



БАБАК
Віталій Павлович —
академік НАН України,
директор Інституту загальної
енергетики НАН України

ЗМІНИ В СТРУКТУРІ ЕНЕРГОСИСТЕМИ ТА ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ ЕНЕРГОРИНКУ В ПЕРІОД ВІДНОВЛЕННЯ УКРАЇНИ

За матеріалами доповіді на засіданні
Президії НАН України 12 червня 2024 року

У доповіді наведено найважливіші результати фундаментальних та прикладних досліджень Інституту загальної енергетики НАН України з розроблення принципово нової структури і основ функціонування електротеплової системи. Ця система об'єднує ОЕС України та системи централізованого теплопостачання шляхом електрифікації теплопостачання через використання енергії автономних ВДЕ та потужностей традиційної генерації електростанцій в електричних котлах, які не потребують нормованих показників якості електроенергії. Запропоновано новий принцип самодостатності функціонування ВЕС/СЕС, що досягається завдяки введенню в їх структуру системи накопичення енергії.

Ключові слова: відновлювані джерела енергії, електрифікація теплопостачання, системи накопичення енергії, розподілена генерація, принцип самодостатності.

Світова енергетика наразі переживає період бурхливого розвитку відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), передусім активного використання вітрових (ВЕС) і сонячних (СЕС) електростанцій у структурі генеруючих потужностей енергосистем. Досить тривалий час в Україні цей процес розвивався практично без урахування двох надзвичайно важливих факторів:

- 1) ВЕС та СЕС є джерелами із нестабільною генерацією;
- 2) за своєю технологічною природою ВЕС та СЕС не можуть забезпечувати нормовану стабільність частоти й потужності електроенергії, яку вони постачають в енергосистему. При цьому необхідні обсяги регулюючих потужностей вимушено залучалися з резервів первинного та вторинного регулювання, які забезпечені в кожній енергосистемі згідно з нормативними вимогами щодо стабілізації нормальних та аварійних режимів її функціонування.

Аналіз енергоекономічних показників функціонування Об'єднаної енергетичної системи (ОЕС) України, в структурі

якої використовують великі потужності ВЕС/СЕС, засвідчив [1, 2], що держава в особі ДП «Енергоринок» у поточному стані вже зазнає, а в майбутньому зазнаватиме ще більших збитків, обсяги яких неможливо компенсувати прибутками інших секторів економіки. Саме тому актуальним завданням є розроблення концептуально іншого підходу до принципів використання енергії ВЕС/СЕС, який сприяв би вирішенню загальнонаціональної проблеми, пов'язаної із забезпеченням надійності енергопостачання та гарантуванням енергетичної безпеки України.

Проаналізуємо стан системи теплопостачання. На рис. 1 наведено структуру генерації теплової енергії у 2021 р.

Основне обладнання систем централізованого теплопостачання (СЦТ) України фізично зношене й технологічно застаріле. Близько 60 % котельень відпрацювали свій ресурс, 38 % обладнані застарілими малоєфективними котлами з низьким ККД. Майже 50 % теплових пунктів перебувають в аварійному стані, що призводить до постійних перевитрат паливно-енергетичних ресурсів.

Сумарна протяжність теплових мереж СЦТ становить 20 100 км. Термін експлуатації більшості з них перевищує 20–25 років. Теплова ізоляція мереж має значні пошкодження. Частка застарілих та аварійних ділянок у деяких областях сягає 40 %. Крім того, внаслідок війни станом на квітень 2024 р. було зруйновано 532 котельні, 196 теплових пунктів, 425 км теплових мереж, 34 газорозподільчі станції, 16 ТЕС і ТЕЦ.

Слід також взяти до уваги, що на Конференції ООН зі зміни клімату COP28, яка наприкінці 2023 р. відбулася в Дубаї, вперше в історії було ухвалено рішення про відхід від використання викопного палива і нарощування потужностей ядерної енергетики*. Угода передбачає скорочення використання вугілля, нафти і природного газу для того, щоб утримати підвищення глобальної температури нижче

* 'Historic' COP28 deal to 'transition away' from fossil fuels adopted. <http://surl.li/quwcsd>

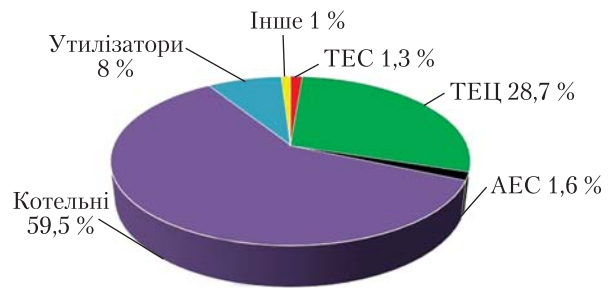


Рис. 1. Структура генерації теплової енергії в Україні у 2021 р.

за ключовий поріг у 1,5 °С, встановлений на саміті в Парижі в 2015 р. В угоді визнано, що викиди в атмосферу від використання викопного палива в розвинених країнах досягнуть піка до 2025 р., а в державах, що розвиваються, максимум спостерігатиметься пізніше. У рамках COP28 понад 20 країн світу підписали декларацію, в якій зобов'язалися потроїти світові потужності ядерної енергетики до 2050 р.

В Інституті загальної енергетики НАН України було розроблено концептуально інший підхід до принципів використання енергії ВЕС/СЕС, основна ідея якого полягає у використанні первинної енергії СЕС чи ВЕС у системах централізованого теплопостачання з електричним теплогенератором у вигляді електрокотла замість теплогенераторів на природному газі [3–5]. При цьому СЕС/ВЕС, перебуваючи юридично у складі ОЕС, фізично й функціонально виведені з її структури і утворюють власну автономну підсистему ОЕС (підсистему електричного теплопостачання). Споживачами цієї підсистеми є виключно електричні теплові котли великої потужності, тепла енергія від яких надходить у СЦТ (рис. 2).

Такий підхід до побудови структури використання енергії СЕС/ВЕС зумовлений тим, що електрокотли малочутливі до зміни частоти і можуть приймати енергію з широким її спектром. При цьому тепло генерується на основі принципу суперпозиції, тобто коли генерується та інтегрується тепла енергія, яку має кожна гармоніка у повному спектрі. За-

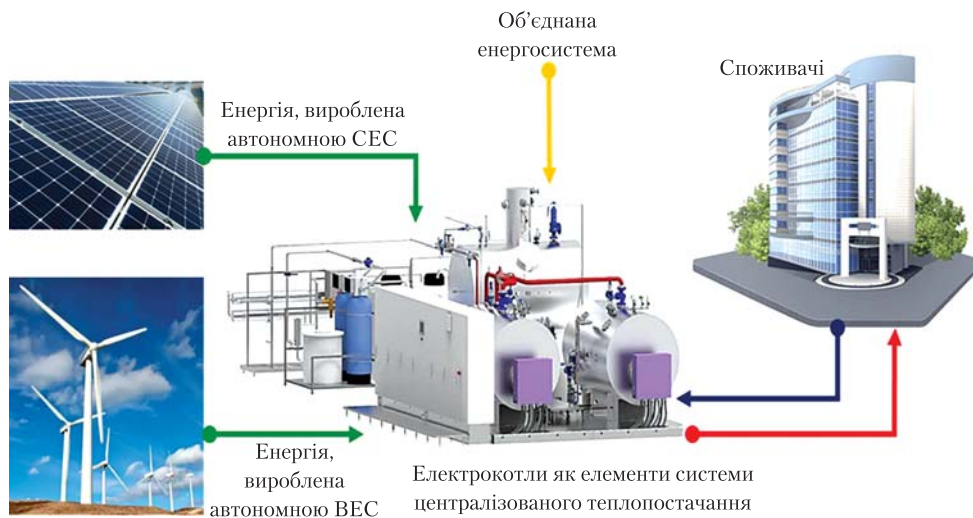


Рис. 2. Структура запропонованої системи генерації теплової енергії

вдяки такій схемі (використовується повний спектр частот) зникає дуже високовартісна стаття витрат на стабілізацію частоти. Ще одна проблема, пов'язана з капіталомісткою статтею витрат у сукупності видатків на використання енергії ВДЕ — витратами на резервні джерела енергії, вирішується вибором споживача теплової енергії, яку генерує електрокотел. Таким споживачем і є СЦТ.

Проектною та експлуатаційною особливістю СЦТ є те, що з метою мінімізації загальних витрат у системі реалізується температурний графік із максимальною температурою води 120 °С і мінімальною — 70 °С. Це дає можливість так організувати покриття цього графіка, щоб зона між максимальною та мінімальною температурами забезпечувалася енергією СЕС/ВЕС, а базова зона до 70 °С — енергією АЕС. Цих двох операцій достатньо, щоб при такому менеджменті в ОЕС економічні показники діяльності ВДЕ не погіршувалися. Крім того, з'являється низка енергоекономічних факторів, які разом із наведеними вище чинниками забезпечують високу рентабельність СЦТ.

Ще один напрям досліджень Інституту загальної енергетики НАН України стосується організації структури самодостатньої розподіленої генерації на базі ВДЕ з використанням систем акумулювання енергії (BESS) [6, 7]. Слід зазначити, що традиційні електростанції

працюють на умовах самодостатності, тобто всі витрати під час роботи електростанції (освітлення, вентиляція, подавання води, вугільні млини, забезпечення стабільності частоти і потужності тощо) покриває сама електростанція. Українські ВЕС/СЕС законодавчо звільнено від обов'язку компенсувати найвагоміші з цих витрат.

Принцип організації самодостатніх ВЕС/СЕС очевидний — запровадити зобов'язання щодо компенсації витрат на власні потреби, аналогічно вимогам до традиційних електростанцій. На перший погляд, механізми реалізації самодостатності ВДЕ і традиційних джерел енергії є подібними, проте окремі їх алгоритми відрізняються один від одного. В разі традиційних електростанцій їхні витрати на власні потреби є просто сумою витрат за кожною технологією, натомість для відновлюваних джерел самодостатність потребує врахування додаткових залежностей і взаємозв'язків [6].

На рис. 3 наведено функціональну схему зв'язків і взаємодії самодостатньої ВЕС/СЕС. Ця схема може забезпечувати самодостатність ВДЕ лише в разі врахування перелічених нижче загальних залежностей.

Баланс енергії в кінці інтервалу $[0, T]$

$$W_v - W_n - W_b = 0, \quad (1)$$

де W_v — енергія, вироблена ВЕС/СЕС протягом інтервалу $[0, T_f]$ із залученням енергії

інших джерел; W_n — енергія, що передається в мережу; W_b — енергія, що накопичилася в BESS у кінці інтервалу $[0, T_f]$

$$W_b = W_z - W_r, \quad (2)$$

де W_z — сумарна енергія заряду, що надійшла до BESS протягом інтервалу $[0, T_f]$; W_r — сумарна енергія розряду, яку BESS надала в мережу протягом інтервалу $[0, T_f]$.

Залежність (1) представимо у вигляді

$$W_v = P_u T_f + P_x T_p \quad (3)$$

та введемо нову залежність

$$W_b = P_x T_p. \quad (4)$$

W_b , W_z , W_r знаходять із алгебро-диференційної моделі (про що йтиметься далі), і вони за означенням є константами. Тому величина P_x відразу розраховується у вигляді

$$P_x = W_b / T_p. \quad (5)$$

Для забезпечення балансу енергії (3) необхідно визначити величину P_u . Припустимо, що в умовах самодостатності має місце рівність

$$P_u = P_x, \quad (6)$$

тоді рівняння (3) набуває вигляду $W_{vx} = P_x T$. Врахуємо, що в моделі величина W_{vx} обчислюється у формі

$$W_{vx} = \int_0^{T_f} P_v(t) dt, \quad (7)$$

де $P(t)$ — профіль потужності ВЕС/СЕС на інтервалі $[0, T_f]$. Оскільки інтервал $[0, T_f]$ вимірюється десятками хвилин/годинами, а інтегрування, згідно з (7), здійснюється з постійним кроком $h = 10$ мс, то енергія W_v з високою точністю визначається у вигляді

$$W_{vx} = P_{vs} T_f \quad (8)$$

де P_{vs} — середнє значення величини $P(t)$ на інтервалі $[0, T_f]$. Тоді рівняння (8) набуває вигляду

$$P_{vs} T_f = P_x T, \quad (9)$$

або

$$k P_{vs} = P_x, \quad (10)$$

де

$$k = T_f T, \quad (11)$$

це коефіцієнт використання встановленої потужності (КВВП) ВЕС/СЕС на інтервалі $[0, T]$.

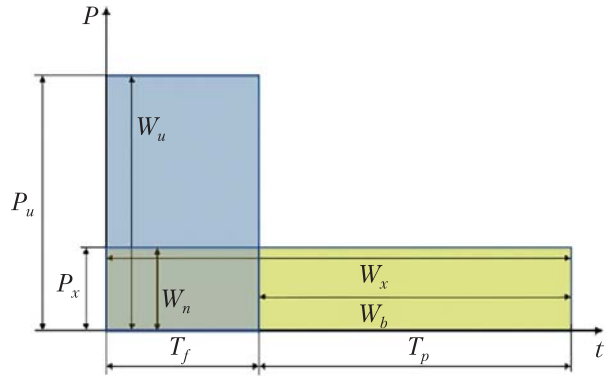


Рис. 3. Функціональна схема зв'язків і взаємодії самодостатньої ВЕС/СЕС: T_f — час, упродовж якого працює ВЕС/СЕС; T_p — час (пауза), коли ВЕС/СЕС не працює; P_x — потужність ВЕС/СЕС, необхідна для її самодостатності на інтервалі $T = T_f + T_p$; W_x — енергія ВЕС/СЕС, необхідна для її самодостатності на інтервалі T ; W_n — енергія ВЕС/СЕС, що віддається в мережу протягом інтервалу $[0, T_f]$; P_u — потужність ВЕС/СЕС, яку вимагає оператор системи (установка оператора) на інтервалі $[0, T_f]$; $W_u = P_u T_f$ — енергія, забезпечена потужністю P_u ; W_b — енергія, що видана з BESS у мережу протягом інтервалу $[0, T_p]$, частина цієї енергії W_n передається в мережу, а частина завантажується в BESS. Протягом часу $[0, T_p]$ ВЕС/СЕС не працює, а BESS видає накопичену енергію W_b у мережу

У результаті проведеного аналізу залежність (3) доцільно трансформувати у вигляді

$$W_{vx} = P_x T_f + P_x T_p, \quad (12)$$

де $P_x T_f = W_n$ — частина енергії ВЕС/СЕС, що на інтервалі $[0, T_f]$ передається в мережу; $P_x T_p = W_b$ — частина енергії ВЕС/СЕС, що в кінцевій точці інтервалу $[0, T_f]$ передана в систему BESS.

Залежність (12) доводить, що припущення (6) відповідає дійсності, оскільки вона задовольняє рівняння (1) і (3) за умови виконання обмеження (6) за довільних КВВП (11). Рівняння (6) є необхідною і достатньою умовою самодостатності розподіленої генерації.

Запропонована модель дає можливість вирішити відразу кілька нових важливих проблем. Головною з них є організація зв'язків і взаємодії в структурі розподіленої генерації, яка забезпечує можливість її самодостатності [8–11]. Для демонстрації такої можливості на

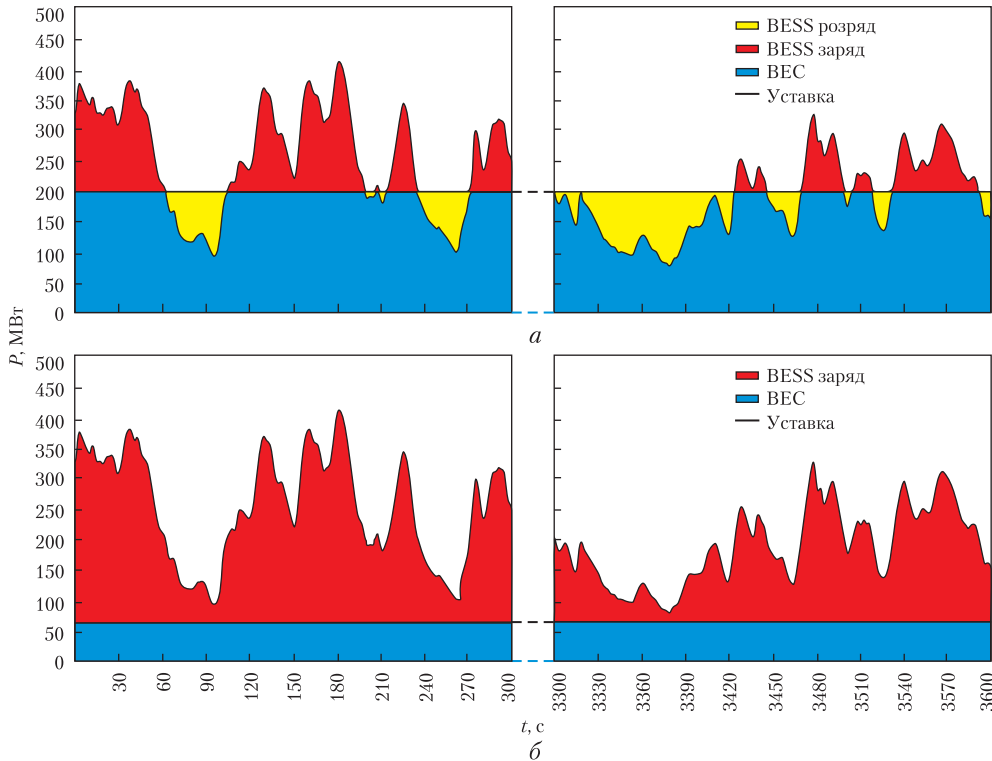


Рис. 4. Формування властивості самодостатності в розподіленій генерації. Потужність: *a* – 200 МВт; *б* – 63,7 МВт (виділено відповідними горизонталлями)

рис. 4 наведено два варіанти функціонування енергосистеми, в якій встановлено 1500 МВт вітрових генераторів. Профіль вітру, що відповідає наведеному рисунку, змінювався протягом 1 год зі швидкістю від 3,5 до 7 м/с. На рис. 4 показано ідентичні графіки потужності ВЕС, профіль яких практично збігається з профілем вітру, що зумовлено генераторною характеристикою ВЕС $P_v = f(\theta)$, де θ – швидкість вітру. Зазначені дані та характеристики взято з діючої енергосистеми. Графіки різняться лише величиною уставки P_u : 200 і 63,7 МВт.

Наведені значення уставок із необхідною точністю забезпечені дією регулюючої функції BESS та від’ємного зворотного зв’язку за частотою і потужністю, що функціонують у розробленій моделі. На графіках синім кольором позначено енергію, що протягом інтервалу $[0, T_f = 3600 \text{ с}]$ передається від ВЕС у мережу, червоним – енергію, що впродовж того самого інтервалу передається від ВЕС до BESS, жовтим – енергію, що протягом того самого інтервалу передається від BESS у мережу.

Підкреслимо, що зі збільшенням уставки P_u зростає сумарна енергія ВЕС та BESS, що передається у мережу, і при значенні $P_u = P_{v \max} = 430 \text{ МВт}$ досягає максимуму. При цьому від BESS відбирається максимальна енергія та передається у мережу. І навпаки, при зменшенні уставки P_u зменшується енергія, що передається в мережу, і зростає енергія, що передається в BESS. Межею у цьому випадку є значення $P_u = 0$, $W_b = W_{vx}$, $W_n = 0$. Тобто функція, зокрема $W_n = f(P_u)$, має найбільше і найменше значення, але не має екстремуму. Прийняття найкращого рішення досягається, як показано вище, коли виконується умова (6). Дійсно, якщо $P_u > P_x$, енергія W_b зменшиться згідно з (1), тобто зменшиться P_x згідно з (5), і оператор системи змушений змінювати потужність, що видається в мережу в інтервалі $[0, T_p]$. У випадку, коли $P_u < P_x$, спостерігатиметься протилежна ситуація – в мережу енергію буде надано, а в систему BESS її буде надано більше, ніж потрібно для балансу (12). У запропонованій моделі всі операції із забез-

печення функціонування ВЕС/СЕС здійснюються виключно з використанням їх власної енергії, тобто вони є самодостатніми за наведеним вище означенням.

Отже, результати проведених в Інституті загальної енергетики НАН України досліджень [12–15] показали, що створення централізованої системи електричного теплопостачання в Україні дозволить відразу вирішити кілька проблем державного значення:

1) забезпечити в повному обсязі оплату вартості електроенергії, виробленої на СЕС/ВЕС, за рахунок доходів системи електричного теплопостачання;

2) забезпечити гарантовану конкурентоспроможність широкого використання ВДЕ і тим самим автоматично позбавити енергоринок збитків завдяки зниженню витрат на підтримання частоти та балансування ринку;

3) вивільнити понад 7 млрд м³ природного газу, що є значним внеском в енергетичну безпеку країни;

4) скоротити викиди вуглекислого газу.

Переведення СЦТ на застосування електричних котлів з комбінованим використанням електроенергії як з традиційних, так і з відновлюваних джерел забезпечить високу економічну ефективність системи. Собівартість теплової енергії у новій системі електро-теплопостачання може бути зменшено.

Показано можливість забезпечення функціонування ВЕС/СЕС у режимі самодостатності внаслідок введення в їхню структуру систем накопичення енергії.

Результати дослідження енергоекономічних показників реальної великої ОЕС із потужною підсистемою ВЕС свідчать про високу конкурентоспроможність самодостатніх ВЕС і СЕС.

REFERENCES

[СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ]

1. Kulyk M., Nechaieva T., Zgurovets O., Shulzhenko S., Maystrenko N. Comparative Analysis of Energy-Economic Indicators of Renewable Technologies in Market Conditions and Fixed Pricing on the Example of the Power System of Ukraine. In: Zaporozhets A. (ed.) *Systems, Decision and Control in Energy IV: Studies in Systems, Decision and Control*. Springer, Cham, 2023. Vol. 454. P. 433–449. https://doi.org/10.1007/978-3-031-22464-5_26
2. Nechaieva T.P. Modeling ensuring demand-supply balance of the power system in conditions of significant renewable generation. *System Research in Energy*. 2022. (1-2): 42–49. <https://doi.org/10.15407/pge2022.01-02.042> [Нечаєва Т.П. Моделювання забезпечення балансової надійності енергосистеми в умовах значних обсягів відновлюваної генерації. *Проблеми загальної енергетики*. 2022. Вип. 1-2. С. 42–49.]
3. Kulyk M., Babak V. Increasing the Efficiency and Security of Integrated Power System Operation through Heat Supply Electrification in Ukraine. *Science and Innovation*. 2023. **19**(5): 100–116. <https://doi.org/10.15407/scine19.05.100>
4. Derii V.O., Nechaieva T.P., Leshchenko I.C. Assessment of the effect of structural changes in Ukraine's district heating on the greenhouse gas emissions. *Science and Innovation*. 2023. **19**(4): 57–65. <https://doi.org/10.15407/scine19.04.057>
5. Kulyk M., Babak V. Possibilities and perspectives of the consumers-regulators application in systems of frequency and power automatic regulation. *Technical Electrodynamics*. 2023. (4): 72–80. <https://doi.org/10.15407/techned2023.04.072>
6. Hotra O., Kulyk M., Babak V., Kovtun S., Zgurovets O., Mroczka J., Kisała P. Organisation of the Structure and Functioning of Self-Sufficient Distributed Power Generation. *Energies*. 2024. **17**(1): 27. <https://doi.org/10.3390/en17010027>
7. Nechaieva T.P. Accounting for use of energy storage systems in the model of the long-term power system development forecasting. *System Research in Energy*. 2021. (3): 14–22. <https://doi.org/10.15407/pge2021.03.014> [Нечаєва Т.П. Урахування використання акумуляційних систем у моделі прогнозування довгострокового розвитку електроенергетичної системи. *Проблеми загальної енергетики*. 2021. Вип. 3. С. 14–22.]
8. Kulyk M., Zgurovets O. Modeling of power systems with wind, solar power plants and energy storage. In: Babak V., Isaienko V., Zaporozhets A. (eds) *Systems, Decision and Control in Energy I. Studies in Systems, Decision and Control*. Vol. 298. Springer, Cham, 2020. https://doi.org/10.1007/978-3-030-48583-2_15

9. Nechaieva T., Buratynskiy I. The least-cost optimization of PV-station's DC/AC equipment using battery energy storage system. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*. 2022. **59**(1): 53–62. <https://doi.org/10.2478/lpts-2022-0006>
10. Zgurovets O., Kulyk M. Application of Energy Storage for Automatic Load and Frequency Control. In: Kyrylenko O., Denysiuk S., Derevianko D., Blinov I., Zaitsev I., Zaporozhets A. (eds) *Power Systems Research and Operation. Studies in Systems, Decision and Control*. Vol. 220. Springer, Cham, 2023. https://doi.org/10.1007/978-3-031-17554-1_4
11. Kulyk M.M., Zgurovets O.V. The role and mechanisms of influence of the derivatives of regulating capacities on frequency stability in power systems with wind power plants. *System Research in Energy*. 2020. (1): 24–30. <https://doi.org/10.15407/pge2020.01.024>
[Кулик М.М., Згуровець О.В. Роль і механізми впливу похідних від регулюючих потужностей на стабільність частоти в енергосистемах з вітровими електростанціями. *Проблеми загальної енергетики*. 2020. Вип. 1. С. 24–30.]
12. Buratynskiy I.M., Nechaieva T.P., Shulzhenko S.V. Optimization of the equipment structure of a photovoltaic solar power plant. *System Research in Energy*. 2020. (2): 17–22. <https://doi.org/10.15407/pge2020.02.017>
[Буратинський І.М., Нечаєва Т.П., Шульженко С.В. Оптимізація структури обладнання фотоелектричної сонячної електростанції. *Проблеми загальної енергетики*. 2020. Вип. 2. С. 17–22.]
13. Shulzhenko S.V., Nechaieva T.P., Buratynskiy I.M. Optimal power system's generation dispatch with PV-plants equipped battery energy storage systems. *System Research in Energy*. 2021. (4): 4–12. <https://doi.org/10.15407/pge2021.04.004>
[Буратинський І.М., Нечаєва Т.П., Шульженко С.В. Оптимальне завантаження генеруючих потужностей енергосистеми за умови експлуатації сонячних електростанцій із системами акумуляування. *Проблеми загальної енергетики*. 2021, Вип. 4. С. 4–12.]
14. Zgurovets O.V., Kulyk M.M. Possibilities to form a modern reserve of supporting of a frequency in integrated power systems based on storage batteries for automatic adjustment of frequency and power. *System Research in Energy*. 2022. (1-2): 20–29. <https://doi.org/10.15407/pge2022.01-02.020>
[Згуровець О.В., Кулик М.М. Можливості формування сучасного резерву підтримки частоти в об'єднаних енергосистемах на базі акумуляторних батарей для автоматичного регулювання частоти і потужності. *Проблеми загальної енергетики*. 2022. Вип. 1-2. С. 20–29.]
15. Buratynskiy I.M., Nechaieva T.P. Modeling of the combined operation of a solar photovoltaic power plant and a system of electric energy storage. *System Research in Energy*. 2020. (3): 30–36. <https://doi.org/10.15407/pge2020.03.030>
[Буратинський І.М., Нечаєва Т.П. Моделювання сукупної роботи сонячної фотоелектричної електростанції та системи акумуляування. *Проблеми загальної енергетики*. 2020. Вип. 3. С. 30–36.]

Vitalii P. Babak

General Energy Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9066-4307>

CHANGES IN THE STRUCTURE OF THE POWER SYSTEM AND PECULIARITIES OF THE ENERGY MARKET IN THE PERIOD OF UKRAINE'S RECOVERY

According to the materials of scientific report at the meeting of the Presidium of the NAS of Ukraine, June 12, 2024

The report presents the most important results of fundamental and applied research of the General Energy Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine on the development of a fundamentally new structure and basics of the electric heat system. This system integrates the Integrated Energy System of Ukraine and district heating systems by electrifying heat supply through the use of energy from autonomous RES and conventional power generation capacities of electric boilers that do not require standardized power quality indicators. A new principle of self-sufficiency of WPP/SPP functioning is proposed, which is achieved by introducing an energy storage system into their structure.

Keywords: renewable energy sources, electrification of heat supply, energy storage systems, distributed generation, self-sufficiency principle.

Cite this article: Babak V.P. Changes in the structure of the power system and peculiarities of the energy market in the period of Ukraine's recovery. *Visn. Nac. Akad. Nauk Ukr.* 2024. (8): 10–16. <https://doi.org/10.15407/visn2024.08.010>