4, але методом VIKOR-ядро.

Розрахунки виконувалися на відомих дослідних 14- та 57-шинній електричних мережах IEEE, схеми яких наведено у [9].

Найкращі розв'язки задачі оптимального приєднання двох РДЕ до 14-шинної мережі IEEE, які отримано у досліді 1 (виділено **жирним**) та у дослідах 2-6 (решта всіх розв'язків), наведено у табл. 2, де:

- стовпець *ID* – номер розв'язку задачі, який є унікальним для кожного варіанта приєднання РДЕ до мережі;
- стовпець N_1 – порядкові номери (позиції) розв'язків у послідовності, що впорядкована за спаданням значення ЦФ (1) (дослід 1, КСМ), вагові коефіцієнти α_1 та α_2 якої дорівнюють 0,31 та 0,69 відповідно (підхід 3 до розв'язання задачі);

- стовпець N_2 – порядкові номери розв'язків у послідовності, що впорядкована за спаданням значення ЦФ (2) (дослід 2), вагові коефіцієнти α_1 та α_2 якої дорівнюють 0,5 та 0,5 згідно з розрахунками з використанням ентропії;
- стовпець N_3 – порядкові номери розв'язків у послідовності, що впорядкована за спаданням значення ЦФ (3) (дослід 3);
- стовпці N_4 та N_5 – номери розв'язків, що впорядковані за спаданням значення показника *RC* (дослід 4, метод TOPSIS) та зростанням значення показника *Q* (дослід 5, метод VIKOR) відповідно;
- у крайньому правому стовпці вказано у якому досліді той чи інший розв'язок увійшов до найкращих.

У дослідах 3–6 вагові коефіцієнти α_1, α_2 та α_3 дорівнюють 0,33, 0,33 та 0,33 згідно з розрахунками з використанням ентропії.

Типи РДЕ у табл. 2 не вказано, оскільки у всіх представлених варіантах приєднання РДЕ найкращим типом є ВЕС. Послідовність розв'язків за дослідом 6 у табл. 2 не представлена, оскільки метод VIKOR-ядро дає змогу отримати лише непорівнянні між собою альтернативи, *ID* яких такі: 6472, 13272, 13312, 13352, 13356, 13392, 13428, 16072, 16112, 16152.

Таблиця 2

Характеристика розв'язку												
ID	N_1	Вузол приєднання та (потужність, МВт) РДЕ	*W*	N_2	$W \times 10^{-1}$	N_3	$W \times 10^{-1}$	N_4	$RC \times 10^{-1}$	N_5	$Q \times 10^{-3}$	Входить до найкращих у досліді
13392	**1**	**13 (32)**	**4 (216)**	**1,4021**	3	9,742	3	9,828	1	9,7603	11	4,87	1, 4, 6
13352	2	13 (25,6)	4 (216)	1,4001	6	9,737	6	9,825	2	9,7595	8	4,46	6
13428	3	13 (38,4)	4 (189)	1,3999	1	9,746	1	9,830	17	9,729	52	9,12	2, 3, 6
13312	7	13 (19,2)	4 (189)	1,3937	10	9,723	10	9,815	4	9,749	3	4,31	6
16192	**10**	**14 (21,5)**	**4 (216)**	**1,3910**	12	9,718	12	9,812	6	9,745	12	4,91	1, 2, 3, 4
6552	**12**	**11 (25,2)**	**4 (216)**	**1,3897**	16	9,716	16	9,811	8	9,743	19	5,49	1, 4
16152	15	14 (17,2)	4 (216)	1,3888	19	9,712	19	9,808	10	9,739	9	4,52	6
6628	16	11 (37,8)	4 (189)	1,3868	11	9,719	11	9,813	24	9,725	77	10,45	2, 3
16112	23	14 (12,9)	4 (216)	1,3833	29	9,700	29	9,800	28	9,723	4	4,36	5, 6
13272	24	13 (12,8)	4 (216)	1,3827	31	9,699	31	9,799	30	9,722	7	4,41	6
6472	33	11 (12,6)	4 (216)	1,3773	39	9,688	39	9,792	40	9,7086	13	4,93	5, 6
13356	36	13 (25,6)	4 (243)	1,3749	48	9,680	48	9,786	64	9,686	1	3,41	5, 6
16072	37	14 (8,6)	4 (216)	1,3747	45	9,6813	45	9,7875	55	9,695	6	4,40	6
10152	**39**	**12 (15,6)**	**4 (216)**	**1,3734**	46	9,6811	46	9,7874	46	9,703	24	5,85	1, 2, 3, 4
2588	**48**	**10 (40)**	**4 (189)**	**1,3691**	42	9,685	42	9,790	39	9,7087	106	12,36	1, 2, 3, 4
10072	57	12 (7,8)	4 (216)	1,3670	66	9,666	66	9,777	86	9,673	15	5,02	5
2432	85	10 (8)	4 (216)	1,3584	96	9,648	96	9,766	118	9,649	27	6,12	5

Варто зазначити, що перший розв'язок досліду 1 (*ID* = 13392) має $N_1 = 1$ (при загальній кількості розв'язків – 26 400), тоді як другий розв'язок (*ID* = 16192) має $N_1 = 10$, а не $N_1 = 2$. Це обумовлено декількома особливостями задачі оптимального приєднання РДЕ. По-перше, кількість можливих розв'язків задачі може бути дуже великою, навіть якщо діапазони потужності РДЕ задавати дискретно [5, табл. 5]. По-друге, розв'язки, що не мають суттєвих відмінностей, авторами прийнято вважати варіаціями одного розв'язку. Трохи гірші за значенням ЦФ розв'язки (з такими *ID* як 16192, 6552, 10152 та 2588) з іншою конфігурацією мережі можуть бути цікавими для подальшого дослідження, оскільки, наприклад, при детальному техніко-економічному їх порівнянні може з'ясуватися, що деякі особливості розв'язків не було враховано. Тому остаточна оцінка *W* кожного такого розв'язку ще може змінитися.

Отже, з результатів у табл. 2 випливає, що при розв'язанні задачі оптимального приєднання РДЕ з використанням розглянутих методів багатокритеріального ранжування отримано практично однакові найкращі розв'язки. Таким чином, це підтверджує адекватність використаного раніше підходу – стандартизування компонентів ЦФ та значення вагових коефіцієнтів α_1 =0,31 та α_2 =0,69. Також це обґрунтовано дає змогу використовувати будь-який із розглянутих методів.

Кращі розв'язки кожного окремого досліду у межах свого досліду мають позиції $N \in [1; 48]$.

Розв'язки за методом VIKOR-ядро мають позиції $N \in [1; 64]$ у інших дослідах. У межах всіх дослідів разом кращі розв'язки мають позиції $N \in [1; 118]$, що складає 0,44% від загальної кількості можливих розв'язків.

Слід зауважити, що у досліді 1 та 4 кращими визначено одні й ті самі розв'язки, тоді як у досліді 5 метод VIKOR визначає кращими дещо інші розв'язки. Однак, якщо розглянути представлені

розв'язки детальніше, то виявиться, що розв'язки дослідів 1 та 4 є схожими на розв'язки досліду 5 (те саме стосується й розв'язків дослідів 2 та 3). Вони, в основному, незначно відрізняються потужністю джерел при однаковій конфігурації мережі. Так, перший розв'язок у всіх дослідах (*ID* 13392, 13428 та 13356) характеризується приєднанням РДЕ до вузлів 13 та 4 мережі. Однак такий порядок зберігається не завжди. Наприклад, у досліді 1 розв'язок з *ID* = 10152 (характеризується приєднанням РДЕ до вузлів 12 та 4 мережі) є четвертим, тоді як у досліді 4 він є п'ятим. У досліді 5 четвертим є розв'язок з *ID* = 10072, який також характеризується приєднанням РДЕ до вузлів 12 та 4 мережі.

Варто додати, що впорядкування розв'язків дослідів 2 та 3 у табл. 2 є однаковим. Проте такий порядок не зберігається для усіх розв'язків. Перші 8,5 тис. та останні 300 розв'язків знаходяться на однакових позиціях у впорядкованих послідовностях дослідів 2 та 3. Неоднаковість послідовностей пояснюється тим, що у досліді 3 цільова функція (3) є адитивною, тоді як у досліді 2 штрафна функція *D* представлена множником у цільовій функції (2).

Таке порівняння було б неповним, якби воно було проведено лише для випадку приєднання двох РДЕ до 14-шинної дослідної мережі. У табл. 3, 4 наведено результати аналогічних досліджень для випадку приєднання трьох РДЕ до 14-шинної дослідної мережі та двох РДЕ до 57-шинної дослідної мережі відповідно. Значення вагових коефіцієнтів у всіх дослідах отримано такі самі, як і вже наведені для результатів табл. 2. Типи РДЕ у табл. 3 не вказано, оскільки у всіх варіантах приєднання РДЕ, як і у попередньому випадку, найкращим типом є ВЕС. У табл. 4 у всіх представлених варіантах приєднання РДЕ найкращим типом для вузла 13 є СЕС, а для решти вузлів – ВЕС.

Таблиця 3

Характеристика розв'язку														
ID	N_1	Вузол приєднання та (потужність, МВт) РДЕ			*W*	N_2	*W* × 10^{-1}	N_3	*W* × 10^{-1}	N_4	*RC* × 10^{-1}	N_5	*Q* × 10^{-3}	Входить до найкращих у досліді
566304	**1**	**13 (58)**	**11 (50)**	**8 (104)**	**1,6790**	1	9,729	1	9,819	3	9,721	7	4,9	1, 2, 3, 6
565584	2	13 (64)	11 (44)	8 (104)	1,6789	2	9,727	2	9,818	1	9,724	4	4,6	4, 5, 6
564784	7	13 (64)	11 (38)	8 (104)	1,6741	7	9,719	7	9,812	5	9,720	5	4,7	6
205584	**8**	**13 (64)**	**10 (56)**	**8 (104)**	**1,6727**	8	9,717	8	9,811	7	9,718	11	5,01	1, 2, 3, 4
206384	15	13 (64)	10 (64)	8 (104)	1,6690	15	9,710	15	9,807	11	9,715	9	4,96	5, 6
563984	20	13 (64)	11 (32)	8 (104)	1,6639	23	9,700	23	9,800	17	9,710	10	4,98	6
420704	**44**	**10 (48)**	**6 (99)**	**8 (104)**	**1,6470**	74	9,6632	74	9,775	61	9,671	1	2,9	1, 2, 3, 4, 5, 6
207184	31	13 (64)	10 (72)	8 (102)	1,6585	31	9,691	31	9,794	31	9,703	17	5,2	6
563184	40	13 (64)	10 (24)	8 (104)	1,6484	49	9,673	49	9,782	41	9,687	24	5,5	6
207904	54	13 (58)	10 (80)	8 (104)	1,6428	73	9,6633	73	9,776	53	9,678	34	5,9	6
180552	**74**	**13 (45)**	**10 (48)**	**4 (162)**	**1,6322**	51	9,672	51	9,781	192	9,630	564	16,3	1
181424	75	13 (51)	10 (56)	4 (144)	1,6315	42	9,675	42	9,783	357	9,6133	970	17,8	2, 3
179680	106	13 (38)	10 (40)	4 (180)	1,6260	97	9,656	97	9,771	103	9,6443	286	14,7	4
1461504	**118**	**14 (30)**	**6 (99)**	**8 (104)**	**1,6246**	296	9,623	296	9,749	350	9,6139	115	9,7	1
539680	126	13 (38)	11 (32)	4 (180)	1,6238	112	9,651	112	9,768	104	9,6440	277	14,6	2, 3
539600	131	13 (32)	11 (32)	4 (180)	1,6231	122	9,650	122	9,767	100	9,645	264	14,5	4
1462224	212	14 (34)	6 (88)	8 (104)	1,6148	378	9,612	378	9,742	345	9,6142	98	8,9	5
1277184	466	13 (45)	5 (90)	8 (104)	1,5959	596	9,589	596	9,726	534	9,600	140	10,7	5

Непорівнянні між собою альтернативи за методом VIKOR-ядро мають такі *ID*:

у табл. 3 – 206384, 207184, 207904, 420704, 563184, 563984, 564784, 565584, 566304;

у табл. 4 –72654, 72658, 72662, 72666, 72670, 72674, 72678, 73846, 74246, 83850, 83854.

Як і у першому випадку (табл. 2), результати табл. 3, 4 також демонструють, що у разі розв'язання задачі оптимального приєднання РДЕ з використанням розглянутих методів багатокритеріального ранжування отримано практично однакові найкращі розв'язки.

Щодо результатів у табл. 3. Кращі розв'язки, які отримано у кожному окремому досліді, у межах свого досліду мають позиції $N \in [1; 140]$. Розв'язки за методом VIKOR-ядро мають позиції $N \in [1; 74]$ в інших дослідах. У межах усіх дослідів разом кращі розв'язки мають позиції $N \in [1; 596]$. Це складає 0,03% від загальної кількості можливих розв'язків, яка становить 1 760 000. Цього разу у дослідах 1 та 4 найкращими визначено різні розв'язки. Повного збігу немає у жодній з пар дослідів. Однак, як і раніше представлені кращі розв'язки одного досліду незначно відрізняються від кращих розв'язків іншого досліду. Так, у 15-ти (з 18) розв'язках запропоновано приєднувати РДЕ до вузла 13, у 13-ти розв'язках – до вузла 8, у 9-ти розв'язках – до вузла 10, у 6-ти розв'язках – до вузла 11 і т.п.

Потужність окремих джерел змінюється в дещо ширших діапазонах. Наприклад, оптимальна потужність джерела у вузлі 10 (який входить до дев'яти розв'язків) коливається у межах від 24 до 80 МВт, тоді як оптимальна потужність джерела у вузлі 8 (який входить до тринадцяти розв'язків) коливається у межах від 102 до 104 МВт. Діапазони сумарної потужності кращих розв'язків майже не змінилися, що свідчить про насичення мережі джерелами потужності: 192–258 МВт – для випадку приєднання трьох РДЕ до 14-шинної мережі (табл. 3) та 208–269 МВт – для випадку приєднання двох РДЕ до 14-шинної мережі (табл. 2).

Таблиця 4

Характеристика розв'язку														
ID	N_1	Вузол приєднання та (потужність, МВт) РДЕ			*W*	N_2	$W \times 10^{-1}$	N_3	$W \times 10^{-1}$	N_4	$RC \times 10^{-1}$	N_5	$Q \times 10^{-3}$	Входить до найкращих у досліді
72650	**1**	**13**	**(434)**	**31**	**(2,4)**	**1,1840**	2	9,80010	2	9,86669	990	9,7636	37	0,763	1
72654	2	13	(434)	31	(3)	1,1837	1	9,80012	1	9,86670	953	9,7649	27	0,67	2, 3, 6
72658	4	13	(434)	33	(1,8)	1,1834	3	9,80008	3	9,86668	908	9,7662	14	0,59	6
73450	**5**	**13**	**(434)**	**32**	**(1,5)**	**1,1833**	8	9,79940	8	9,86623	1027	9,7624	45	0,87	1, 2, 3
73046	**6**	**13**	**(434)**	**31**	**(3,5)**	**1,1831**	13	9,79915	13	9,86606	1050	9,7616	53	0,93	1
72662	8	13	(434)	30	(1,1)	1,1830	4	9,79998	4	9,86661	884	9,7673	8	0,52	6
72242	**9**	**13**	**(434)**	**30**	**(2,2)**	**1,182870**	19	9,79884	19	9,86585	1073	9,76080	59	0,99	1
72246	10	13	(434)	32	(2,2)	1,182864	12	9,79916	12	9,86606	1010	9,7628	44	0,85	2, 3
73050	11	13	(434)	25	(2)	1,182862	11	9,79918	11	9,86608	1006	9,7629	43	0,84	2, 3
69842	**16**	**13**	**(434)**	**31**	**(4,1)**	**1,18262**	23	9,79861	23	9,86570	1075	9,76075	61	1,00	1
72666	17	13	(434)	57	(3)	1,18257	5	9,79983	5	9,86651	859	9,7684	4	0,46	6
83842	19	13	(434)	31	(4,7)	1,1823	17	9,79897	17	9,86594	968	9,7643	35	0,756	2, 3
72670	21	13	(434)	31	(5,3)	1,1821	6	9,79962	6	9,86637	837	9,7693	3	0,40	6
72674	27	13	(434)	31	(5,9)	1,1815	9	9,79936	9	9,86620	809	9,7702	2	0,36	6
72678	32	13	(434)	32	(7,4)	1,1810	14	9,79905	14	9,86599	793	9,7709	1	0,32	5, 6
73078	80	13	(434)	57	(9)	1,1772	45	9,79594	45	9,86392	849	9,7687	12	0,58	5
83850	101	13	(434)	35	(9)	1,1757	49	9,79516	49	9,86340	797	9,7708	5	0,47	5, 6
74242	108	13	(434)	57	(12)	1,1751	52	9,79456	52	9,86300	824	9,7697	11	0,56	5
83854	148	13	(434)	34	(13)	1,1712	68	9,79227	68	9,86147	771	9,7718	7	0,50	6
73846	155	13	(434)	35	(18)	1,1705	71	9,79164	71	9,86105	756	9,7723	6	0,49	5, 6
74246	214	13	(372)	31	(5,9)	1,1625	104	9,78569	104	9,85708	773	9,7716	33	0,74	6
72638	568	13	(372)	32	(7,4)	1,1373	182	9,77782	182	9,85183	2	9,8219	257	4,33	4
73038	651	13	(372)	57	(12)	1,1338	246	9,77504	246	9,84998	12	9,8200	287	4,69	4
83814	779	13	(372)	34	(13)	1,1289	287	9,77230	287	9,84815	3	9,8217	362	5,50	4
73806	804	13	(372)	35	(18)	1,1282	292	9,77189	292	9,84788	1	9,8220	378	5,63	4
74206	1024	13	(434)	31	(2,4)	1,1212	359	9,76709	359	9,84468	8	9,8208	472	6,55	4

Щодо результатів у табл. 4. Кращі розв'язки, які отримано у кожному окремому досліді, у межах свого досліду мають позиції $N \in [1; 17]$. Розв'язки за методом VIKOR-ядро мають позиції $N \in [1; 908]$ в інших дослідах. У межах всіх дослідів разом кращі розв'язки мають позиції $N \in [1; 1075]$. Це складає 0,17% від загальної кількості можливих розв'язків, яка становить 616000. Однак варто зауважити, що у випадку приєднання двох РДЕ до 57-шинної мережі «думки» методів багатокритеріального ранжування щодо оптимальності розв'язків дещо розійшлися. Так, позиції розв'язків у дослідах 1–3 загалом схожі, *N* зростає від початку до кінця таблиці. Метод TOPSIS (дослід 4) навпаки: найкращі розв'язки, визначені в інших дослідах, «вважає» далеко не найкращими. Так, кращі розв'язки, отримані у досліді 4, мають $N_4 \in [1; 12]$, тоді як кращі розв'язки інших дослідів мають $N_4 \in [756; 1075]$. Ранжування методом VIKOR (дослід 5) дає дещо інші результати. Кращі розв'язки досліду 4 визначено одними з найгірших серед представлених, як за ранжуванням у дослідах 1–3. Кращі розв'язки досліду 5 ($N_5 \in [1; 12]$) представлені ближче до середини таблиці, тоді як решта розв'язків ($N_5 \in [1; 12]$) займають верхню частину таблиці ($N_5 \in [2; 61]$).

Для «повноти картини» варто також розглянути спільне використання декількох методів багатокритеріального ранжування, що запропоновано у [6]. У табл. 5 наведено результати ранжування розв'язків попередніх таблиць за показником N_Σ, який визначається так:

$$N_\Sigma = \left(N_1 + N_4 + N_5\right)/3\,. \tag{4}$$

Показники N_2 та N_3 не враховано, оскільки ранжування за ними принципово не відрізняється від ранжування у досліді 1 і отримані результати таким чином будуть упереджені на користь ранжування досліду 1. Результати ранжування методом VIKOR-ядро також не враховано, оскільки результати бінарного ранжування важко адекватно врахувати разом з іншими N, які змінюються у широких діапазонах.

Таблиця 5

Характеристика розв'язку													
Розв'язання задачі оптимального приєднання													
двох РДЕ до 14-шинної мережі (табл. 2)				трьох РДЕ до 14-шинної мережі (табл. 3)				двох РДЕ до 57-шинної мережі (табл. 4)					
ID	N_Σ	*ID*	N_Σ	*ID*	N_Σ	*ID*	N_Σ	*ID*	N_Σ	*ID*	N_Σ	*ID*	N_Σ
13392	4,3	16112	18,3	566304	3,7	207904	47,0	72650	342,7	69842	384,0	83854	308,7
13352	4,0	13272	20,3	565584	2,3	180552	276,7	72654	327,3	72666	293,3	73846	305,7
13428	24,0	6472	28,7	564784	5,7	181424	467,3	72658	308,7	83842	340,7	74246	340,0
13312	4,7	13356	33,7	205584	8,7	179680	165,0	73450	359,0	72670	287,0	72638	275,7
16192	9,3	16072	32,7	206384	11,7	1461504	194,3	73046	369,7	72674	279,3	73038	316,7
6552	13,0	10152	36,3	563984	15,7	539680	169,0	72662	300,0	72678	275,3	83814	381,3
16152	11,3	2588	64,3	420704	35,3	539600	165,0	72242	380,3	73078	313,7	73806	394,3
6628	39,0	10072	52,7	207184	26,3	1462224	218,3	72246	354,7	83850	301,0	74206	501,3
		2432	76,7	563184	35,0	1277184	380,0	73050	353,3	74242	314,3		

При приєднанні двох та трьох РДЕ до 14-шинної мережі, як і раніше, спостерігається поступове збільшення показника N_Σ для представленої послідовності розв'язків. Серед розв'язків табл. 2 найкращим тепер визначено розв'язок *ID* 13352 ($N_\Sigma = 4{,}0$), хоча цей розв'язок згідно з показниками крайнього правого стовпця тієї самої таблиці попередньо був визначений одним із найкращих лише у досліді 6. Розбіжність результатів ранжування розв'язків табл. 4 різними методами позначилася й на ранжуванні за показником N_Σ. Тому розв'язки мають N_Σ, який змінюється у невеликому діапазоні: від 275,3 до 501,3.

Висновки. Проведений аналіз відомих результатів з тими, які отримані методами TOPSIS, VIKOR та VIKOR-ядро, показав практичну їхню схожість. Це підтверджує адекватність використаного раніше підходу у комбінованому стохастичному методі – стандартизування компонентів цільової функції та наведених значень вагових коефіцієнтів, що були визначені експертним методом.

1. Opricovic S., Tzeng G.-H. Extended VIKOR method in comparison with outranking methods. *European Journal of Operational Research*. 2007. No 178. Pp. 514-529. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.01.020

2. Johnson R.A., Wichern D.W. Applied Multivariate Statistical Analysis. Upper Saddle River, New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2007. 773 p.

3. Кудря С.О. Стан та перспективи розвитку відновлюваної енергетики в Україні. *Вісник НАН України*. 2015. № 12. С. 19-26. URL: http://www.ive.org.ua/wp-content/uploads/Visn_12_2015_6.pdf (дата звернення 10.01.2018)

4. Кириленко О.В., Лук'яненко Л.М., Гончаренко І.С. Проблеми ефективного впровадження відновлюваних джерел енергії в електричні мережі. *Матеріали XVII міжнародної науково-практичної конференції Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті*. 29-30 вересня 2016 року, м. Київ, Україна. С. 130-133.

5. Кириленко О.В., Лук'яненко Л.М., Гончаренко І.С. Стохастичний метод визначення оптимальних місць підключення та потужності джерел розосередженого генерування. *Технічна електродинаміка*. 2017. № 1. С. 62-70. DOI: https://doi.org/10.15407/techned2017.01.062

6. Жаркин А.Ф., Попов В.А., Саид Банузаде Сахрагард, Замковой П.А., Сподинская А.В. Многокритериальная оценка альтернативных вариантов интеграции источников распределённой генерации в распределительные сети. *Электронное моделирование*. 2016. Т. 38. № 1. С. 99-112. URL: http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/101338/08-Zharkin.pdf (дата звернення 10.01.2018)

7. Романченко І.С., Потьомкін М.М. Метод VIKOR-ядро та його використання для багатокритеріального порівняння альтернатив. *Modern Information Technologies in the Sphere of Security and Defence*. 2015. № 3 (24). С. 103-107. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/sitsbo_2015_3_19 (дата звернення 10.01.2018)

8. El-Santawy M.F., Ahmed A.N. An Information Entropy Weighting Method Combined to TOPSIS Approach for Ranking Consulting Firms. *Life Science Journal*. 2012. No 9 (1s). Pp. 147-150. URL: http://www.lifesciencesite.com/lsj/life0901s/023_14628life0901s_147_150.pdf (дата звернення 10.01.2018)

9. Power Systems Test Case Archive of the Department of Electrical Engineering at the University of Washington. URL: http://www.ee.washington.edu/research/pstca/ (дата звернення 10.01.2018)

КОМБИНИРОВАННЫЙ СТОХАСТИЧЕСКИЙ МЕТОД. СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ, ПОЛУЧЕННЫХ НЕКОТОРЫМИ МЕТОДАМИ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО РАНЖИРОВАНИЯ

Л.Н. Лукьяненко, канд.техн.наук, **И.С. Гончаренко,** канд.техн.наук
Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина. **E-mail: okjraa@gmail.com**

Для решения задачи определения оптимальных мощностей, типов и мест присоединения распределенных источников энергии (РДЭ) к электрической сети (ЭС) разработан комбинированный стохастический метод [5], в котором при многокритериальной оптимизации компоненты целевой функции стандартизированы и сбалансированы весовыми коэффициентами. Определение последних выполняется экспертным методом. Однако такой подход не обоснован. Поэтому целью этой работы является определение соответствия определённых экспертным методом значений весовых коэффициентов постановке задачи, согласно которой особенности ЭС и особенности РДЭ должны иметь одинаковое влияние на оценку решения задачи. Для достижения цели оптимальное решение определено методами TOPSIS, VIKOR и VIKOR-ядро. Весовые коэффициенты для этих методов определены методом веса энтропии информации. Сравнение полученных результатов с известными показало, что они между собой практически одинаковы, а это подтверждает правильность полученных экспертным методом значений весовых коэффициентов. Библ. 9, рис. 1, табл. 5.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, комбинированный стохастический метод, многокритериальная оптимизация, TOPSIS, VIKOR, VIKOR-ядро.

COMBINED STOCHASTIC TECHNIQUE. COMPARISON OF RESULTS OBTAINED BY DIFFERENT MULTI CRITERIA DECISION MAKING TECHNIQUES

L. Lukianenko, I. Goncharenko
The Institute of Electrodynamics of The National Academy of Sciences of Ukraine,
pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine. **E-mail: okjraa@gmail.com**

To solve the optimization problem of distributed generation (DG) optimal placement Combined Stochastic Technique [5] has been developed. Components of the objective function is standardized and balanced by weight coefficients. The determination of the latter is proposed to be carried out by an Expert Evaluation Technique (EET). However, such an approach is unfounded. Therefore, the object of this paper is to determine whether the obtained with EET weight coefficients correspond with the problem formulation, according to which peculiarities of both power grid and DG must have equal influence on the rating of problem solution. To achieve the object optimal problem solution was determined by multi criteria decision making techniques TOPSIS, VIKOR and VIKOR-kernel. Weight coefficients are defined with Information Entropy Weight Method. Obtained results are practically identical to obtained previously. Therefore, weight coefficients were properly determined by an EET. References 9, figures 1, tables 5.

Key words: distributed generation, Combined Stochastic Technique, multiple criteria decision making, TOPSIS, VIKOR, VIKOR-kernel.

1. Opricovic S., Tzeng G.-H. Extended VIKOR method in comparison with outranking methods. *European Journal of Operational Research*. 2007. No 178. Pp. 514-529. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.01.020

2. Johnson R.A., Wichern D.W. Applied Multivariate Statistical Analysis. Upper Saddle River, New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2007. 773 p.

3. Kudria S.O. State and perspectives of renewable energy development in Ukraine. *Visnyk Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2015. No 12. Pp. 19-26. (Ukr) URL: http://www.ive.org.ua/wp-content/uploads/Visn_12_2015_6.pdf (Accessed 10.01.2018)

4. Kyrylenko O.V., Lukianenko L.M., Goncharenko I.S. The problems of efficient introduction of renewable energy sources into power grids. *Proceedings of the 17th International Scientific and Practical Conference Renewable Energy and Energy Efficiency in the 21st Century*. 29-30 September, 2016. Kyiv, Ukraine. Pp. 130-133. (Ukr)

5. Kyrylenko O.V., Lukianenko L.M., Goncharenko I.S. Stochastic approach to determination of the distributed generation optimal placement. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2017. No 1. Pp. 62-70. (Ukr)
DOI: https://doi.org/10.15407/techned2017.01.062

6. Zharkin A.F., Popov V.A., Banuzade Sahragard S., Zamkovoi P.A., Spodynskaia A.V. Multicriteria evaluation of alternative options for the distributed generation sources integration into the distribution networks. *Elektronnoe Modelirovanie*. 2016. Vol. 38. No 1. Pp. 99-112. (Rus)
URL: http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/101338/08-Zharkin.pdf (Accessed 10.01.2018)

7. Romanchenko I.S., Potomkin M.M. VIKOR-kernel method and its using to make a multiple criteria alternatives comparison. *Modern Information Technologies in the Sphere of Security and Defence*. 2015. No 3 (24). Pp. 103-107. (Ukr) URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/sitsbo_2015_3_19 (Accessed 10.01.2018)

8. El-Santawy M.F., Ahmed A.N. An Information Entropy Weighting Method Combined to TOPSIS Approach for Ranking Consulting Firms. *Life Science Journal*. 2012. No 9 (1s). Pp. 147-150.
URL: http://www.lifesciencesite.com/lsj/life0901s/023_14628life0901s_147_150.pdf (Accessed 10.01.2018)

9. Power Systems Test Case Archive of the Department of Electrical Engineering at the University of Washington.
URL: http://www.ee.washington.edu/research/pstca/ (Accessed 10.01.2018)

Надійшла 02.03.2018
Остаточний варіант 23.07.2018