**УДК 621.3** **doi: 10.20998/2313-8890.2024.10.03**

**Лазуренко Олександр Павлович,** к.т.н., проф, кафедра електричних станцій, +380 (57)7076565, oleksandr.lazurenko@khpi.edu.ua (ORCID ID:0000-0002-4409-629X)
*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»*
*61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2*
**Шокарьов Дмитро Анатолійович**, к.т.н., доцент, кафедра електричних станцій, +380965969855, dmytro.shokarov@khpi.edu.ua (ORCID:0000-0001-7038-3172)
*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»*
*61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2*
**Рижков Вячеслав Олександрович,** PhD-аспірант, кафедра електричних станцій, +380667288529, viacheslav.ryzhkov@ieee.khpi.edu.ua
*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»*
*61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2*

# АНАЛІЗ ПЕРСПЕКТИВ І ПРОБЛЕМ БАЛАНСУВАННЯ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ В ЕНЕРГОСИСТЕМІ УКРАЇНИ

***Анотація.*** *Стаття присвячена аналізу розвитку відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) в Україні, зокрема вітрової та сонячної генерації. Розглянуто вплив «зелених тарифів», здешевлення технологій та покращення бізнес-клімату на активізацію встановлення потужностей ВДЕ. Досліджується здатність енергосистеми України балансувати коливання в генерації від ВДЕ, проблеми з резервами, а також питання інтеграції ВДЕ в енергетичну систему країни та можливості підключення до ENTSO-E.*
***Ключові слова:*** *Сонячна електростанція, вітрова електростанція, відновлюваних джерел енергії, енергосистема.*

**Lazurenko Oleksandr,** Ph.D. (Eng.), Professor, Department of Power Plants, +380 (57) 7076565, oleksandr.lazurenko@khpi.edu.ua, (ORCID ID: 0000-0002-4409-629X)
*National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"*
*61002, Kharkiv, 2 Kyrpychova St.*
**Shokarov Dmytro,** Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Department of Power Plants, +380 96 5969855, dmytro.shokarov@khpi.edu.ua, (ORCID: 0000-0001-7038-3172)
*National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"*
*61002, Kharkiv, 2 Kyrpychova St.*
**Ryzhkov Viacheslav,** PhD Student, Department of Power Plants, +380667288529, viacheslav.ryzhkov@ieee.khpi.edu.ua
*National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"*
*61002, Kharkiv, 2 Kyrpychova St.*

# ANALYSIS OF THE PROSPECTS AND CHALLENGES OF BALANCING RENEWABLE ENERGY SOURCES IN THE POWER SYSTEM OF UKRAINE

***Abstract.*** *The article analyzes the development of renewable energy sources (RES) in Ukraine, particularly wind and solar generation. It examines the impact of "green tariffs," cost reduction in*

*technologies, and improvements in the business climate on the active installation of RES capacities. The study explores the ability of Ukraine's power system to balance fluctuations in RES generation, challenges with reserves, as well as issues related to the integration of RES into the country's energy system and the possibilities for connection to ENTSO-E.*
***Keywords:*** *Solar power plant, wind power plant, renewable energy sources, power system.*

**Постановка проблеми**. Стрімке зростання встановлених потужностей ВДЕ в Україні та світі призвело до необхідності розробки методів та засобів, що реалізуються на етапах проектування та експлуатації, які дозволять використовувати всі позитивні аспекти відновлюваних джерел і одночасно компенсувати їх негативні властивості. Загальні питання пов'язані з провадженням енергетичної рівноваги, що необхідно для створення балансових потужностей в сучасній гібридній енергетичній системі, де поруч працюють традиційні джерела та відновлювані джерела, попит на які росте на енергетичному ринку України. Оскільки всі ці види енергії залежать від погодних умов, це створює похибки і небаланси в виробництві електроенергії. У зв'язку з цим, енергосистема країни стикається з новими викликами для забезпечення стабільного енергопостачання та надійного функціонування в умовах зростаючої частки ВДЕ та зменшенням потужності маневрової теплової генерації в наслідок руйнівної війни в Україні [1].

**Постановка завдання.** Метою статті є аналіз основних проблем, пов'язаних із впровадженням ВДЕ в енергосистему України, дослідження варіантів балансування енергії, що генерується з ВДЕ, а також визначення необхідних заходів для підвищення гнучкості та підвищення маневреності енергетичної системи, зокрема для успішної інтеграції з європейською енергосистемою ENTSO-E.

**Матеріал дослідження.** Завдяки вигідним умовам «зелених тарифів», здешевленню технологій, покращенню бізнес-клімату та значному технічному й економічному потенціалу в Україні помітно прискорився процес розвитку генерації з ВДЕ. У довоєнний період з кінця 2018 до другого кварталу 2021 року вітрові потужності зросли на 18 %, а сонячна генерація (фотовольтаїка) — на 78 %. За даними НКРЕКП [2], станом на 31 грудня 2021 року, загальна

встановлена потужність сектору ВДЕ досягла 9655,9 МВт, включно із сонячними установками для приватних домогосподарств (СЕС), або 8450,8 МВт без урахування СЕС (Рис.1).

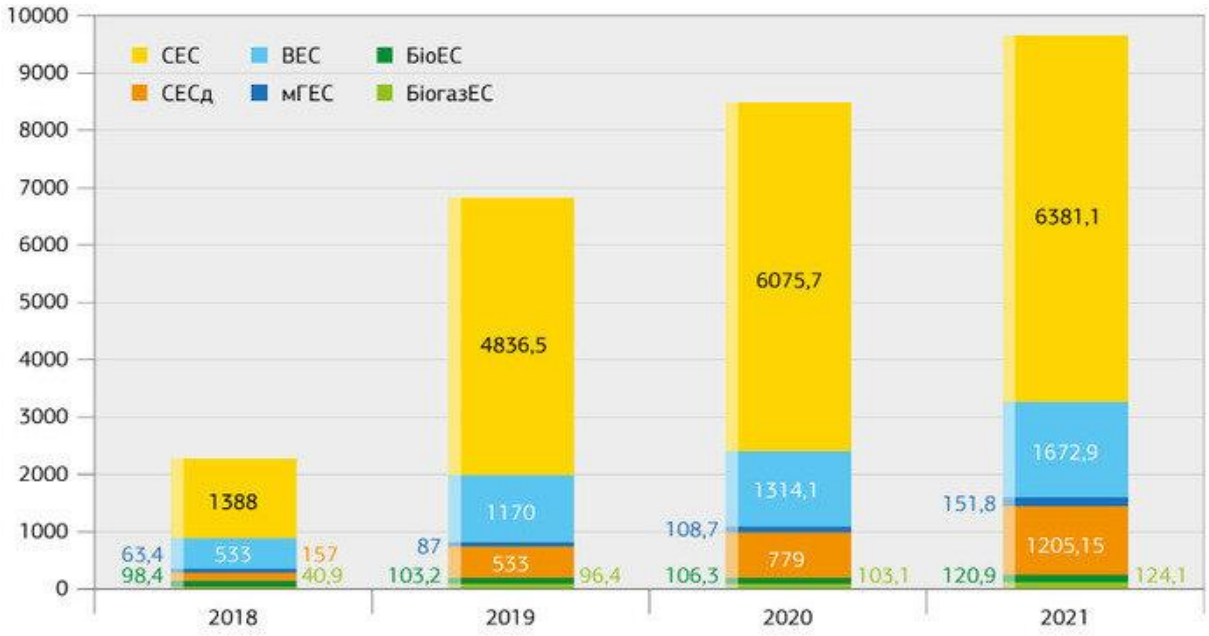


Рисунок 1 – Встановлена потужність джерел відновлюваної енергії за “зеленим тарифом”

*Динаміка росту встановленої потужності об’єктів ВДЕ, які працюють за «зеленим» тарифом, МВт Джерело: ГС «УВЕА», НКРЕКП, 2021 [3]*

Україна планує суттєво збільшити частку ВДЕ в енергетичному балансі, що викликало важливі обговорення щодо здатності енергосистеми впоратися з нестабільною вітровою та сонячною генерацією. За оцінками фахівців, українська енергосистема може забезпечити балансування коливань потужностей до 15 ГВт завдяки гнучкості існуючих атомних, теплових, гідроелектростанцій, а також гідроакумулюючих і когенераційних установок [4]. Певний обсяг надлишкової енергії з ВДЕ потрібно скорочувати лише при дуже високих частках генерації (від 15 ГВт), але навіть у такому випадку втрати не перевищуватимуть 10%.

У короткостроковій перспективі наявних потужностей буде достатньо для стабілізації коливань генерації ВДЕ, але в майбутньому, з огляду на «старіння» традиційних станцій та зростання попиту на енергоресурси, необхідно буде вживати заходів для підвищення маневреності енергосистеми. Інтеграція ВДЕ

потужністю понад 15 ГВт вимагає створення більш гнучкої системи, здатної відповідати стратегії декарбонізації. При цьому, інвестиції у нові енергетичні потужності, модернізацію мереж та підстанцій слід планувати з урахуванням довгострокової перспективи [4].

У майбутньому необхідно розглянути різні технологічні та нетехнологічні підходи для балансування коливань генерації з ВДЕ, такі як зберігання енергії, використання біогазу, розвиток ринку балансування, посилення транскордонної інтеграції та управління попитом.

Водночас впровадження вітрових (ВЕС) і сонячних (СЕС) електростанцій не знижує потребу в традиційній генерації, оскільки під час пікових навантажень СЕС не працюють, а ВЕС можуть бути малоефективними через безвітряну або слабовітряну погоду, що часто буває в періоди низьких температур, коли навантаження на енергосистему максимальне.

Підтримка потужностей наявних теплових електростанцій (ТЕС), розвиток гідроенергетики з використанням маломаневреного обладнання та збереження потужностей атомних електростанцій (АЕС) на поточному рівні не здатні забезпечити виконання вимог операційної безпеки та надійності енергопостачання. Це стосується і вимог щодо резервів для підтримки частоти, її відновлення та заміщення як у випадку ізольованого режиму роботи, так і під час паралельної роботи з іншими системами.

З появою електростанцій з негарантованою потужністю (ЕНП), до яких відносяться вітрові (ВЕС) і сонячні електростанції (СЕС), проблеми з достатністю резервів тільки посилюватимуться. Це пов'язано з тим, що ВЕС і СЕС мають мінливі потужності, що залежить від погодних умов, і тому виникають підвищені вимоги до стабілізації частоти, її відновлення та забезпечення надійного енергетичного обміну з іншими країнами згідно з контрактами. Потужність може різко змінюватися – як у бік збільшення, так і зменшення, причому з значними амплітудами. Оцінити ці зміни заздалегідь вкрай складно, що створює додаткові ризики.

Ще однією проблемою є велика різниця між фактичними показниками

генерації ВЕС і СЕС у різні дні та невідповідність плановим значенням [4]. Ці особливості роботи ВЕС та СЕС представлені на рисунку 2

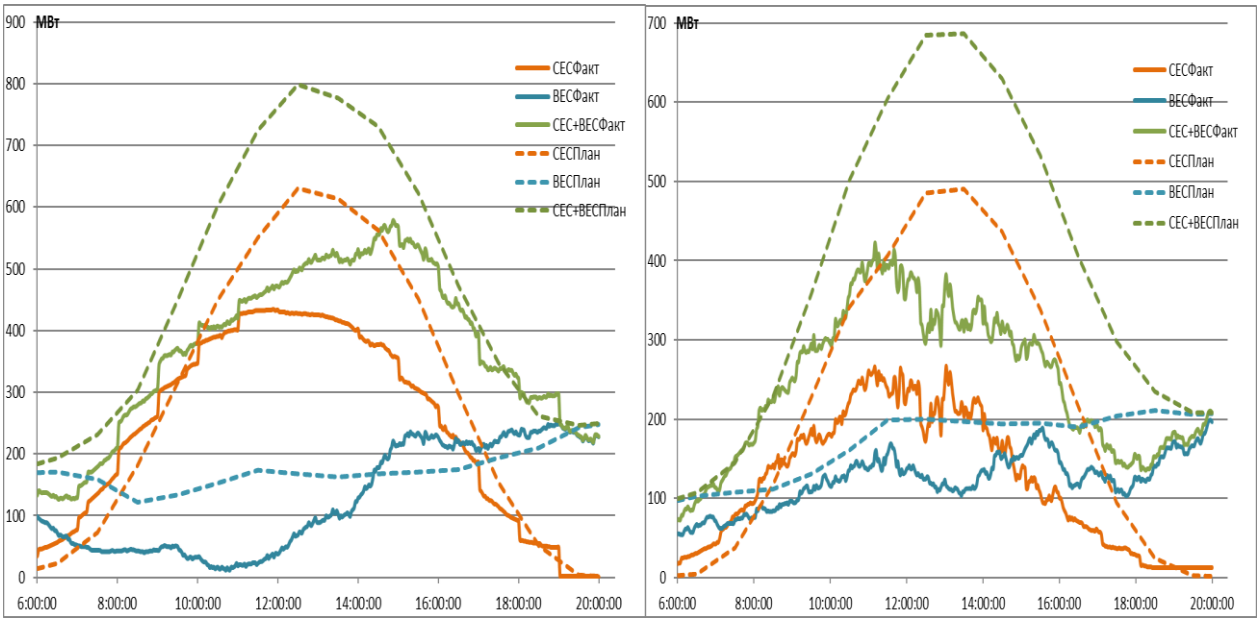


Рисунок 2 – Генерація (МВт) СЕС і ВЕС березень, червень 2021 р. в ОЕС України

Без урахування впливу ЕНП, потреба в резервах визначається для компенсації змін навантаження та похибок його прогнозу, щоб підтримувати частоту в межах допустимих значень, а також для відновлення частоти у випадку аварійних ситуацій. Наприклад, максимальна розрахункова аварія для Об'єднаної енергосистеми (ОЕС) України — це втрата генерації потужністю 1000 МВт або навантаження 500 МВт. Для усунення таких збоїв потрібно залучити резерви та відновити частоту протягом 15 хвилин, заміщуючи потужності, які вийшли з ладу [4].

Також слід зазначити, що активація третинних резервів (резервів заміщення) протягом 30 хвилин є досить жорсткою, але необхідною вимогою, особливо з огляду на зростання обсягів ВДЕ.

При паралельній роботі з енергосистемою ENTSO-E, згідно з нормативними документами [5], потреба в резерві для підтримки частоти становить ±190 МВт. Щодо додаткових резервів для відновлення частоти через роботу ЕНП, вони

мають визначатися на основі статистичних даних, або, при їх відсутності, приймаються на рівні 50 % від наявної потужності.

Робота ОЕС України в складі енергооб'єднання країн ЕС, значно мінімізує ризики щодо можливості системної аварії в ОЕС України і саме це, поряд з відносно невисокою потужністю ЕНП, яка значно почала зростати лише з осені 2018 року, обумовлює можливість достатньо надійної роботи вітчизняної енергосистеми з резервами, які суттєво нижчі вимог кодексу системи передачі КСП [5].

Без вирішення проблем із забезпеченням достатньої кількості генеруючих потужностей для роботи в ізольованому режимі, підключення Об'єднаної енергосистеми (ОЕС) України до ENTSO-E буде формально неможливим [6]. Враховуючи стан енергосистеми  під час війни в Україні, ці питання мають бути вирішені якнайшвидше для забезпечення енергетичної безпеки.

На сьогодні є чимало проблем, пов'язаних із відповідністю генеруючих потужностей ОЕС України та забезпеченням надійного енергопостачання споживачів. Для їхнього вирішення необхідно терміново вжити заходів щодо підвищення маневреності енергосистеми. Зокрема, поширення використання змінних відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), таких як вітрові та сонячні електростанції, створює нові виклики для розвитку та управління енергетичною системою [7].

Розглянемо три основні проблеми щодо роботи ВДЕ в ОЕС України:

**Проблема 1:** Надмірні коливання, які не можуть бути швидко збалансовані:

Збільшення частки ВДЕ в енергосистемі призводить до короткочасних коливань, викликаних погодними умовами. Коливання ВДЕ можуть спричиняти ринковий дисбаланс через різке збільшення або зменшення генерації електроенергії. Необхідно оцінювати розмір цих коливань і визначити, чи можна їх збалансувати, а також які методи для цього підходять. Також цікаво оцінити можливості режимів регулювання одиничною потужністю окремих джерел (вітроагрегатів, фотоелектричних панелей та інверторних перетворювачів).

**Проблема 2:** Надлишок електроенергії за умов низького споживання і високої генерації:

Надлишок енергії виникає, коли генерація перевищує споживання. Це найбільш вірогідно при великій кількості потужностей ВДЕ. Якщо одночасно працюють атомні електростанції, коли попит є низьким, це може спричинити серйозні проблеми в енергосистемі, аж до її виходу з ладу через перевантаження. Потрібно розробити алгоритми керування режимами роботи фотоелектричних масивів та групами вітроагрегатів на платформі «віртуальних електричних станцій», що розподілені територіально, але об'єднані системами управління.

**Проблема 3:** Брак електроенергії за умов високого споживання і низької генерації:

Ця проблема виникає, коли попит на електроенергію перевищує пропозицію, що найчастіше трапляється в разі низької генерації з ВДЕ, коли сонця або вітру недостатньо. Така ситуація стає особливо критичною, коли замість традиційних електростанцій енергосистему дедалі більше покладається на ВДЕ.

Незважаючи на зростання потужностей ВДЕ, передбачається, що парк традиційних електростанцій залишиться незмінним. Аналіз не враховує можливих обмежень, викликаних технологічними змінами в передачі електроенергії [8].

У статті розглянуто шість варіантів дій, які допоможуть впоратися з балансуванням потужностей ВДЕ. Ці варіанти дозволяють вирішувати проблеми різного рівня та масштабу, згадані вище (див. Таблицю 1)

Таблиця 1 – Варіанти балансування та їх зв’язок з проблемами

| **Варіант балансування** | Проблема 1 Колив. ВДЕ | Проблема 2 Надл. електроен. | Проблема 3 Брак електроен. |
|---|---|---|---|
| Оптимізація поєднання вітрової та сонячної генерації | ++ | ++ | ++ |
| Оптимізація розміщення потужностей ВДЕ | ++ | + | + |
| Оптимізоване використання традиційних та біогаз. потужностей | +++ | ++ | ++ |
| Зберігання електроенергії за допомогою гідроакумулювання | +++ | +++ | ++ |

Закінчення таблиці 1

| | | | |
|---|---|---|---|
| Скорочення електроенергії, отриманої за рахунок ВДЕ | | +++ | |
| Експорт надлишкової електроенергії | + | +++ | + |
| **Додаткові варіанти балансування** | | | |
| Регулювання попиту | ++ | +++ | +++ |
| Покращене прогнозування погоди | +++ | ++ | ++ |
| Інші технології зберігання (P-t-X, батареї, CAS) | +++ | +++ | +++ |

(Кількість плюсів позначає, якою мірою відповідний варіант може використовуватися для вирішення проблеми).

Засоби вирішення проблем щодо роботи ВДЕ в ОЕС України:

**1. Вибір місця розташування потужностей ВДЕ.**

Генерація електроенергії від нестабільних відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) залежить від рівня сонячного випромінювання та швидкості вітру в конкретних місцях [9]. Чим ширше розподілені сонячні та вітрові установки по території країни, тим менша нестабільність у загальному обсязі виробленої електроенергії. Це явище називається "географічним усередненням". Завдяки великій площі України (близько 603 тис. км²) та різноманітним кліматичним зонам, є багато місць, які підходять для розвитку ВДЕ. Використання таких відмінностей дозволяє зменшити коливання генерації шляхом стратегічного вибору місць для розташування електростанцій.

**2. Зберігання енергії за допомогою гідроакумуляції .**

Гідроакумулюючі станції (ГАЕС) дозволяють зберігати енергію і балансувати її виробництво від ВДЕ у довгостроковій перспективі в межах потужностей цих станцій. Основною перевагою таких станцій є швидка реакція на змінні потреби енергосистеми, але недоліком є зниження ефективності до 30 % через втрати при закачуванні і скиданні води для генерації енергії. В Україні гідроакумулюючі потужності досягли близько 1,3 ГВт, а загальний обсяг енергії, згенерованої цими станціями у 2021 році, становив близько 1,5 ТВт·год.

**3. Зберігання електроенергії та маневрування з використанням біогазу.**

Біогаз є найменш залежним від погодних умов джерелом відновлюваної енергії. Установки на біогазі зазвичай працюють постійно, з коефіцієнтом використання до 90 %, що робить їх стабільними і такими, що не потребують

додаткового балансування. Проте біогаз можна також використовувати для балансування генерації з інших ВДЕ, таких як сонячні або вітрові станції, гнучко реагуючи на потреби енергосистеми. Це можливо завдяки гнучкому виробництву або зберіганню біогазу.

**4. Надлишкова енергія при низькому споживанні та високому виробництві.**

Надлишкова енергія виникає, коли виробництво електроенергії перевищує попит. Цю проблему можна вирішити двома способами: зменшенням генерації або збільшенням попиту. На практиці це досягається тимчасовим зменшенням обсягів генерації ВДЕ або експортом надлишкової електроенергії. Тут можна змінювати потужність ВДЕ, керуючи кількістю підключених панелей або масивів панелей та кількістю вітроагрегатів.

**5. Скорочення генерації ВДЕ.**

Скорочення генерації означає зниження обсягів виробництва електроенергії до рівня, нижчого за можливий за поточних умов. Це часто відбувається у випадках високої генерації ВДЕ при низькому попиті або неспроможності гнучко реагувати на ці умови через обмеження традиційних електростанцій або систем зберігання енергії. Однак покращена інтеграція ВДЕ в енергосистему і кращі прогнози можуть суттєво зменшити потребу в скороченні генерації.

**6. Експорт надлишкової енергії.**

За даними дослідження [10], міжнародна торгівля енергією через експорт і імпорт є обмеженою опцією для балансування, оскільки тендери на ці операції часто плануються заздалегідь. Це не дозволяє оперативно реагувати на зміни в генерації. В Україні енергосистема поки що лише частково готова до міжнародного енергетичного балансування. Проте в майбутньому міжнародний обмін енергією може стати важливим інструментом для балансування коливань виробництва у великих регіонах. Це більш економічно доцільно, ніж розвиток систем зберігання енергії, таких як батареї. Подальша інтеграція енергосистеми України з системою ЄС відкриває можливості для експорту надлишкової енергії.

**Висновки.**

1. Для забезпечення стабільності енергосистеми України та надійного функціонування в умовах зростаючої частки ВДЕ необхідно вжити термінових заходів щодо збільшення резервів, покращення прогнозування генерації, розвитку технологій зберігання енергії та підвищення гнучкості системи.

2. Важливо враховувати варіанти оптимізації розташування ВДЕ, зберігання енергії через гідроакумуляцію, використання біогазових потужностей, а також розвиток ринку для експорту надлишкової енергії.

3. В подальшій роботі необхідно проаналізувати і розробити методи адаптивного керування потужністю в гібридних енергетичних системах. Визначити ефективність інтеграції різних типів накопичувачів енергії в поєднанні з ВДЕ. Розглянути вплив різних режимів роботи вітрових та сонячних електростанцій на загальну стабільність енергетичної системи.

**БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК:**

1. Лазуренко О.П.,Лисенко Д.І., Черкашина Г.І. Шокарьов Д.А. / Щодо принципів відновлення електроенергетичної системи України / Науковий журнал «Енергетика: економіка, технології, екологія». № 4 2022р https://doi.org/10.20535/1813-5420.4.2022.273415
2. Енергетична стратегія України на період до 2035 року "Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність", схвалена розпорядженням Уряду від 18 серпня 2017 р. № 605-р – Режим доступу: http://195.78.68.67/minugol/doccatalog/document?id=245234103
3. «Вітроенергетичний сектор України 2021 огляд ринку за рік до війни» від лютого 2021 р . 120-с.– Режим доступу https://uwea.com.ua/uploads/docs/uwea_2021_ua_web_2.pdf
4. Звіт з оцінки відповідності (достатності) генеруючих потужностей для покриття прогнозованого попиту на електроенергію та забезпечення необхідного резерву у 2021 році / НКРЕКП 2021 р.
5. Кодекс системи передачі / Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг/ № 309 від14.03.2018
6. Закон України від 13.04.2017 № 2019-VIII «Про ринок електричної енергії України» / Відомості Верховної Ради (ВВР), 2017, № 26-27, 312 с.
7. SAEE Ukraine: Energy efficency and renewable energy. State Agency on Energy Efficiency and Energy Saving of Ukraine Режим доступу: https://saee.gov.ua/en
8. Д-р Георг Захманн та д-р Франк Майсснер / Балансування нестійкої генерації з відновлюваних джерел енергії / Аналітична записка [PP/01/2018] BE Berlin Economics GmbH
9. D. Shokarov. V. Chorna, K. Bogodist. Economic feasibility study of expediency of establishment of solar modules in the private household Вісник НТУ «ХПІ». Серія: «Енергетика: надійність та енергоефективність». – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – Вип. № 31 (1253). – С. 87-92 ISSN 2224-0349
10. International Agency for Strategic Development of Climate Neutrality. Режим доступу: https://www.agora-energiewende.org/

**REFERENCES:**

1. Lazurenko O.P., Lysenko D.I., Cherkashyna H.I., Shokarov D.A. On the Principles of Restoring the Power System of Ukraine.* Scientific Journal "Energetyka: Economics, Technologies, Ecology", No. 4, 2022. [https://doi.org/10.20535/1813-5420.4.2022.273415](https://doi.org/10.20535/1813-5420.4.2022.273415)
2. Energy Strategy of Ukraine for the Period up to 2035 "Security, Energy Efficiency, Competitiveness", approved by the Government's resolution of August 18, 2017, No. 605-r. Available at:
http://195.78.68.67/minugol/doccatalog/document?id=245234103](http://195.78.68.67/minugol/doccatalog/document?id=245234103)
3. "Wind Energy Sector of Ukraine 2021: Market Overview One Year Before the War," February 2021, 120 p. Available at:
https://uwea.com.ua/uploads/docs/uwea_2021_ua_web_2.pdf](https://uwea.com.ua/uploads/docs/uwea_2021_ua_web_2.pdf)
4. Report on Conformity Assessment (Adequacy) of Generating Capacity to Cover Forecasted Electricity Demand and Ensure Necessary Reserve in 2021, NEURC, 2021.
5. Transmission System Code / National Commission for State Regulation of Energy and Public Utilities (NEURC), No. 309 from March 14, 2018.
6. Law of Ukraine from April 13, 2017, No. 2019-VIII "On the Electricity Market of Ukraine" / Official Bulletin of the Verkhovna Rada (VVR), 2017, No. 26-27, p. 312.
7. SAEE Ukraine: Energy Efficiency and Renewable Energy / State Agency on Energy Efficiency and Energy Saving of Ukraine. Available at: [https://saee.gov.ua/en](https://saee.gov.ua/en)
8. Dr. Georg Zachmann and Dr. Frank Meissner / Balancing Intermittent Renewable Energy Generation / Analytical Note [PP/01/2018], BE Berlin Economics GmbH.
9. D. Shokarov, V. Chorna, K. Bogodist. Economic Feasibility Study of the Expediency of Establishing Solar Modules in Private Households.* Bulletin of NTU "KhPI". Series: "Energy: Reliability and Energy Efficiency". Kharkiv: NTU "KhPI", 2017, Issue No. 31 (1253), pp. 87-92. ISSN 2224-0349.
10. International Agency for Strategic Development of Climate Neutrality. Available at: [https://www.agora-energiewende.org/](https://www.agora-energiewende.org/)

Надійшла до редакції 17.10.2024 р.