

Савченко Наталя Панасівна, Кандидат технічних наук, доцент, кафедра мехатроніки та електротехніки, Тел. +380509747355, E-mail: n.p.savchenko@khai.edu, ORCID: 0000-0001-7046-0633.

Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»

Довгалиук Оксана Миколаївна, Кандидат технічних наук, доцент, Навчально-науковий інститут енергетики, електроніки та електромеханіки, кафедра передачі електричної енергії, Тел. +380509747355, E-mail: Oksana.Dovhaliuk@khpі.edu.ua, ORCID: 0000-0003-1994-619X

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, Харків, Україна, 61002.

ПРИНЦИПИ ФОРМУВАННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ СТРУКТУРИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ З КОМПЛЕКСНИМ ВИКОРИСТАННЯМ ДЖЕРЕЛ РОЗОСЕРЕДЖЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ

Анотація. В статті представлено результати розробки оптимальної конфігурації гібридної електроенергетичної системи розосередженої генерації з урахуванням енергетичного потенціалу альтернативної енергетики на території України. Розглянуті питання подальшого розвитку розосередженої енергетики, що базуються на впровадженні гібридних систем з відновлювальними джерелами розосередженої генерації енергії. Проведено аналіз потенціалу технологій альтернативної енергетики в Україні. Виконано порівняння ефективності впровадження різних видів джерел альтернативної енергетики методом аналізу ієрархій з метою виявлення їх рівня перспективності використання у комплексних системах розосередженої генерації. Розроблена загальна оптимальна структура електроенергетичної системи розосередженої генерації. Запропоновано метод оптимізації складу комплексних електроенергетичних систем розосередженої генерації з відновлюваними джерелами енергії на основі експертного аналізу енергоефективності та потенціалу розвитку сучасних технологій альтернативної енергетики в Україні. Застосування виконаних досліджень дозволить підвищити надійність роботи систем розосередженої генерації та їх енергоефективність при гібридному використанні відновлюваних джерел електроенергії за умови повної автоматизації керування системою та оптимізації її структури.

Ключові слова: відновлювальні джерела електроенергії, розосереджена генерація, ієрархічна структура, метод аналізу ієрархій, критерій впливу, вектор пріоритетів, альтернатива.

Savchenko Natalia P., Ph.D. technical Sciences, associate professor, Department of Mechatronics and Electrical Engineering, Tel. +380509747355; E-mail: n.p.savchenko@khai.edu; ORCID: 0000-0001-7046-0633

National Aerospace University named after M. E. Zhukovsky "Kharkiv Aviation Institute"

Dovgaluk Oksana M., Ph.D. technical Sciences, associate professor, Educational and Scientific Institute of Energy, Electronics and Electromechanics, Department of electrical energy transmission, Tel. +380509747355; E-mail: Oksana.Dovhaliuk@khpі.edu.ua, ORCID: 0000-0003-1994-619X

National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», 2 Kyrpychova str., 61002, Kharkiv, Ukraine.

PRINCIPLES OF FORMING THE OPTIMAL STRUCTURE OF THE ELECTRIC POWER SYSTEM WITH THE INTEGRATED USE OF DISTRIBUTED GENERATION SOURCES

Abstract. The article presents the results of developing the optimal configuration of a

hybrid electric power system of distributed generation, taking into account the energy potential of alternative energy in Ukraine. The issues of further development of distributed energy based on the introduction of hybrid systems with renewable sources of distributed energy generation are considered. The potential of alternative energy technologies in Ukraine is analyzed. A comparison of the efficiency of implementation of different types of alternative energy sources by the method of hierarchy analysis is carried out in order to identify their level of prospects for use in complex systems of distributed generation. The general optimal structure of the electric power system of distributed generation is developed. A method for optimizing the composition of integrated distributed generation power systems with renewable energy sources based on expert analysis of energy efficiency and the potential for the development of modern alternative energy technologies in Ukraine is proposed. The application of the performed research will increase the reliability of distributed generation systems and their energy efficiency in the hybrid use of renewable energy sources, provided that the system control is fully automated and its structure is optimised.

Keywords: *renewable energy sources, distributed generation, hierarchical structure, hierarchy analysis method, impact criterion, priority vector, alternative.*

Постановка проблеми. Україна має значний енергетичний потенціал з розвитку відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), розвиток якого призводить до досить великого впливу на зміну структури усієї енергетичної галузі у майбутньому. На сьогодні у світовій практиці широке розповсюдження отримала ідея стосовно впровадження систем розосередженої генерації, яка сприяє енергетичній незалежності як держави в цілому, так і кожного окремого споживача [1]. Впровадження систем розосередженої генерації у час, коли енергосистема країни знаходиться у кризових умовах роботи, є першочерговою задачею. Принципи формування та побудови таких систем є багатофакторною задачею, яку потрібно вирішувати методом індивідуального підходу у кожному окремому випадку. Тому розробка оптимальної структури електроенергетичної системи з використанням джерел альтернативної енергії є трендовим питанням у сучасних реаліях енергетики України і потребує всеосяжного дослідження та вирішення.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Відновлювальна енергетика як основа енергосистем з розосередженою генерацією – це фактично ключ до рішення багатьох проблем енергетичної галузі. Повна перебудова енергетичного сектору та його декарбонізація є основним питанням, що повинно відобразитися у перспективних планах розвитку та відновлення енергетики країни.

Партнерство між Україною та ЄС в сфері інновацій відновлюваної енергетики та їх широкого впровадження відкриває нові можливості та перспективи для всіх країн. Тому, згідно «Енергетичної стратегії України до 2035 року» та «Плану відновлення України», передбачається значне зростання генерації електроенергії щонайменше до 45% від повного спектру ВДЕ, а в кінцевому споживанні енергії, включаючи транспорт і опалення, частка ВДЕ має бути не менше 35% [2, 3].

Характерною особливістю відновлюваної енергетики є безпосереднє розміщення ВДЕ біля споживачів, що сприяє нарощенню темпів переходу від централізованого електропостачання до розосередженого. Такий перехід характеризується як позитивними, так і негативними явищами, які виявлялись і досліджувались в ряді наукових публікацій:

- впровадження розосередженої генерації розвантажує як основну живильну, так і розподільну мережу, що також значно знижує втрати потужності і, відповідно, електричної енергії, а також підвищує надійність і стійкість роботи енергосистеми [4-8];

- джерела розосередженої генерації мають неоднозначний вплив, тобто як позитивний, так і негативний, на якість електроенергії за рівнями напруги і за спотворенням синусоїдальності форми кривої напруги [9, 10];

- зростання величини струмів короткого замикання при підключенні ВДЕ до розподільної мережі призводить до потреби осучаснення комутаційних апаратів та зміни налаштувань захистів [11, 12];

- поява і активне впровадження розосередженої генерації сприяли активізації розвитку сучасної технології Smart Grid, фактично перетворивши енергетичну інфраструктуру старого типу на сучасну цифрову систему, в яку інтегровані Комунікаційні технології, а також технології для збору інформації про виробництво, передачу та споживання електроенергії, ефективного контролю та управління мережею на місцевому рівні [13-16]. Таким чином, централізоване диспетчерське керування енергосистемою

повільно передає свої функції з управління на локальні рівні.

Важливою стає роль розподіленої генерації при забезпеченні роботи енергетичного сектора країни під час повномасштабного військового вторгнення російських загарбників в Україну, забезпечуючи живлення споживачів після пошкодження об'єктів енергетичної інфраструктури через обстріли високовольтних мереж, трансформаторних підстанцій, диспетчерських пунктів, а також електростанцій та об'єктів відновлюваної енергетики. Дослідження стану об'єктів енергетики, аналізу їх роботи та підвищенню значущості розподіленої генерації у воєнний час присвячені роботи [17, 18], в яких зазначається, що в той час, коли частка джерел генерації була знищена, а понад 30 % ВДЕ опинились на окупованій території, джерела розподіленої генерації невеликої потужності стали активно застосовуватись для покриття потреб як окремих домогосподарств, так і для промислових підприємств різних галузей. За таких умов подальший розвиток ВДЕ та застосування систем накопичення енергії в Україні може відігравати ключову роль в забезпеченні надійної і стійкої роботи енергетичного сектору, а також у подальшому його відновленні [19, 20].

Основним недоліком усіх ВДЕ є залежність генерації від кліматичних умов у місці розташування і єдиним рішенням цієї проблеми є гібридизація системи з метою дублювання джерел розосередженої генерації. При цьому важливо обґрунтовано обирати оптимальний склад системи розосередженої генерації з урахуванням потреб споживачів.

Мета дослідження. Розробка оптимальної конфігурації гібридної Електроенергетичної системи розосередженої генерації з урахуванням енергетичного потенціалу альтернативної енергетики на території України.

Виклад основного матеріалу дослідження. *Потенціал альтернативної енергетики в Україні.* Сучасні перспективи розвитку енергетичної галузі України направлені на збільшення частки відновлюваних джерел у процесі генерації електричної енергії. Фактично цей напрямок є

пріоритетним завдяки наявності значного енергетичного потенціалу практично невичерпного та екологічно чистого ресурсу відновлюваних джерел енергії та енергоефективності сучасних технологій [21, 22]. Можна з впевненістю констатувати, що подальший розвиток електроозаощаджуючих технологій відновлюваної енергетики досить швидко призведе до поступової заміни традиційних методів генерації електроенергії на ВДЕ як у світі, так і безпосередньо в Україні.

Енергетичною стратегією України до 2035 р. передбачено збільшення частки «зеленої» енергії до 25 % у енергетичному балансі, зниження імпортозалежності енергетичної галузі з 51 % у 2015 р. до 33 % у 2035 р., а також повноцінна інтеграція з енергетичною системою ЄС [2].

Бурхливий розвиток за останні роки в Україні набула відновлювана енергетика на основі вітрових та сонячних електростанцій, яких протягом останніх 5 років побудовано понад 15. Також стабільними темпами розвивається мала гідроенергетика та має помітне збільшення частка джерел генерації енергії на основі використання біомаси.

Річні показники технічно досяжного енергетичного потенціалу основних напрямів освоєння енергії відновлюваних джерел в Україні наведені у табл.1 [21].

Таблиця 1.

Енергетичний потенціал ВДЕ в Україні.

Напрями освоєння енергії ВДЕ	Потенціал встановленої потужності ВДЕ, МВт	Потенціал середньорічного виробітку електроенергії за рахунок ВДЕ, млн кВт·год/рік
Сонячна енергетика	82768	99323
Вітроенергетика	688000	2173770
Мала гідроенергетика	376	1272
Геотермальна енергетика	10810	80494
Енергетика біомаси	92078	362161
Разом	874 000	2217·10 ³

Аналіз даних, наведених у табл. 1, дозволяє зробити висновок, що

Україна має досить великий енергетичний потенціал з ВДЕ і відповідно темпи зростання впровадження відновлюваної енергетики з кожним роком будуть набирати обертів, чому також сприяє державна політика.

За даними Держенергоефективності в Україні працює 23110 об'єктів відновлюваної електроенергетики, які працюють згідно концепції програми розподіленої «зеленої» генерації за державною програмою «зелений тариф» із загальною потужністю 6932 МВт, з них [21]:

- 852 СЕС загальною потужністю 4 925 МВт;
- 69 ВЕС загальною потужністю 1 170 МВт;
- 21968 СЕС приватних домогосподарств загальною потужністю 553 МВт;
- 157 МГЕС загальною потужністю 114 МВт;
- 49 електростанції на біогазі загальною потужністю 86 МВт;
- 15 електростанцій на біомасі загальною потужністю 84 МВт.

Слід також зазначити, що в Україні розроблено концепцію програми підтримки розподіленої «зеленої» генерації, яка сприятиме розвитку сектору альтернативної енергетики. За таких умов важливим стає обґрунтований вибір складу ВДЕ в структурі енергосистеми з аналізом ефективності їх подальшого функціонування в конкретних технічних, економічних та кліматичних умовах.

Дослідження ефективності впровадження технологій ВДЕ методом аналізу ієрархій. Метод аналізу ієрархій (МАІ) застосовують з метою виводу шкал відношень як з дискретних, так й з безперервних парних порівнянь у багаторівневих ієрархічних структурах. МАІ має як специфічні аспекти, так і спеціалізовані особливості, які мають зв'язок з відхиленням суджень від узгодженості та з виміром цього відхилення, а також із залежністю всередині груп (рівней) та між групами елементів ієрархічної структури. [23, 24] МАІ дає ієрархічне представлення системи, яке можна використовувати для детального опису впливу зміни пріоритетів на верхніх рівнях системи на пріоритети складових елементів нижніх рівнів. Фактично ієрархії надають

повну інформацію про структуру та функції досліджуваної системи здебільшого на нижніх рівнях, при цьому характеристики ієрархії стійкі і гнучкі. Стійкість ієрархічної системи виражається в тому сенсі, що навіть малі зміни відповідно викликають малий ефект, а гнучкість прослідковується в тому, що додавання елементів до добре сформованої та структурованої ієрархії практично не руйнують її характеристик. Таким чином, усі природні системи, що мають ієрархічний склад, а саме модульну побудову зі збіркою модулів, є набагато ефективнішими, ніж системи, зібрані в цілому [24, 25].

Організація дослідження та аналізу процесів за допомогою МАІ виконується у наступній послідовності: спочатку будується ієрархічна або мережева структура, що відповідає представленню задачі; наступним кроком є попарне порівняння елементів розробленої структури з метою отримання матриці домінування та виводу на їх основі шкали відношень. [24] Згідно МАІ, розробленого Т. Сааті, найпростіша ієрархічна структура повинна мати як мінімум три рівні: перший рівень – це ціль, яка аналізується з точки зору її найефективнішого досягнення, другий рівень – критерії впливу, від яких залежать усі наступні рівні, третій або самий низький рівень – перелік усіх можливих альтернатив. Таким чином, для моделювання процесу аналізу ефективності впровадження ВДЕ за допомогою МАІ наведемо ієрархічну структуру на рис. 1, яка пов'язує критерії оцінки характеристик енерготехнологій, що мають вплив на ранжування альтернатив у вигляді видів ВДЕ.

Для складання ієрархічної структури були проаналізовані критерії впливу та визначені види ВДЕ як альтернативи з урахуванням порівняльного аналізу даних, наведених у табл.1. У моделі прийняті наступні позначення рівнів:

1. Перший рівень – а. Мета, або головний критерій (ефективність впровадження технології ВДЕ).

2. Другий рівень – в, с, d, e, f. Критерії впливу на вибір.

3.Третій рівень – А, В, С, D, E. Альтернативи досягнення мети (види ВДЕ: фотоелектрична установка (ФЕУ), вітроенергетична установка (ВЕУ), мала гідроелектростанція (МГЕС), біоенергетична установка (БЕУ), геотермальна установка (ГТУ)).

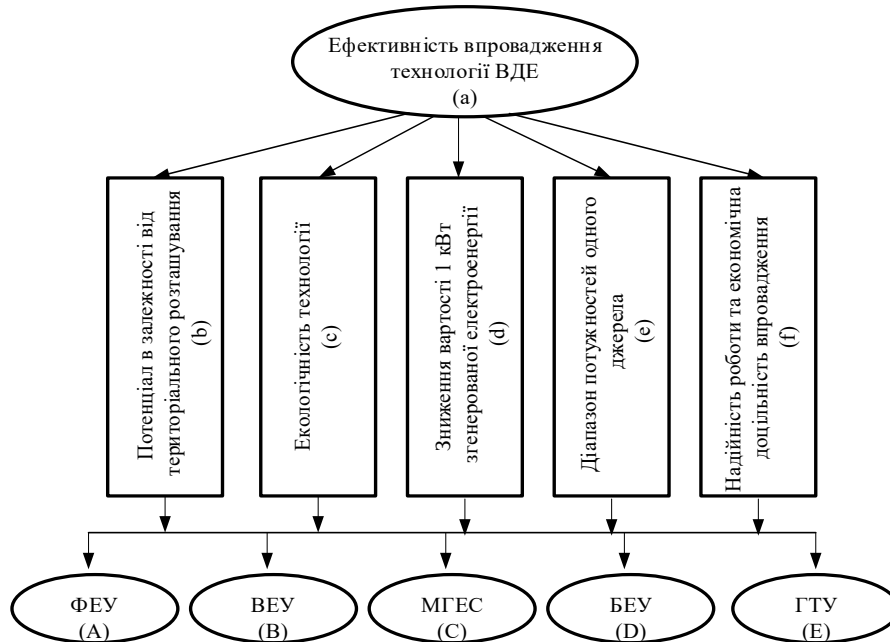


Рис. 1 - Модель ієрархічної структури визначення ефективності впровадження технологій ВДЕ

Наступним кроком МАІ є складання алгоритму досягнення мети, тобто визначення впливу критеріїв на систему в цілому. Відповідно до методики МАІ, необхідно скласти матриці попарних порівнянь критеріїв з використанням шкали відносної важливості, розробленої Т. Сааті [24], потім виконати перехід від складених матриць до векторів пріоритетів та перевірити якість матриць попарних порівнянь виконавши розрахунок індексу узгодженості [25].

Згідно наведеної вище методики, складемо матриці попарних порівнянь критеріїв [X], що відповідають моделі ієрархічної структури на рис.1 на прикладі альтернативи досягнення мети (А).

Для критеріїв складаємо матрицю попарних порівнянь відносно головного критерію у вигляді виразу:

$$A(bcdef)a. \quad (1)$$

Для усіх складених матриць попарних порівнянь $[X]$ необхідно виконати перехід до векторів пріоритетів [8]. Розрахунок нормованого власного вектора W кожної позитивної квадратної матриці $[M]$ повинен проводитися за рівнянням наведеним нижче [24, 25]:

$$XW = \lambda_m W, \quad (2)$$

де λ_m - максимальне власне значення матриці $[X]$.

Для позитивної квадратної матриці $[X]$ правий власний вектор W , що відповідає максимальному власному значенню, з точністю до постійного співмножника C розраховують по формулі [24]:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \frac{[X]^k e}{e^T [X]^k e} = CW, \quad (3)$$

де $e = \{1, 1, 1, \dots, 1\}^T$ - одиничний вектор; $k = 1, 2, 3, \dots$ - показник ступеня; C - константа; T - знак транспонування.

Визначення власного вектора W повинно виконуватися до досягнення завданої точності методом ітерацій.

З урахуванням вищенаведених формул максимальне власне значення матриці $[X]$ можливо за виразом:

$$\lambda_{\max} = e^T [X] W. \quad (4)$$

Таким чином, перехід від матриці попарних порівнянь $[X]$ до вектору пріоритетів описується виразом:

$$A(bcdef)a \rightarrow W(bcdef)a. \quad (5)$$

Перевірка якості матриць попарних порівнянь $[X]$ оцінюється

показниками [24]:

1. індекс узгодженості (ІУ):

$$IU = (\lambda_m - n)/(n - 1); \tag{6}$$

2. відношення узгодженості (ВУ)

$$BU = IU/M(IU), \tag{7}$$

де $M(IU)$ – середнє значення (математичне очікування) індексу узгодженості випадковим образом складеної матриці парних порівнянь [X].

Припустимим значенням показника відношення узгодженості є $BU \leq 0,10$ [24].

Наведені залежності МАІ, що складені відповідно до ієрархічної структури на рис.1 дозволяють ранжувати ВДЕ за ефективністю впровадження.

Метод МАІ базується на експертних даних, які необхідні для складання матриці попарних порівнянь критеріїв [X] та матриць порівняння альтернатив відносно впливу кожного критерію.

Матриця попарних порівнянь критеріїв з метою їх ранжування стосовно впливу на досягнення мети, наведена у табл.2.

Таблиця 2

Матриця попарних порівнянь критеріїв.

Мета(a)	К(b)	К(c)	К(d)	К(e)	К(f)	Нормовані оцінки вектора пріоритета	Ранг
К(b)	1	5	3	2	3	0,421	1
К(c)	1/5	1	2	4	1	0,188	3
К(d)	1/3	1/2	1	2	1/3	0,109	4
К(e)	1/2	1/4	1/2	1	1/2	0,086	5
К(f)	1/3	1	3	2	1	0,196	2
Сума	2,14	7,75	9,5	11,0	5,83	1,0	
Індекс узгодженості $IU=0,1075$							
Відношення узгодженості $BU=0,096=9,6\%$							

Згідно розрахунків, наведених у табл.2, маємо $VU=0,096 \leq 0,10$ і це практично доводить, що експертні оцінки в матриці є повністю узгодженими і не потребують подальшого перегляду. Слід зазначити, що головним результатом попарних порівнянь для досягнення мети є визначення важливості альтернатив, тому необхідно провести порівняння значимості результатів по кожному критерію узгодженості. У табл.3-7 приведені розрахунки значень пріоритетів альтернатив в залежності від критеріїв. У табл.8 зведене ранжування альтернатив.

Таблиця 3

Матриця попарних порівнянь альтернатив стосовно критерію К(б).

К(б)	A(A)	A(B)	A(C)	A(D)	A(E)	Нормовані оцінки вектора пріоритета
A(A)	1	1	3	5	3	0,345
A(B)	1	1	2	5	2	0,295
A(C)	1/3	1/2	1	5	2	0,179
A(D)	1/5	1/5	1/5	1	1/5	0,045
A(E)	1/3	1/2	1/2	5	1	0,136

Таблиця 4

Матриця попарних порівнянь альтернатив стосовно критерію К(с).

К(б)	A(A)	A(B)	A(C)	A(D)	A(E)	Нормовані оцінки вектора пріоритета
A(A)	1	2	2	7	1	0,317
A(B)	1/2	1	2	5	1/2	0,195
A(C)	1/2	1/2	1	5	1	0,170
A(D)	1/7	1/5	1/5	1	1/7	0,042
A(E)	1	2	1	7	1	0,276

Матриця попарних порівнянь альтернатив стосовно критерію К(d).

K(b)	A(A)	A(B)	A(C)	A(D)	A(E)	Нормовані оцінки вектора пріоритета
A(A)	1	2	2	5	7	0,405
A(B)	1/2	1	1/2	3	5	0,197
A(C)	1/2	2	1	5	4	0,275
A(D)	1/5	1/3	1/5	1	2	0,073
A(E)	1/7	1/5	1/4	1/2	1	0,050

Матриця попарних порівнянь альтернатив стосовно критерію К(e).

K(b)	A(A)	A(B)	A(C)	A(D)	A(E)	Нормовані оцінки вектора пріоритета
A(A)	1	1/4	1/3	1/5	1/3	0,055
A(B)	4	1	1/2	1/7	1/3	0,094
A(C)	3	2	1	1/2	2	0,224
A(D)	5	7	2	1	3	0,457
A(E)	3	3	1/2	1/3	1	0,170

Матриця попарних порівнянь альтернатив стосовно критерію К(f).

K(b)	A(A)	A(B)	A(C)	A(D)	A(E)	Нормовані оцінки вектора пріоритета
A(A)	1	5	2	5	7	0,461
A(B)	1/5	1	1/3	2	5	0,132
A(C)	1/2	3	1	3	5	0,267
A(D)	1/4	1/2	1/3	1	5	0,105
A(E)	1/7	1/5	1/5	1/5	1	0,035

Визначення важливості альтернатив.

Альтернатива	K(b)	K(c)	K(d)	K(e)	K(f)	Оцінка важливості альтернативи	Ранг
A(A)	0,345	0,317	0,405	0,055	0,461	1,583	1
A(B)	0,295	0,195	0,197	0,094	0,132	0,913	3
A(C)	0,179	0,170	0,275	0,224	0,267	1,115	2
A(D)	0,045	0,042	0,073	0,457	0,105	0,722	4
A(E)	0,136	0,276	0,050	0,170	0,035	0,067	5

За результатами обчислень важливості альтернатив у табл.8 маємо підтвердження, що на сьогодні найбільш розвиненими та ефективними є технології ФЕУ, ВЕУ та МГЕС. Таким чином, до складу гібридної системи розподіленої генерації доцільно включати саме ці ВДЕ.

Розробка оптимальної структури системи розосередженої генерації з ВДЕ. Вагомим загальним недоліком практично всіх ВДЕ є нестабільність генерації електроенергії, що зажить від багатьох факторів, тому створення гібридних систем альтернативної енергетики з метою дублювання джерел живлення та підвищення загальної встановленої потужності системи є цілком логічним питанням сучасності [26, 27].

Гібридизація систем розосередженої генерації дозволяє отримати у сукупності структуру з усіма перевагами окремих ВДЕ та практично з повною нейтралізацією недоліків, що веде до підвищення надійності електропостачання і якості параметрів електричної енергії.

Узагальнена оптимальна структура, що відповідає отриманим результатам аналізу ефективності видів ВДЕ наведена на рис. 2.

На рис. 2 прийняті наступні позначення: МГЕС – мала гідроелектростанція; ВЕУ – вітроенергетична установка; ФЕУ – фотоелектрична установка; АБ – акумуляторні батареї; КЗ – контролер заряду; МСК – мікропроцесорна система керування; СПС – споживачі

постійного струму; СЗС – споживачі змінного струму; АБН – автобаластне навантаження; АС – шина змінного струму; DC – проміжна шина постійного струму; AC/DC, DC/DC, DC/AC – керовані перетворювачі.

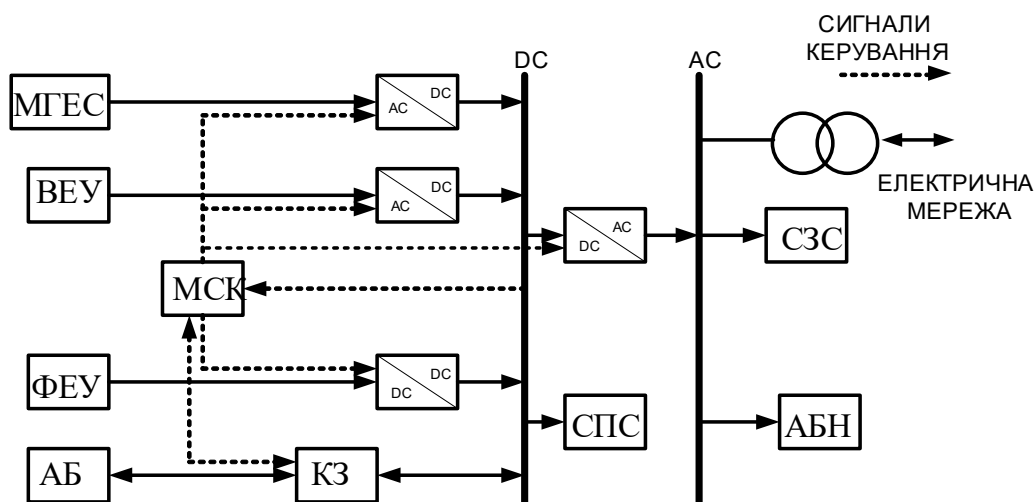


Рис. 2 - Узагальнена структура гібридної системи розосередженої генерації з ВДЕ

Розроблена система розосередженої генерації є повністю автоматизованою, що забезпечує повний контроль над процесами генерації, розподілення та споживання електричної енергії, тобто керування потоками електроенергії.

Також, до переваг складеної структури, слід віднести наявність проміжної шини постійного струму DC, що дозволяє додатково жити споживачів постійного струму СПС та синхронізувати параметри мережі при паралельній роботі ВДЕ, побудованих за різними енерготехнологіями за рахунок МСК-мікропроцесорної системи керування та AC/DC, DC/DC, DC/AC – керованих перетворювачів. Також, для забезпечення резерву потужності у системі розосередженої генерації передбачено підключення як складової - системи накопичення енергії, яка у якості накопичувальних елементів має акумуляторні батареї АБ.

Слід відзначити, що склад структури, наведеної на рис.2, корегується для кожного окремого випадку побудови з урахуванням наявності енергетичного

потенціалу енерготехнологій при розташуванні у обраній місцевості.

Висновки. Запропоновано оптимальну на сьогодні структуру комплексної електроенергетичної системи розосередженої генерації з ВДЕ. Виконаний порівняльний аналіз енерготехнологій побудови ВДЕ методом МАІ, показав суттєву перевагу з точки зору ефективності застосування у якості джерел електроенергії при побудові систем розосередженої генерації ФЕУ, ВЕУ та МГЕС. Застосування розробленої структури призведе до значного поліпшення показників ефективності роботи електричної мереж, таких як надійність, екологічність та якість електричної енергії.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК:

1. Савченко Н. П. Гібридні автономні системи електропостачання з малою гідроелектростанцією. *Débats scientifiques et orientations prospectives du développement scientifique: collection de papiers scientifiques «ΛΟΓΟΣ» avec des matériaux de la Vconference scientifique et pratique international*. 2023. С. 84 – 85.
2. Енергетична стратегія України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність : розпорядження Каб. Міністрів України від 18.08.2017 р. № 605-р. URL: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/605-2017-%D1%80>.
3. Проект Плану відновлення України. Матеріали робочої групи «Енергетична безпека» : розпорядженням Національної ради з питань відновлення України від наслідків війни затверджений від 01.07.2022. URL: <https://recovery.gov.ua>.
4. Кириленко О. В. Заходи та засоби перетворення енергетики України на інтелектуальну екологічно безпечну систему. *Вісник НАН України*. 2022. № 3. С 18-23.
5. Довгалюк О. М., Лазуренко О. П., Саїдов Ш. Н., Яковенко І. С. Вплив відновлюваних джерел енергії на роботу електроенергетичної системи. *Енергоефективність та енергетична безпека електроенергетичних систем (EEES-2018): матеріали II Всеукр. наук.-техн. конф.* 2018. С. 52-54.
6. Комар В. О., Остра Н. В., Кузьмик О. В., Гуцол С. В. Оцінка впливу розосередженого генерування на режим розподільних електричних мереж. *Наукові праці ДонНТУ. Серія: «Електротехніка і енергетика»*. 2013. № 1(13). С. 104-107.
7. Dovgalyuk O., Omelianenko H., Bondarenko R., Yakovenko I., Saidov S., Strilyaniy I. Analysis of operation modes of electric networks with solar power plants. *Intelligent Energy and Power Systems (IEPS): proceedings of 2020 IEEE 4th International Conference*. 2020. PP. 196-201. DOI: 10.1109/IEPS51250.2020.9263215.
8. Dovgalyuk O., Omelianenko H., Bondarenko R., Yakovenko I., Saidov S., Pryvalov Y. Analysis of the impact of wind power plants on electric networks operation modes. *KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek): proceedings of 2021 IEEE 2nd International Conference*. 2021. PP. 695-700. DOI: 10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570008.
9. Козакевич І. А., Котякова М. Г. Аналіз впливу джерел розосередженої генерації на якість електричної енергії. *Вісник Криворізького національного університету*. 2021. Вип. 52. С. 175–179.
10. Лежнюк П. Д., Комар В. О., Сікорська О. В. Розосереджене генерування в задачах підвищення енергоефективності розподільних електричних мереж : монографія. Вінниця : ВНТУ, 2023. 195 с.

11. Денисюк С. П., Стржелецьки Р., Богойко І. І., Стржелецька Н. Аналіз особливостей ефективного впровадження сонячних електростанцій в локальних системах енергозабезпечення. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2023. № 2. С. 7-25.
12. Bonacina F., Corsini A., Cardillo L., Lucchetta F. Complex network analysis of photovoltaic plant operations and failure modes. *Energies*. 2019. № 12(10). P. 1995. doi: 10.3390/en12101995.
13. Денисюк С. П., Рибій М. В. Формування складових оптимізаційних процедур в системах енергопостачання з гнучкою генерацією та активними споживачами енергії. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки*. 2020. № 2. Т. 31 (70). Ч. 1. С. 237-242.
14. Лежнюк П. Д., Буславець О. А. Застосування Smart Grid технологій для балансування режимів в локальних електричних системах. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства. Серія «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України»*. 2018. №195. С. 3-6.
15. Карталапов К. М., Чижевський В. В. Розподілена генерація та Smart Grid. *International scientific e-journal АЛОГОΣ. ONLINE*. 2020. № 16. doi: 10.36074/2663-4139.16.08.
16. Буткевич А.Ф., Зелинский Е. С. Интеллектуализация систем диспетчерского управления территориально распределенными электроэнергетическими объектами – основные задачи и их решение. *Технічна електродинаміка. Тематичний випуск «Силова електроніка та енергоефективність»*. 2001. № 3. С. 76-81.
17. Омельченко В. Сектор відновлюваної енергетики України до, під час та після війни. Центра Разумкова. URL: <https://razumkov.org.ua/statti/sektor-vidnovlyuvanoyi-energetyky-ukrayiny-do-pid-chas-ta-pislya-viyny>.
18. Завербний А., Кісь М., Білоус Ю. Проблеми і перспективи залучення зовнішніх інвестицій у проекти відновлювальної енергетики України у воєнний та післявоєнний періоди. *Економіка та суспільство*. 2023. 51. С. 1-9. doi: 10.32782/2524-0072/2023-51-10.
19. Денисюк С. П., Белоха Г. С., Чернещук І. С., Лисий В. В. Світові тенденції впровадження відновлюваних джерел енергії та особливості їх реалізації при відновленні економіки України. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2022. № 4. С. 7-23. doi: 10.20535/1813-5420.4.2022.273360.
20. Лукашевич Я. П., Євдокімов В. А. Обґрунтування задачі створення бази даних об'єктів «зеленої» енергетики України для визначення складових розвитку та механізмів підтримки галузі. *Зб. тез XL Наук.-техн. конф. молодих вчених та спеціалістів Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є.Пухова НАН України*. 2022. С.65-68.
21. Барило А. А. [та ін.] Відновлювані джерела енергії. Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАНУ. 2020. 392 с.
22. Савченко Н. П. Перспективи запровадження відновлювальної енергетики у сільському господарстві. *Проблеми енергоефективності та автоматизації в промисловості та сільському господарстві: міжнар. наук.-практ. on-line конф.* 2020. С. 54-56.
23. Ковальчук А. М., Абдул Разак Ш. Ф. Эффективность использования средств распределенной генерации (возобновляемых и традиционных) для условий республики Ирак. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2015. № 2. С. 87-94.
24. Saaty T. L. The analytic hierarchy and analytic network processes for the measurement of intangible criteria and for decision-making. Multiple criteria decision analysis: state of the art surveys. *International series in operations research & management science*. 2005. Vol. 78. P. 345-405.
25. Shevchenko S., Savchenko N. Analysis of risks while connecting to the power supply system of the administrative building of the kinetic energy storage unit for the purpose of load regulation. *Вісник тернопільського національного технічного університету*. 2017. № 3(87). С. 117-126.

26. Сінчук О. М., Краснопольський Р. І., Бойко С. М. Аспекти формування електроенергетичних систем з джерелами розосередженої генерації гірничорудних підприємств. *Вісник Криворізького національного університету*. 2020. № 50. С. 41-45.

27. Денисюк С. П. Аналіз та оптимізація енергопроцесів у розосереджених електроенергетичних системах. *Технічна електродинаміка*. 2016. № 4. С. 62-64.

REFERENCES:

1. Savchenko N. P. Hibrydni avtonomni systemy elektropostachannia z maloju hidroelektrostantsiieiu. *Débats scientifiques et orientations prospectives du développement scientifique: collection de papiers scientifiques «ΛΟΗΟΣ» avec des matériaux de la Vconférence scientifique et pratique internationale*, 2023, S. 84-85.

2. Enerhetychna stratehiia Ukrainy na period do 2035 roku «Bezpeka, enerhoefektyvnist, konkurentospromozhnist : rozporiadzhennia Kab. Ministriv Ukrainy vid 18.08.2017 r. № 605-r. Available at: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/605-2017-%D1%80>.

3. Proekt Planu vidnovlennia Ukrainy. Materialy robochoi hrupy «Enerhetychna bezpeka» : rozporiadzhenniam Natsionalnoi rady z pytan vidnovlennia Ukrainy vid naslidkiv viiny zatverdzenyi vid 01.07.2022. Available at: <https://recovery.gov.ua>.

4. Kyrlyenko O. V. Zakhody ta zasoby peretvorennia enerhetyky Ukrainy na intelektualnu ekolohichno bezpechnu systemu. *Visnyk NAN Ukrainy*, 2022, № 3, S 18-23.

5. Dovhaliuk O. M., Lazurenko O. P., Saidov Sh. N., Yakovenko I. S. Vplyv vidnovliuvanykh dzherel enerhii na robotu elektroenerhetychnoi systemy. *Enerhoefektyvnist ta enerhetychna bezpeka elektroenerhetychnykh system (EEES-2018): materialy II Vseukr. nauk.-tekhn. konf.* 2018, S. 52-54.

6. Komar V. O., Ostra N. V., Kuzmyk O. V., Hutsol S. V. Otsinka vplyvu rozoseredzhenoho heneruvannia na rezhym rozpodilnykh elektrychnykh merezh. *Naukovi pratsi DonNTU. Serii: «Elektrotekhnika i enerhetyka»*, 2013, 1(13), S. 104-107.

7. Dovgalyuk O., Omelianenko H., Bondarenko R., Yakovenko I., Saidov S., Strilyaniy I. Analysis of operation modes of electric networks with solar power plants. *Intelligent Energy and Power Systems (IEPS): proceedings of 2020 IEEE 4th International Conference*, 2020, P. 196-201. doi: 10.1109/IEPS51250.2020.9263215.

8. Dovgalyuk O., Omelianenko H., Bondarenko R., Yakovenko I., Saidov S., Pryvalov Y. Analysis of the impact of wind power plants on electric networks operation modes. *KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek): proceedings of 2021 IEEE 2nd International Conference*. 2021, P. 695-700. doi: 10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570008.

9. Kozakevych I. A., Kotiakova M. H. Analiz vplyvu dzherel rozoseredzhenoi heneratsii na yakist elektrychnoi enerhii. *Visnyk Kryvorizkoho natsionalnoho universytetu*, 2021, Vyp. 52, S. 175–179.

10. Lezhniuk P. D., Komar V. O., Sikorska O. V. Rozoseredzhene heneruvannia v zadachakh pidvyshchennia enerho-efektyvnosti rozpodilnykh elektrychnykh merezh: monohrafiia. Vinnytsia. VNTU, 2023. 195 s.

11. Denysiuk S. P., Strzheletsky R., Bohoiko I. I., Strzheletska N. Analiz osoblyvostei efektyvnogo vprovadzhennia soniachnykh elektrostantsii v lokalnykh systemakh enerhozabezpechennia. *Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohii, ekolohiia*, 2023, 2, S. 7-25.

12. Bonacina F., Corsini A., Cardillo L., Lucchetta F. Complex network analysis of photovoltaic plant operations and failure modes. *Energies*, 2019, 12(10), P. 1995. doi: 10.3390/en12101995.

13. Denysiuk S. P., Rybii M. V. Formuvannia skladovykh optymizatsiinykh protsedur v systemakh enerhopostachannia z hnuchkoju heneratsiieiu ta aktyvnymy spozhyvachamy enerhii. *Vcheni zapysky TNU imeni V.I. Vernadskoho. Serii: tekhnichni nauky*, 2020, № 2, V. 31 (70), Ch. 1, S. 237-242.

14. Lezhniuk P. D., Buslavets O. A. Zastosuvannia Smart Grid tekhnolohii dlia balansuvannia rezhymiv v lokalnykh elektrychnykh systemakh. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu silskoho hospodarstva. Seriia «Problemy enerhozabezpechennia ta enerhozberezhennia v APK Ukrainy»*, 2018, 195, S. 3-6.
15. Kartalapov K. M., Chyzhevskiy V. V. Rozpodilena heneratsiia ta Smart Grid. *International scientific e-journal АΟΗΟΣ. ONLINE*, 2020, 16. doi: 10.36074/2663-4139.16.08.
16. Butkevych A. F., Zelynskyi E. S. Yntellektualyzatsiia system dyspetcherskoho upravleniia terrytoryalno raspredelennimy elektroenerhetycheskymy ob'ektamy – osnovnie zadachy y ykh reshenye. *Tekhnichna elektro-dynamika. Tematychnyi vypusk «Sylova elektronika ta enerhoefektyvnist»*, 2001, 3, S. 76-81.
17. Omelchenko V. Sektor vidnovliuvanoi enerhetyky Ukrainy do, pid chas ta pislia viiny. Tsentra Razumkova. Available at: <https://razumkov.org.ua/statti/sektor-vidnovlyuvanoyi-energetyky-ukrayiny-do-pid-chas-ta-pislya-viyny>.
18. Zaverbnyi A., Kis M., Bilous Yu. Problemy i perspektyvy zaluchennia zovnishnikh investysii u proekty vidnovliuvalnoi enerhetyky ukrainy u voiennyi ta pisliavoiennyi periody. *Ekonomika ta suspilstvo*, 2023, 51, S. 1-9. doi: 10.32782/2524-0072/2023-51-10.
19. Denysiuk S. P., Bielokha H. S., Cherneshchuk I. S., Lysyi V. V. Svitovi tendentsii vprovadzhennia vidnovliuvanykh dzherel enerhii ta osoblyvosti yikh realizatsii pry vidnovlenni ekonomiky Ukrainy. *Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohii, ekolohiia*, 2022, 4, S. 7-23. doi: 10.20535/1813-5420.4.2022.273360.
20. Lukashevych Ya. P., Yevdokimov V. A. Obgruntuvannia zadachi stvorennia bazy danykh ob'ektiv «zelenoi» enerhetyky Ukrainy dlia vyznachennia skladovykh rozvytku ta mekhanizmv pidtrymky haluzi. *Zb. tez XL Nauk.-tekhn. konf. molodykh vchenykh ta spetsialistiv Instytutu problem modeliuvannia v enerhetytsi im. H.Ye. Pukhova NAN Ukrainy*. 2022, S. 65–68.
21. Barylo A. A. [ta in.] Vidnovliuvani dzherela enerhii. Kyiv. Instytut vidnovliuvanoi enerhetyky NANU. 2020. 392 s.
22. Savchenko N. P. Perspektivy zaprovadzhennia vidnovliuvalnoi enerhetyky u silskomu hospodarstvi. *Problemy enerhoefektyvnosti ta avtomatyzatsii v promyslovosti ta silskomu hospodarstvi : mizhnar. nauk.-prakt. on-line konf.* 2020, S. 54-56.
23. Kovalchuk A. M., Abdul Razak Sh. F. Efektyvnost yspolzovaniia sredstv raspredelennoi heneratsyy (vozobnovliaemikh y tradytsyonnykh) dlia uslovyi respublyky Yrak. *Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohii, ekolohiia*, 2015, 2, S. 87-94.
24. Saaty T.L. The analytic hierarchy and analytic network processes for the measurement of intangible criteria and for decision-making. Multiple criteria decision analysis: state of the art surveys. *International series in operations research & management science*, 2005, Vol. 78, P. 345-405.
25. Shevchenko S., Savchenko N. Analysis of risks while connecting to the power supply system of the administrative building of the kinetic energy storage unit for the purpose of load regulation. *Visnyk ternopilskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu*, 2017, 3(87), S. 117-126.
26. Sinchuk O. M., Krasnopolskyi R. I., Boiko S. M. Aspekty formuvannia elektroenerhetychnykh system z dzherelamy rozoseredzhenoii heneratsii hirnychorudnykh pidpriemstv. *Visnyk Kryvorizkoho natsionalnoho universytetu*, 2020, 50, S. 41-45.
27. Denysiuk S. P. Analiz ta optymizatsiia enerhoprotsesiv u rozoseredzhenykh elektroenerhetychnykh systemakh. *Tekhnichna elektrodynamika*, 2016, 4, S. 62-64.

Надійшла до редакції 05.07.2023 р.