

<https://doi.org/10.31649/1997-9266-2023-168-3-47-54>

УДК 004.62

Б. І. Мокін¹
О. Б. Мокін¹
Д. О. Шалагай¹

ВИЗНАЧЕННЯ ПРІОРИТЕТУ КРИТЕРІЇВ В ЗАДАЧІ СИСТЕМНОГО АНАЛІЗУ ПЛАНУ ВІДБУДОВИ ЕНЕРГЕТИКИ УКРАЇНИ В НАПРЯМКУ ІНТЕГРАЦІЇ В НЕЇ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ

¹Вінницький національний технічний університет

Розкрито суть і значимість кожного з восьми критеріїв оцінки результатів системного аналізу проекту «Плану відновлення України: Енергетика» в напрямку інтеграції в енергетику її відновлювальних джерел у вигляді таких інтегральних показників, запропонованих у попередній роботі авторів, як: загальна кількість згенерованої активної потужності; загальна кількість згенерованої реактивної потужності; вартість одного кіловату згенерованої активної потужності; вартість одного кіловатара згенерованої реактивної потужності; загальні втрати активної потужності при її передаванні від джерел генерації до споживачів; якість згенерованої потужності; надійність електроенергетичної системи; живучість електроенергетичної системи. Визначено які з цих восьми критеріїв для розв'язання задачі багатокритеріальної оптимізації проекту «Плану відновлення України: Енергетика» в напрямку інтеграції в енергетику її відновлювальних джерел необхідно використовувати як критерії оптимізації, а які необхідно включати в множину обмежень. З використанням теорії нечітких множин та лінгвістичної змінної з конкретизацією у вигляді процедури Беллмана–Заде та матриці Саати попарних порівнянь варіантів, узагальнених в методиці, запропонованій українським професором Сергієм Штовбою, визначено вагу кожного критерію, що використовуватиметься для розв'язання задачі багатокритеріальної оптимізації проекту «Плану відновлення України: Енергетика» в напрямку інтеграції в енергетику її відновлювальних джерел. Створено комп'ютерну програму мовою Python, яка автоматизує процес визначення ваги, а відповідно з вагою, і пріоритету кожного критерію при розв'язанні задачі багатокритеріальної оптимізації проекту «Плану відновлення України: Енергетика» в напрямку інтеграції в енергетику її відновлювальних джерел.

Ключові слова: проєкт плану, енергетика, відновлювальні джерела, критерії оптимізації, пріоритети, нечіткі множини, процедура Беллмана–Заде, методика Штовби.

Вступ

Вступну частину цієї статті ми почнемо цитатою зі вступу до нашої попередньої статті [1], а саме: «За дорученням Кабінету Міністрів України група фахівців з енергетичної безпеки напрацювала матеріали [2], з використанням яких запропоновано досить детальний проєкт «Плану відновлення України: Енергетика», оприлюднений у липні 2022 року [3], який містить 7 розділів з додатками, що викладені на 164 сторінках. Метою нашого дослідження є системний аналіз з використанням ідеології, викладеної в роботі [4], цього проєкту в напрямку інтеграції в енергетику її відновлювальних джерел та вироблення рекомендацій з його вдосконалення для врахування наслідків руйнування енергетичної інфраструктури України бомбардуваннями російських агресорів, а також для доповнення пропозиціями з географічного розміщення нових джерел відновлювальної енергетики та їхньої агрегації з акумуляторами електроенергії різних типів» — кінець цитати.

А завершується наша стаття [1] визначенням поля з восьми критеріїв оцінки результатів системного аналізу у вигляді таких інтегральних показників, як: 1) загальна кількість згенерованої ак-

тивної потужності P_g ; 2) загальна кількість згенерованої реактивної потужності Q_g ; 3) вартість ϖ_p одного кіловату згенерованої активної потужності; 4) вартість ϖ_Q одного кіловату згенерованої реактивної потужності; 5) загальні втрати ΔP_{gc} активної потужності при її передаванні від джерел генерації до споживачів; 6) якість W_g згенерованої електроенергетичної потужності; 7) надійність H_{es} електроенергетичної системи, яка характеризується ймовірністю безвідмовного забезпечення електроенергією споживачів у разі виникнення аварійних режимів в процесі нормальної експлуатації електроенергетичної системи; 8) живучість J_{es} , яка характеризується ймовірністю мінімально допустимого забезпечення електроенергією споживачів електроенергетичною системою, що зазнала руйнувань в результаті природного стихійного лиха чи бомбардувань під час війни — ці критерії мають такий вигляд:

$$P_g = P_g \left(\sum_{i=1}^N K_{gi}^P, t_i \right), \quad (1)$$

де K_{gi}^P, t_i — відповідно капітальні затрати на будівництво чи відновлення і введення в експлуатацію i -го базового генератора електроенергії, віднесені на генерацію активної потужності, та проміжок часу, що потрібний для цього;

$$Q_g = Q_g \left(\sum_{i=1}^N K_{gi}^Q, t_i, \sum_{s=1}^S K_{ds}^Q, t_s \right), \quad (2)$$

де K_{gi}^Q, t_i — відповідно капітальні затрати на будівництво чи відновлення і введення в експлуатацію i -го базового генератора електроенергії, віднесені на генерацію реактивної потужності, та проміжок часу, що потрібний для цього, а K_{ds}^Q, t_s — відповідно капітальні затрати на будівництво чи відновлення і введення в експлуатацію s -го джерела реактивної потужності, не пов'язаної з її генерацією базовими генераторами електроенергії, та проміжок часу, що потрібний для цього;

$$\varpi_p = \varpi_p \left(\sum_{i=1}^N K_{gi}^P, t_i, \sum_{l=1}^N C_{gl}^P, t_l, \sum_{l=1}^N c_{gl}^P, t_l \right), \quad (3)$$

де C_{gl}^P, t_l, c_{gl}^P — відповідно затрати на експлуатацію l -го базового генератора електроенергії, віднесені на генерацію активної потужності, проміжок часу, вибраний як базовий для визначення цих затрат, та вартість використаних протягом цього відрізка часу енергоносіїв, віднесена на генерацію активної потужності;

$$\varpi_Q = \varpi_Q \left(\sum_{i=1}^N K_{gi}^Q, t_i, \sum_{l=1}^N C_{gl}^Q, t_l, \sum_{l=1}^N c_{gl}^Q, t_l, \sum_{s=1}^S K_{ds}^Q, t_s, \sum_{l=1}^S C_{dl}^Q, t_l \right), \quad (4)$$

де C_{dl}^Q — затрати на експлуатацію l -го джерела реактивної потужності, не пов'язаної з її генерацією базовими генераторами електроенергії;

$$\Delta P_{gc} = \frac{1}{t_l} \int_{t=0}^{t_l} \sum_{m=1}^M I_{ml}^2(t) R_m dt, \quad (5)$$

де $I_{ml}(t)$ — струм, що протікає в m -му елементі електроенергетичної системи з активним опором R_m протягом базового проміжку часу t_i ;

$$W_g = W_g \left(\forall i \in [1, M] \rightarrow P_{gi} = P_{ci}; Q_{gi} = Q_{ci} \right), \quad (6)$$

де $P_{gi}(t), Q_{gi}(t)$ — активна та реактивна потужності, що генеруються в i -й ланці електроенергетичної системи, а $P_{ci}(t), Q_{ci}(t)$ — активна та реактивна потужності, що споживаються у цій же i -й ланці;

$$H_{es} = H_{es} \left(\forall P_{ci}(t), Q_{ci}(t) \exists (P_{gi}(t), Q_{gi}(t)) \cup (P_{g(i+1)}(t), Q_{g(i+1)}(t)) \cap \exists (A_i \cup A_{i+1}) \right), \quad (7)$$

де A_i — система протиаварійної автоматики в i -й ланці електроенергетичної системи, а оператори

$\forall, \exists, \cup, \cap$ визначають логіку подачі системою протиаварійної автоматики електричної потужності від того ж чи альтернативного джерела до споживача через резервне коло у випадку аварії в його основному колі;

$$J_{es} = J_{es} \left(\forall P_{ci}(t), Q_{ci}(t) \exists \left(P_{g(i-1)}(t), Q_{g(i-1)}(t) \cup \left(P_{g(i+1)}(t), Q_{g(i+1)}(t) \right) \right) \cap \exists B_i \right), \quad (8)$$

де B_i — аварійна бригада, яка в змозі підключити в i -й ланці електроенергетичної системи електричну потужність від альтернативного джерела до споживача через резервне коло у випадку знищення чи суттєвого пошкодження джерела потужностей $P_{gi}(t), Q_{gi}(t)$ в його основному колі.

Саме у полі цих восьми критеріїв, які для зручності будемо позначати $K_i, i = 1, 2, \dots, 8$, на 5-му етапі системного аналізу ми і здійснюватимемо багатокритеріальну оптимізацію варіантів проекту «Плану відновлення України: Енергетика» в напрямку інтеграції в енергетику її відновлювальних джерел та вироблення рекомендацій з його вдосконалення, який, як і в роботі [1], позначатимемо аббревіатурою ППВУЕ-ВД. Але, перш ніж реалізувати багатокритеріальну оптимізацію ППВУЕ-ВД, необхідно визначити пріоритети кожного з визначених вище критеріїв, тобто визначити вагу, з якою він входить до зваженої критерій оптимізації.

Розв'язання поставленої задачі

До розв'язання поставленої задачі приступимо з уточнення того, які з критеріїв $K_i, i = 1, 2, \dots, 8$, будемо використовувати лише для оціночних суджень на четвертому етапі системного аналізу, а які застосовуватимемо і для розв'язання задачі багатокритеріальної оптимізації на його п'ятому етапі.

Отже почнемо з попередньої оцінки критерію K_1 , заданого виразом (1), яким визначається загальна кількість виробленої активної потужності — у нашому випадку це та активна потужність, що виробляється джерелами відновлювальної енергетики (ВДЕ). Цілком очевидно, що для вироблення додаткової кількості активної потужності необхідно збудувати і увести в експлуатацію додаткову кількість ВДЕ та додаткову кількість акумуляторів електроенергії (АЕ) якогось типу, в які закачуватиметься електроенергія від ВДЕ в години, коли вона надходить в електроенергетичну систему (ЕЕС) в надлишку. В залежності від типу ВДЕ та типу АЕ можливі різні структурні варіанти з різною вартістю побудови і введення в експлуатацію, але чим більше вибрана структура згенерує активної потужності, тим краще, бо лишню внутрішньо-позабалансову її кількість можна буде вигідно продати на закордонному ринку. А тому критерій K_1 заслуговує на те, щоб його залишити в статусі критерію оптимізації на 5-му етапі системного аналізу ППВУЕ-ВД.

А попередня оцінка критерію K_2 , заданого виразом (2), яким визначається загальна кількість виробленої реактивної потужності — у нашому випадку це та реактивна потужність, що виробляється додатковими джерелами реактивної потужності (ДРП), які необхідні для того, щоб у вузлах підключення ВДЕ забезпечити потрібний для нормального режиму функціонування ЕЕС рівень напруги, свідчить, що цей критерій на 5-му етапі системного аналізу ППВУЕ-ВД в число критеріїв оптимізації включати не слід, а варто використовувати його лише як оціночний показник на 4-му етапі системного аналізу і включати в число обмежень для розв'язання задач оптимізації на 5-му етапі системного аналізу. Цей висновок базується на тому, що для підтримання потрібного рівня напруги у вузлах ЕЕС необхідно генерувати реактивну потужність у такій кількості, яка потрібна для балансування реактивної потужності споживачів, під'єднаних у цих вузлах, а тому немає сенсу домагатись мінімізації чи максимізації цього показника.

Те, що критерій K_3 , заданий виразом (3), яким визначається вартість одного кіловату виробленої ВДЕ активної потужності на 5-му етапі системного аналізу, в число критеріїв оптимізації включати потрібно не може викликати заперечень, оскільки ця вартість суттєво залежатиме від того будемо ми будувати і вводити в експлуатацію вітрову електростанцію (ВЕС) чи їх комплекс, сонячну електростанцію (СЕС) чи їх комплекс, малу гідравлічну електростанцію (МГЕС) чи їх комплекс або модульну атомну електростанцію (МАЕ). Реагуючи на те, що ми включили в цей перелік МАЕ, слід взяти до уваги, що в режимі нормальної експлуатації МАЕ, генеруючи електроенергію, не забруднюють навколишнє середовище вуглецевими викидами і не підвищують його температуру, а тому нині складається тенденція в енергетиці відносити МАЕ до джерел «зеленої» енергетики, тобто, включати їх до складу ВДЕ, що робитимемо і ми в процесі нашого системного аналізу ППВУЕ-ВД. Але з тим, що дехто з науковців в галузі електроенергетики відносить до ВДЕ і установки з вироблення водню (УВВ), ми не погоджуємось, оскільки якщо ці установки викорис-

товуються для трансформування у водень позабалансної кількості активної потужності з подальшим використанням водню замість газу в теплових електростанціях, то у цьому випадку вони є акумуляторами електричної енергії і їх слід відносити до АЕ, а якщо цей водень замість газу трубопроводами йде на експорт, то у цьому випадку їх слід відносити до споживачів електричної енергії.

Оскільки реактивну потужність, необхідну для балансу згенерованої та спожитої її кількості, в кожний вузол підключення ВДЕ можна подати або від синхронних генераторів базових електростанцій ЕЕС, або від встановленого у цьому вузлі синхронного компенсатора, або від батареї статичних конденсаторів, або замінивши асинхронні електродвигуни у споживачів на синхронні з переведенням їх в режим перезбудження, то цілком очевидно, що в кожному з цих варіантів вартість одного кіловатра згенерованої реактивної потужності буде різною, і є сенс віднайти такий варіант, який приведе до її мінімізації. А тому критерій K_4 , заданий виразом (4), яким визначається вартість одного кіловатра виробленої для ВДЕ реактивної потужності на 5-му етапі системного аналізу ППВУЕ-ВД в число критеріїв оптимізації теж включати потрібно.

А ось критерій K_5 , заданий виразом (5), яким визначаються загальні втрати активної потужності під час її передавання від джерел генерації до споживачів варто використовувати лише для оцінки цих втрат на 4-му етапі системного аналізу ППВУЕ-ВД, а на 5-му етапі системного аналізу в число критеріїв оптимізації функціонування ВДЕ його включати не потрібно, а використовувати лише як обмеження. Це обмовлено, по-перше, тим, що діапазон значень струмів, які передаються по лініях електропередачі (ЛЕП) від ВДЕ до пунктів їхнього під'єднання до ЕЕС, є досить широким, а тому перерізи проводів чи жил ЛЕП, як правило вибираються з необхідності передачі максимального з цих струмів, характерного для максимальної інтенсивності вітру, води чи сонячних променів, а по-друге, тим, що довжина ЛЕП між ВДЕ і пунктами їхнього під'єднання до ЕЕС, зазвичай, є малою.

Щодо критерію K_6 , заданого виразом (6), з використанням якого визначаються оцінки якості згенерованої електроенергії, тобто визначаються умови не виходу напруги і частоти за межі нормативних діапазонів, то зрозуміло, що цей критерій на 4-му етапі системного аналізу ППВУЕ-ВД слід використовувати як оціночний показник, а на 5-му етапі системного аналізу його слід використовувати лише як обмеження. Це зумовлено тим, що в нормальному режимі необхідно забезпечувати баланс і активних і реактивних згенерованої та внутрішньо-спожитої потужностей, що автоматично підтримує якість електроенергії за частотою і напругою в нормативних межах.

Критерій K_7 , заданий виразом (7), яким визначається надійність ЕЕС з ВДЕ, що характеризується ймовірністю безвідмовного забезпечення електроенергією споживачів у разі виникнення аварійних режимів в процесі нормальної експлуатації цього комплексу, необхідно використовувати не лише як оціночний на 4-му етапі системного аналізу ППВУЕ-ВД, але і як критерій оптимізації для розв'язання задачі багатокритеріальної оптимізації на 5-му етапі системного аналізу ЕЕС з ВДЕ, оскільки підвищення надійності будь-якого комплексу завжди приводить до підвищення як капітальних затрат на його створення, так і експлуатаційних затрат для його подальшого функціонування, тож для пошуку компромісу необхідно розв'язувати оптимізаційну задачу.

Ну і, нарешті, останній з числа уведених нами в роботі [1] критерій K_8 , заданий виразом (8), яким визначається живучість ЕЕС з ВДЕ, що характеризується ймовірністю мінімально допустимого забезпечення електроенергією споживачів електроенергетичною системою, що зазнала руйнувань в результаті природного стихійного лиха чи бомбардувань під час війни, необхідно використовувати на 4-му етапі системного аналізу ППВУЕ-ВД як оціночний, а на 5-му етапі системного аналізу при розв'язанні задачі багатокритеріальної оптимізації ЕЕС з ВДЕ — як обмеження, оскільки реалізація оптимального за цим критерієм варіанта є фінансово невідповідною, навіть для багатой держави, а тим більше вона є невідповідною для зруйнованої бомбардуванням російських агресорів України.

В результаті проведеного вище попереднього аналізу ми дійшли висновку, що як критерії оптимізації на 5-му етапі системного аналізу ППВУЕ-ВД необхідно використовувати критерії K_1 , K_3 , K_4 , K_7 , а усі інші введені в роботу [1] критерії необхідно використовувати на цьому етапі як обмеження. Варіанти реалізації ППВУЕ-ВД, для яких домінують будуть ці критерії в їхньому якомусь, поки-що невідомому, нечіткому поєднанні позначимо відповідно V_1 , V_2 , V_3 , V_4 .

Визначившись з множиною критеріїв оптимізації, перейдемо до розв'язання задачі визначення пріоритетів цих критеріїв, для розв'язання якої, як і в роботах [5], [6], використаємо методику нечіткого багатокритеріального аналізу варіантів, опубліковану в 2007 році у книзі С. Д. Штовби «Проектування нечітких систем засобами *MATLAB*» для 5 критеріїв і 5 варіантів, яка побудована з

використанням процедури Беллмана–Заде [7] прийняття рішень в нечітких умовах, що базується на матрицях Сааті попарних порівнянь варіантів, методика складення та застосування яких викладена в статті Т. Л. Сааті: «Взаємодія в ієрархічних системах», опублікованій в № 1 за 1979 рік журналу «Технічна кібернетика», а також на алгоритмі врахування критеріальних пріоритетів Ціммермана [8]. Приклад створення матриці Сааті попарних порівнянь варіантів наведено і в нашому навчальному посібнику [4].

Але з методики нечіткого багатокритеріального аналізу варіантів в інтерпретації С. Д. Штовби ми використаємо лише її гілку, присвячену визначенню пріоритету критеріїв оптимізації.

Для синтезу матриці Сааті попарного порівняння критеріїв нами залучена група експертів у складі трьох докторів технічних наук зі спеціальності 01.05.02, які нині здійснюють наукові дослідження в рамках спеціальностей 124 та 126, двох докторів філософії зі спеціальності 141, одного аспіранта зі спеціальності 124 та одного магістра зі спеціальності 141.

Експертна група для порівняння критеріїв K_1, K_3, K_4, K_7 , з яких вона в порядку зменшення їхньої лінгвістичної значимості утворила ряд $K_1 K_7 K_3 K_4$, сформулила матрицю Сааті C їхніх парних порівнянь у вигляді

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 9 \\ \frac{1}{2} & 1 & 4 & 8 \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{4} & 1 & 4 \\ \frac{1}{9} & \frac{1}{8} & \frac{1}{4} & 1 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Для того, щоб розв'язуючи задачі багатокритеріальної оптимізації ППВУЕ-ВД, врахувати вагу g_i кожного з критеріїв K_i , $i = 1, 7, 3, 4$, для суми яких в межах відрізка $[0,1]$ повинна задовольнятися нормалізаційна рівність

$$g_1 + g_7 + g_3 + g_4 = 1, \quad (10)$$

необхідно за схемою Беллмана–Заде, використовуючи матрицю C , синтезувати нечітку множину \tilde{K} у вигляді

$$\tilde{K} = \left\{ \frac{g_1}{K_1}, \frac{g_7}{K_7}, \frac{g_3}{K_3}, \frac{g_4}{K_4} \right\}. \quad (11)$$

І першим кроком процедури синтезу буде визначення власних чисел c_i , $i = 1, 2, 3, 4$ та власних векторів v_i , $i = 1, 2, 3, 4$ матриці C , які є розв'язками матричного рівняння

$$[C - cI]v = 0, \quad (12)$$

в якому I — одинична діагональна матриця тієї ж розмірності, що й матриця C , а вектори c , v мають вигляд

$$c = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ c_4 \end{bmatrix}; \quad v = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \end{bmatrix}. \quad (13)$$

На другому кроці процедури синтезу із вектора власних чисел c виокремлюємо власне число c_m , яке є найбільшим дійсним числом, та виокремлюємо власний вектор v_m , породжений цим найбільшим дійсним власним числом, проєкції якого $v_{m1}, v_{m2}, v_{m3}, v_{m4}$ унормуємо на одиничному відрізку дійсної осі, скориставшись виразом

$$\sum v_{mi} = v_{m1} + v_{m2} + v_{m3} + v_{m4}, \quad (14)$$

на який ділимо кожен з проєкцій.

Унормовані проєкції власного вектора v_m і задаватимуть вагу кожного критерію за багатокритеріальної оптимізації, тобто, матимемо

$$g_1 = \frac{v_{m1}}{\sum v_{mi}}; g_2 = \frac{v_{m2}}{\sum v_{mi}}; g_3 = \frac{v_{m3}}{\sum v_{mi}}; g_4 = \frac{v_{m4}}{\sum v_{mi}}. \quad (15)$$

Для реалізації викладеної вище процедури, як і в роботах [5], [6], використаємо комп'ютерну програму, написану мовою Python на основі інформації, почерпнутої з посібників [9], [10], у вигляді:

```
In [1]: import numpy as np
In [2]: import scipy.linalg as la
In [3]: C=np.array ([[1,2,3,9],[1/2,1,4,8],[1/3,1/4,1,4],[1/9,1/8,1/4,1]])
In [4]: c,v=la.eig(C)
In [5]: c,v
Out[5]:
(array([ 4.11765173+0.j      , -0.02814585+0.69296652j,
        -0.02814585-0.69296652j, -0.06136003+0.j      ]),
 array([[ 0.7809248 +0.j      ,  0.75401525+0.j      ,
         0.75401525-0.j      , -0.9413758 +0.j      ],
        [ 0.58125139+0.j      , -0.17121471+0.6000043j ,
        -0.17121471 -0.6000043j ,  0.27440971+0.j      ],
        [ 0.21815858+0.j      , -0.1740288 -0.09998598j,
        -0.1740288 +0.09998598j, -0.16563252+0.j      ],
        [ 0.06863034+0.j      ,  0.0099198 -0.04194926j,
         0.0099198 +0.04194926j,  0.10524631+0.j      ]]))
In [6]: c.max( )
Out[6]: (4.117651729422716+0j)
In [7]: i=c.argmax( ); i
Out[7]: 0
In [8]: vm=v[:,i];vm
Out[8]: array([0.7809248 +0.j, 0.58125139+0.j, 0.21815858+0.j, 0.06863034+0.j])
In [9]: vm.sum( )
Out[9]: (1.6489650967247262+0j)
In [10]: g1=vm[0]/vm.sum( );g1
Out [10]: (0.4735847937556173+0j)
In [11]: g1=np.real(g1).round(3);g1
Out[11]: 0.474
In [12]: g7=vm[1]/vm.sum( );g7
Out[12]: (0.3524946585313307+0j)
In [13]: g7=np.real(g7).round(3);g7
Out[13]: 0.352
In [14]: g3=vm[2]/vm.sum( );g3
Out[14]: (0.13230029919993777+0j)
In [15]: g3=np.real(g3).round(3);g3
Out[15]: 0.132
In [16]: g4=vm[3]/vm.sum( );g4
Out[16]: (0.04162024851311422+0j)
In [17]: g4=np.real(g4).round(3);g4
Out[17]: 0.042
```

Підставляючи значення g_1, g_7, g_3, g_4 на відповідні місця у вираз (11), отримаємо конкретизовану нечітку множину \tilde{K} , якою визначається вага кожного критерію $K_i, i = 1, 7, 3, 4$ як лінгвістичної змінної у вигляді

$$\tilde{K} = \left\{ \frac{0.474}{K_1}, \frac{0.352}{K_7}, \frac{0.132}{K_3}, \frac{0.042}{K_4} \right\}. \quad (16)$$

Висновки

- Зіставлено вісім критеріїв оцінки результатів системного аналізу проєкту «Плану відновлення України: Енергетика» в напрямку інтеграції в енергетику її відновлювальних джерел у вигляді таких інтегральних показників, як: 1) загальна кількість згенерованої активної потужності P_g ; 2) загальна кількість згенерованої реактивної потужності Q_g ; 3) вартість ϖ_p одного кіловату згенерованої активної потужності; 4) вартість ϖ_Q одного кіловару згенерованої реактивної потужності; 5) загальні втрати ΔP_{gc} активної потужності при її передаванні від джерел генерації до споживачів; 6) якість W_g згенерованої електроенергетичної потужності; 7) надійність H_{es} електроенергетичної системи; 8) живучість J_{es} електроенергетичної системи.

Визначено які з цих восьми критеріїв для розв'язання задачі багатокритеріальної оптимізації проєкту «Плану відновлення України: Енергетика» в напрямку інтеграції в енергетику її відновлювальних джерел необхідно використовувати як критерії оптимізації, а які необхідно включати в множини обмежень.

З використанням теорії нечітких множин та лінгвістичної змінної визначено вагу кожного критерію, що використовуватиметься для розв'язання задачі багатокритеріальної оптимізації проєкту «Плану відновлення України: Енергетика» в напрямку інтеграції в енергетику її відновлювальних джерел.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Б. І. Мокін, О. Б. Мокін, і Д. О. Шалагай, «Перші два етапи системного аналізу плану відбудови енергетики України в напрямку інтеграції в неї відновлювальних джерел.» *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 2, с. 42-47, 2023. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2023-167-2-42-48>.
- [2] Урядовий портал, *Робочі групи/Національна рада з відновлення України від наслідків війни*. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.kmu.gov.ua/diyalnist/nacionalna-rada-z-vidnovlennya-ukrayini-vid-naslidkiv-vijni/robochi-grupi>.
- [3] Національна рада з відновлення України, *Проект Плану відновлення України, 2022*, 164 с. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.kmu.gov.ua/storage/app/sites/1/recoveryrada/ua/restoration-and-development-of-infrastructure.pdf>.
- [4] Б. І. Мокін, і О. Б. Мокін, *Методологія та організація наукових досліджень*, навч. посіб. Вінниця: ВНТУ, 2015, 317 с. [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://mokin.com.ua/pedagogical/posibn/6504.html#.WODckWe_4fU.
- [5] Б. І. Мокін, О. Б. Мокін, і О. О. Войцеховська, «Про один з підходів до системного планування розвитку університету на основі нечіткого варіанта багатокритеріальної оптимізації.» *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 5, с. 108-116, 2021. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2021-158-5-108-116>.
- [6] Б. І. Мокін, О. Б. Мокін, і О. О. Войцеховська, «Нечіткий варіант багатокритеріальної оптимізації в умовах критеріального антагонізму.» *Оптимальне керування електроустановками (OKEU 2021)*, V Міжнародна науково-технічна конференція, Вінниця, 2021, с. 177-178. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://conferences.vntu.edu.ua/public/files/okeu/okeu2021_publ.pdf.
- [7] R. E. Bellman, and L. A. Zadeh, "Decision-Making in Fuzzy Environment," *Management Science*, vol. 17, no. 4, pp. 141-160, 1970.
- [8] H. J. Zimmermann, *Fuzzy Set Theory and its Applications*, 3rd ed. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1996.
- [9] Б. І. Мокін, В. Б. Мокін, і О. Б. Мокін, *Навчальний посібник для опанування студентами способів розв'язання задач з функціонального аналізу мовою Python*, ч. 1. Вінниця: ВНТУ, 2022, 124 с.
- [10] Б. І. Мокін, В. Б. Мокін, і О. Б. Мокін, *Навчальний посібник для опанування студентами способів розв'язання задач з функціонального аналізу мовою Python*, ч. 2. Вінниця: ВНТУ, 2023, 139 с.

Рекомендована кафедрою системного аналізу та інформаційних технологій ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 28.08.2022

Мокін Борис Іванович — академік НАПН України, д-р техн. наук, професор, професор кафедри системного аналізу та інформаційних технологій, e-mail: borys.mokin@gmail.com ;

Мокін Олександр Борисович — д-р техн. наук, професор, професор кафедри системного аналізу та інформаційних технологій, e-mail: abmokin@gmail.com ;

Шалагай Дмитро Олександрович — аспірант кафедри системного аналізу та інформаційних технологій, e-mail: d.shalagai@gmail.com .

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

B. I. Mokin¹
O. B. Mokin¹
D. O. Shalagai¹

Determination of the Priority of Criteria in the Problem of System Analysis of the Energy Sector Restoration Plan of Ukraine, Integrating in it the Renewable Sources

¹Vinnitsia National Technical University

The essence and significance of each of the 8 evaluation criteria for the results of the systemic analysis of the project “Ukraine Recovery Plan: Energy” in the direction of integrating its renewable energy sources into the energy sector have been revealed. These criteria are represented as integral indicators proposed by the authors in their previous work, such as: total amount of generated active power, total amount of generated reactive power, cost of one kilowatt of generated active power, cost of one kilovolt-ampere of generated reactive power, total losses of active power during transmission from generation sources to consumers, quality of generated power, reliability of the power system, and resilience of the power system. It has been determined which of these 8 criteria need to be used as optimization criteria and which ones need to be included in the set of constraints when solving the multi-criteria optimization problem of the project “Ukraine Recovery Plan: Energy” in the direction of integrating its renewable energy sources into the energy sector. Using fuzzy set theory and linguistic variables with specification in the form of the Bellman–Zadeh procedure and the Saaty pairwise comparison matrix of options generalized in the methodology proposed by Ukrainian professor Sergiy Shtovba, the weight of each criterion to be used in solving the multi-criteria optimization problem of the project “Ukraine Recovery Plan: Energy” in the direction of integrating its renewable energy sources into the energy sector has been determined. A computer program has been developed in Python language that automates the process of determining the weight and, consequently, the priority of each criterion in solving the multi-criteria optimization problem of the project “Ukraine Recovery Plan: Energy” in the direction of integrating its renewable energy sources into the energy sector.

Keywords: project plan, energy, renewable sources, optimization criteria, priorities, fuzzy sets, Bellman–Zadeh procedure, Shtovba methodology.

Mokin Borys I. — Academician of NAPS of Ukraine, Dr. Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Chair of System Analysis and Information Technologies, e-mail: borys.mokin@gmail.com ;

Mokin Oleksandr B. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Chair of System Analysis and Information Technologies, e-mail: abmokin@gmail.com ;

Shalagai Dmytro O. — Post-Graduate Student of the Chair of System Analysis and Information Technologies, e-mail: d.shalagai@gmail.com