

**МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ВСТАНОВЛЕНОЇ ПОТУЖНОСТІ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ
РОЗПОДІЛЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ З ВІДНОВЛЮВАНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ
ТА УСТАНОВКОЮ ЗБЕРІГАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ**

І.М. Буратинський*, докт. філософії, **А.О. Запорожець****, докт. техн. наук
Інститут загальної енергетики НАН України,
вул. Антоновича, 172, Київ, 03150, Україна, e-mail: buratynskvi@ienergy.kiev.ua.

Наведено розроблений метод, який полягає у визначенні встановленої потужності розподіленої генерації, зокрема, вітрової електростанції, сонячної електростанції, резервної електростанції та технічних параметрів системи акумулявання електричної енергії, задля забезпечення безпеки постачання електричної енергії місцевим споживачам. Досягнення балансу між добовим обсягом виробництва електричної енергії розподіленої генерації та обсягом споживання забезпечує визначення надлишкових обсягів електричної енергії, які в основному виникають у періоди піку сонячного випромінювання, та, відповідно, необхідну енергоємність установок зберігання електроенергії. За результатами моделювання визначено, що за максимальних добових обсягах споживання електричної енергії місцевими споживачами протягом року на рівні 96 МВт·год добовий баланс електроенергії досягається за встановленої потужності вітрової електростанції на рівні 3,6 МВт; сонячної електростанції – 14 МВт; резервної електростанції – 3,7 МВт та номінальної потужності чотирьохгодинної установки зберігання електроенергії – 16 МВт. Бібл. 3, рис. 2, табл. 1.

Ключові слова: метод, розподілена генерація, вітрова електростанція, сонячна електростанція, резервна електростанція, установка зберігання електроенергії.

Вступ та постановка проблеми. В сучасних умовах розвитку електроенергетичних систем значна увага приділяється розподіленій генерації із встановленою потужністю 20 МВт та нижче із приєднанням до мереж оператора системи розподілу, яка має ряд переваг перед централізованими електростанціями значно більшої потужності. Основними перевагами децентралізації генеруючих потужностей та розосередження менш потужних електростанцій в енергетичних вузлах є: підвищення безпеки постачання електричної енергії; забезпечення операційної безпеки навіть в умовах виникнення системних аварій в енергосистемі; зменшення втрат у лініях електропередачі за рахунок зближення об'єктів, що виробляють електричну енергію з об'єктами або її споживають, тощо. Крім того, за відсутності електричного зв'язку з енергосистемою, зокрема у разі виникнення надзвичайної ситуації в енергосистемі, більшість сучасних електростанцій розподіленої генерації можуть працювати в автономному режимі та надавати послугу з відновлення функціонування енергосистеми після виникнення системних аварій (автономного пуску) [1].

Відповідно до Закону України «Про ринок електричної енергії» [2] на рівні держави передбачається стимулювання розвитку малої розподіленої генерації з відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). Крім того, як окремий напрямок державної цільової програми є стимулювання розвитку ВДЕ та установок зберігання електроенергії (УЗЕ), в тому числі таких, які встановлюються на об'єктах критичної інфраструктури з метою підвищення надійності електропостачання. Водночас збільшення частки ВДЕ, які здебільшого є об'єктами розподіленої генерації у загальному балансі, потребує підвищення маневреності енергосистеми та, відповідно, впровадження нових напівпікових та пікових електростанцій та УЗЕ.

Метою даної роботи є розроблення методу, який полягає у визначенні встановленої потужності електростанцій розподіленої генерації із значною часткою ВДЕ, в саме вітрових (ВЕС) та сонячних електростанцій (СЕС), визначення встановленої потужності резервної електростанції (РЕС) та номінальної потужності УЗЕ задля забезпечення електричною енергією місцевих споживачів на

© Буратинський І.М., Запорожець А.О., 2025

ORCID: * <https://orcid.org/0000-0003-2928-9621>; ** <https://orcid.org/0000-0002-0704-4116>

© Видавець Інститут електродинаміки НАН України, 2025



Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>

основі використання історичних даних щодо обсягів споживання електричної енергії місцевими споживачами та даних по потужності ВЕС та СЕС, що функціонують на досліджуваній місцевості.

Перевагою ВЕС та СЕС порівняно із традиційними електростанціями є відсутність палива, що дає можливість забезпечувати значно менші операційні витрати протягом всього періоду їхньої комерційної експлуатації. Однак ВЕС та СЕС через повну залежність потужності виробництва електричної енергії від погодних факторів не можуть самостійно гарантувати необхідний рівень генерації для споживачів. Враховуючи те, що для території України середньорічний коефіцієнт використання встановленої потужності (КВВП) для ВЕС становить 36% на відміну від СЕС, КВВП якої становить 14%, то для дослідження як основну електростанцію прийнято ВЕС. За РЕС прийнято електростанцію, що відповідає поточним вимогам щодо нових високоманеврових електростанцій, які здатні виходити на номінальну потужність за час, що не перевищує 15 хвилин після отримання відповідної команди. Зазначеним вимогам до швидкого пуску відповідають газотурбінні, газопоршневі та дизельні установки.

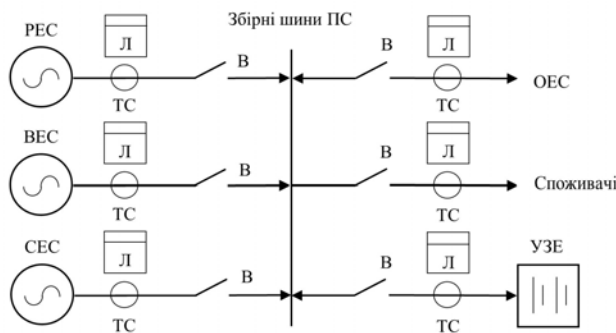


Рис. 1

електричної енергії (Л), що підключаються через вимірювальні трансформатори струму (ТС).

Визначення встановленої потужності ВЕС. Враховуючи те, що у розробленому методі ВЕС прийнято як основну електростанцію, її встановлена потужність визначається через максимальне значення відношення добутку питомого показника добового споживання електричної енергії та максимального добового обсягу споживання електричної енергії протягом року до часу виробництва електричної енергії ВЕС на рівні встановленої потужності протягом доби

$$P^{WES} = \max_{d=1 \div D} \left\{ \frac{p_d^{CONS} \cdot W^{CONS_MAX}}{k_d^{WES}} \right\}, \quad (1)$$

де P^{WES} – встановлена потужність ВЕС, МВт; D – сумарна кількість днів d у році; p_d^{CONS} – питомий показник добового споживання електричної енергії відносно максимального обсягу протягом року, в.о.; W^{CONS_MAX} – максимальний добовий обсяг споживання електричної енергії протягом року, МВт·год; k_d^{WES} – час виробництва електричної енергії ВЕС на рівні встановленої потужності протягом доби d , год.

Із визначення (1) слідує те, що надлишкова електрична енергія на ВЕС протягом року не буде виникати взагалі, оскільки вся вироблена електрична енергія на ВЕС буде споживатися. Тобто, виконується умова того, що погодинні добові обсяги виробництва електричної енергії на ВЕС не будуть перевищувати рівень споживання електричної енергії протягом року. Таким чином, протягом року буде доба, упродовж якої потреби у споживанні будуть забезпечуватися електричною енергією, виробленою на ВЕС.

Визначення встановленої потужності СЕС. У розробленому методі встановлена потужність СЕС визначається через відношення добутку питомого показника добового споживання електричної енергії та максимального добового обсягу споживання електричної енергії протягом року із урахуванням обсягів виробництва електричної енергії на ВЕС протягом цієї доби до часу виробництва електричної енергії СЕС на рівні встановленої потужності протягом доби

$$P^{PV} = \text{aver}_{d=1 \div D} \left\{ \frac{p_d^{CONS} \cdot W^{CONS_MAX} - k_d^{WES} \cdot P^{WES}}{k_d^{PV}} \right\}, \quad (2)$$

де P^{PV} – встановлена потужність СЕС, МВт; k_d^{PV} – час виробництва електричної енергії СЕС на рівні встановленої потужності протягом доби d , год.

Спрощену структурну схему досліджуваного електроенергетичного вузла наведено на рис. 1. Використання запропонованої структурної схеми електроенергетичного вузла дає змогу вироблену електричну енергію на ВЕС, СЕС, РЕС через збірні шини підстанції (ПС) передавати до споживачів, здійснювати заряджання чи розряджання УЗЕ та відпуск або відбір електричної енергії з об'єднаної енергосистеми (ОЕС). Керування потоками електроенергії шляхом комутації на окремих лініях електропередачі здійснюється вимикачами (В). Облік електричної енергії здійснюється інтелектуальними лічильниками

Із визначення (2) слідує те, що надлишкова електрична енергія на СЕС може виникати, оскільки встановлена потужність СЕС вибирається виходячи із середньоарифметичного, а не максимального значення покриття добових обсягів споживання електричної енергії. Запропонований підхід щодо використання середньоарифметичного значення співвідношення (2) зумовлений зменшенням виникнення надлишкової електричної енергії на СЕС, яку необхідно буде обмежувати, зокрема, у періоди максимальної інтенсивності сонячного випромінювання.

Надлишкові обсяги електричної енергії на СЕС визначаються із умови

$$W_d^{CURT} = \begin{cases} W_d^{CONS} - W_d^{WES} - W_d^{PV}, & W_d^{WES} + W_d^{PV} > W_d^{CONS}; \\ 0, & W_d^{WES} + W_d^{PV} \leq W_d^{CONS}, \end{cases} \quad (3)$$

де W_d^{CURT} – обсяги обмеження електричної енергії на СЕС протягом доби d , МВт·год.; W_d^{CONS} – обсяги споживання електричної енергії протягом доби d , МВт·год.; W_d^{WES} – обсяги виробництва електричної енергії на ВЕС протягом доби d , МВт·год.; W_d^{PV} – обсяги виробництва електричної енергії на СЕС протягом доби d , МВт·год.

Визначення встановленої потужності РЕС. Метою впровадження РЕС є забезпечення споживачів електричною енергією у тих випадках, коли обсягів виробництва електричної енергії на ВЕС та СЕС не достатньо для покриття їхніх потреб, тобто у разі зниження інтенсивності сонячного випромінювання чи швидкості вітру. Задля визначення встановленої потужності РЕС необхідно знайти добові обсяги електричної енергії, яких не вистачає для потреб споживачів, що визначаються із умови

$$W_d^{NOT} = \begin{cases} W_d^{CONS} - W_d^{WES} - W_d^{PV}, & W_d^{CONS} - W_d^{WES} - W_d^{PV} > 0; \\ 0, & W_d^{CONS} - W_d^{WES} - W_d^{PV} \leq 0, \end{cases} \quad (4)$$

де W_d^{NOT} – добові обсяги електричної енергії, яких не вистачає для покриття потреб споживачів, МВт·год.

Встановлена потужність РЕС визначається через максимальне значення протягом року добових обсягів електричної енергії, яких не вистачає для покриття потреб споживачів до максимальної можливої кількості годин роботи РЕС протягом доби

$$P^{RES} = \max_{d=1 \div D} \left\{ \frac{W_d^{NOT}}{H^{RES}} \right\}, \quad (5)$$

де P^{RES} – встановлена потужність РЕС, МВт; H^{RES} – максимально можлива кількість годин роботи РЕС протягом доби.

Максимально можлива кількість годин роботи РЕС протягом доби визначається, виходячи із технічних можливостей РЕС (швидкості набору/зниження потужності, можливості зупинки та запуску протягом доби, витрат палива, тощо). Як слідує з (5) за однакових обсягів необхідних для виробництва електричної енергії скорочення часу роботи РЕС призводитиме до збільшення її встановленої потужності.

Визначення параметрів УЗЕ. Враховуючи те, що під час роботи ВЕС не виникатиме надлишкова електрична енергія, а потужність генерації РЕС буде змінюватися за необхідністю, то УЗЕ необхідна для перенесення надлишкової електричної енергії, що виникатиме на СЕС у періоди максимальної інтенсивності сонячного випромінювання. Умовою роботи УЗЕ є здійснення одного повного циклу заряджання та розряджання електричною енергією протягом однієї доби. Таким чином, корисна енергоємність заряджання УЗЕ визначається із максимального добового значення надлишкових обсягів електричної енергії на СЕС протягом року

$$C^{BESSchg} = \max_{d=1 \div D} \left\{ W_d^{CURT} \right\}, \quad (6)$$

де $C^{BESSchg}$ – корисна енергоємність заряджання УЗЕ, МВт·год.

Номінальна потужність УЗЕ обчислюється виходячи із енергоємності заряджання УЗЕ та кількості годин її роботи, що визначається наперед заданими проєктними технічними параметрами

$$P^{BESS} = C^{BESS} / H^{BESS}, \quad (7)$$

де P^{BESS} – номінальна потужність УЗЕ, МВт; H^{BESS} – номінальна кількість годин роботи УЗЕ протягом доби.

Номінальна енергоємність УЗЕ знаходиться через енергоємність заряджання УЗЕ із урахування глибини можливого розряджання та ефективності перетворення

$$C^{BESS} = C^{BESSchg} / \eta^{DOD} / \eta^{RTE}, \quad (8)$$

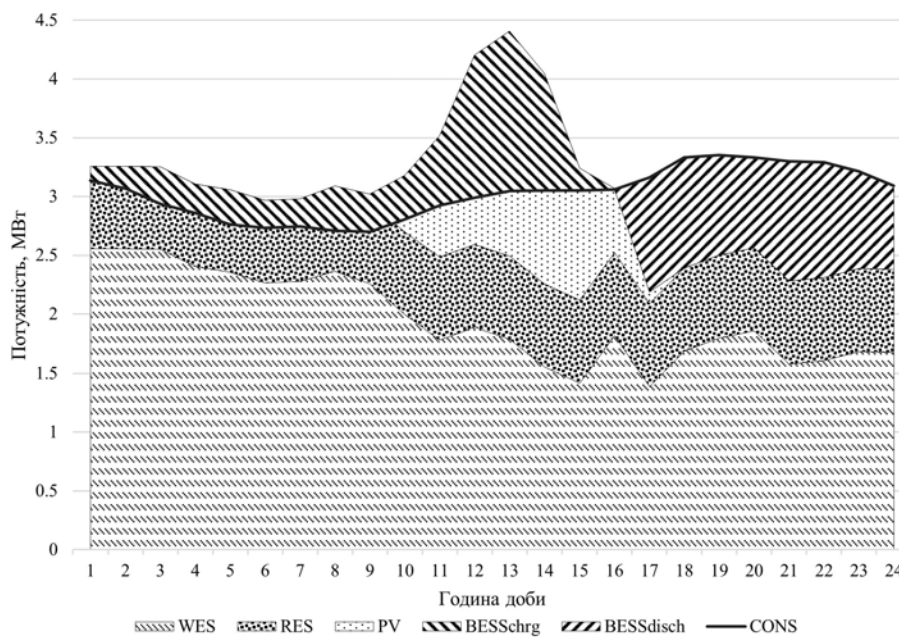
де C^{BESS} – номінальна енергоємність УЗЕ, МВт·год; η^{RTE} – ефективність перетворення УЗЕ, частка; η^{DOD} – глибина можливого розрядження УЗЕ, частка.

Вхідні дані та результати моделювання. Задля визначення рівня споживання електроенергії місцевими споживачами використано статистичні дані графіка електричного навантаження та потужності ВЕС і СЕС в ОЕС України за 2020 рік [3]. Так за статистичними даними максимальний сумарний добовий обсяг споживання електричної енергії в енергосистемі на рівні 505 397 МВт·год було зафіксовані 10 грудня. Відповідно зазначені обсяги були зменшені до 96,0 МВт·год та прийняті як максимальний добовий обсяг споживання електричної енергії протягом року для досліджуваного електроенергетичного вузла (із середньодобовою потужністю споживання електроенергії на рівні 4,0 МВт). Виходячи із погодинних даних для кожної окремої доби знайдено питомий показник добового споживання електричної енергії відносно максимального добового обсягу споживання електричної енергії протягом року. Через відношення фактичних погодинних обсягів виробництва електричної енергії на ВЕС та СЕС в ОЕС України до їхньої встановленої потужності (за місячними даними) для кожної доби визначено час виробництва електричної енергії на ВЕС та СЕС на рівні встановленої потужності.

Також слід зауважити, що для моделювання прийнято: максимально можливу кількість годин роботи для РЕС протягом доби – 24; ефективність перетворення для УЗЕ – 98%; глибину можливого розрядження для УЗЕ – 80%. Результати моделювання наведено у таблиці.

№	Найменування показника	Значення
1	Середньодобова потужність споживання електричної енергії, МВт	4,0
2	Встановлена потужність ВЕС, МВт	3,61
3	Встановлена потужність СЕС, МВт	13,99
4	Встановлена потужність РЕС, МВт	3,66
5	Номінальна потужність УЗЕ, МВт	16,0
6	Корисна енергоємність заряджання УЗЕ, МВт·год	63,99
7	Номінальна енергоємність УЗЕ, МВт·год	81,62
8	Обсяги споживання електричної енергії за рік, МВт·год	26 727,21
9	Обсяги виробництва електричної енергії на ВЕС за рік, МВт·год	10 475,46
10	Обсяги виробництва електричної енергії на СЕС за рік,	15 277,64
11	Обсяги виробництва електричної енергії на РЕС за рік, МВт·год	5 055,82
12	Обсяги заряджання електричної енергії УЗЕ за рік, МВт·год	4 081,71

Із результатів моделювання, наведених у таблиці, видно, що встановлена потужність РЕС практично однакова із встановленою потужністю ВЕС; встановлена потужність СЕС є майже у чотири рази більшою за встановлену потужність ВЕС; номінальна потужність УЗЕ є у чотири рази



більшою за середню потужність споживання протягом доби. Крім того визначено, що для досліджуваного енергетичного вузла КВВП для ВЕС становить 33,1%; СЕС – 12,5%; РЕС – 15,8%.

Погодинний графік покриття електричного навантаження місцевих споживачів досліджуваного електроенергетичного вузла для доби 01 січня із сумарними обсягами споживання електричної енергії протягом доби на рівні 72,67 МВт·год наведено на рис. 2.

Рис. 2

Для досліджуваної доби виробництво електричної енергії ВЕС на рівні 47,16 МВт·год (64,9%); СЕС – 8,68 МВт·год (11,9%); РЕС – 16,84 МВт·год (23,2%). Середньодобова потужність споживання становить 3,03 МВт; потужність ВЕС – 1,96 МВт; СЕС – 0,36 МВт; РЕС – 0,7 МВт. При цьому, протягом досліджуваної доби УЗЕ реалізує перенесення у часі біля 7,07 МВт·год (із середньодобовою потужністю заряджання/розряджання – 0,29 МВт), здійснюючи заряджання акумуляторних батарей протягом першої половини доби до 16:00 год та подальше розряджання у час вечірнього зростання електричного навантаження споживачів.

Висновок. На основі розробленого методу визначено встановлену потужність ВЕС, СЕС, РЕС та технічні параметри УЗЕ, що є необхідними задля забезпечення електричною енергією місцевих споживачів досліджуваного електроенергетичного вузла. Так за максимальних обсягах споживання електроенергії за добу на рівні 96,0 МВт·год (середньодобова потужність споживання електроенергії 4,0 МВт) задля забезпечення покриття попиту за рахунок власної генерації встановлена потужність ВЕС повинна бути на рівні біля 3,61 МВт; встановлена потужність СЕС – 13,99 МВт; встановлена потужність РЕС – 3,66 МВт; номінальна потужність чотирьохгодинної УЗЕ – 16,0 МВт та номінальна енергоємність УЗЕ – 81,62 МВт·год.

Під час дослідження враховувалося повне забезпечення рівня потреб споживання за рахунок електростанцій розподіленої генерації, що за відсутності електричного зв'язку з енергосистемою дає змогу забезпечити безпеку та стабільність постачання електричної енергії навіть у разі виникнення надзвичайної ситуації в ОЕС України. Враховуючи те, що номінальні параметри УЗЕ відповідно до розробленого методу визначалися, виходячи із надлишкової електричної енергії СЕС, то неповне використання потужностей УЗЕ за низьких обсягах виробництва електричної енергії на СЕС забезпечить для неї можливість приймати участь у первинному регулюванні частоти та активної потужності в енергосистемі.

1. Про затвердження Кодексу системи передачі: Постанова НКРЕКП від 14.03.2018 № 309. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0309874-18#Text> (дата звернення: 17.03.2024).
2. Про ринок електричної енергії: Закон України від 13.04.2017 № 2019-VIII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2019-19#Text> (дата звернення: 16.03.2024).
3. Погодинний баланс потужності ОЕС України. Портал відкритих даних. URL: <https://data.gov.ua/dataset/31199018-e15e-4e87-bf5e-2a4293151f5c> (дата звернення: 01.10.2021).

METHOD OF DETERMINING THE INSTALLED CAPACITY OF DISTRIBUTED GENERATION POWER PLANTS WITH RENEWABLE ENERGY SOURCES AND ENERGY STORAGE SYSTEM

I.M. Buratynskiy, A.O. Zaporozhets

General Energy Institute National Academy of Sciences of Ukraine,

172, Antonovycha str., Kyiv, 03150, Ukraine,

e-mail: buratynskvi@ienergy.kiev.ua.

The developed method, which consists in determining the installed power of distributed generation, in particular, a wind power plant, a solar power plant, a standby power plant and the technical parameters of an energy storage system, to ensure the security of the supply of electric energy to local consumers, is given. Achieving a balance between the daily amount of electricity produced by distributed generation and the amount of consumption ensures the determination of excess amounts of electricity, which mainly occur during periods of peak solar radiation and, accordingly, the required capacity of an energy storage system. According to the simulation results, it was determined that with the maximum daily consumption of electricity by local consumers during the year at the level of 96 MWh, the daily balance of electricity is achieved at the installed capacity of the wind power plant at the level of 3.6 MW; solar power plant is 14 MW; standby power plant is 3.7 MW and the nominal power of an four-hour energy storage system is 16 MW. References 3, figures 2, table 1.

Keywords: method, distributed generation, solar power plant, wind power plant, backup power plant, energy storage system.

1. Pro zatverdzhennia Kodeksu systemy peredachi: Postanova NKREKPP vid 14.03.2018 № 309. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0309874-18#Text> (Accessed at 17.03.2024) (Ukr).
2. On Electricity Market: The Law of Ukraine 13.04.2017 No 2019-VIII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2019-19#Text> (Accessed at 16.03.2024) (Ukr).
3. Pohodynnyi balans potuzhnosti OES Ukrainy. Portal vidkrytykh danykh. URL: <https://data.gov.ua/dataset/31199018-e15e-4e87-bf5e-2a4293151f5c> (Accessed at 01.10.2021) (Ukr).

Надійшла 01.04.2024
Остаточний варіант 03.07.2024