

DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-56-79>

УДК 338.12.015

# ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ Г АЛУЗІ ВІТРОЕНЕРГЕТИКИ ТА ЇЇ РОЗВИТОК В УКРАЇНІ

## THEORETICAL AND METHODOLOGICAL FOUNDATIONS OF THE WIND ENERGY INDUSTRY AND ITS DEVELOPMENT IN UKRAINE

**Абрамова Катерина Павлівна**

студентка,

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-4804-4901>**Гайдуцький Іван Павлович**

доктор економічних наук,

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4689-1665>**Abramova Kateryna, Gaidutskyi Ivan**

National Technical University of Ukraine Igor Sikorsky KPI

Стаття присвячена огляду основних теоретико-методологічних засад галузі відновлюваної енергетики, а також короткому окресленню етапів становлення української енергетичної інфраструктури, яка з часом набувала трансформацій у вигляді розвитку відновлювальних джерел енергії, зокрема, вітроенергетики. Проаналізовано та систематизовано наукові напрацювання низки вчених (вітчизняних та іноземних), які зробили вагомий внесок у розкриття феномену відновлюваної енергетики. Досліджено нормативно-правові акти та законодавчі документи України, що регламентують сферу альтернативної енергетики. Окреслено основні здобутки та позитивні динаміки розвитку вітрової енергетики України, що прослідковувались у довоєнний період, зокрема останні три роки до початку повномасштабного вторгнення. Зазначено основні збитки, втрати та приблизні експертні оцінки обсягів руйнації галузі вітрової енергетики внаслідок активних бойових дій з початку 2022 року.

**Ключові слова:** відновлювана енергетика, вітрова енергетика, вітрові джерела енергії, вітрогенератори, поствоєнне відновлення, технології, інновації.

The article is devoted to the review of the main stages of the formation of the Ukrainian energy infrastructure, which over time acquired transformations in the form of the development of renewable energy sources, in particular, wind energy. The scientific achievements of a number of scientists have been analyzed and systematized. The normative legal acts and legislative documents regulating the sphere of alternative energy are investigated. The main achievements and positive dynamics that were observed in the pre-war period, in particular the last three years before the full-scale invasion, are outlined. The main losses and approximate expert estimates of the volume of destruction of the wind industry as a result of active hostilities since the beginning of 2022 are indicated. The main purpose of the article is the theoretical and methodological analysis of the domestic energy sector, aimed at analyzing the development of wind energy sector in Ukraine. The relevance of the research lies primarily in the trends of transition to "clean" energy sources observed around the world in recent years. This is the main element of not only ecological, but also economic, financial, political development of any country. All advanced countries today, especially European countries, support all the "green" trends, which bring their economies to the top of the world rankings. Besides, as a result of active missile attacks on energy infrastructure by Russia in 2022–2023, there is a critical need to restore the domestic energy sector. Since high percentage of sources of energy production in Ukraine have been and remain on the basis of fossil fuels, it is appropriate to build alternative power plants in place of traditional ones, in particular wind ones. In the process of work, such methods of research as a system-analytical approach of studying the theoretical and methodological foundations of the functioning of energy infrastructure were used. In addition, in the process of performing the work, general scientific and methods of logical abstraction were



used, namely: logical and formal-logical methods, the method of scientific generalization, deduction and induction. Additionally, the methods of expert diagnostics: comparison, evaluation, as well as the method of economic and statistical analysis: tabular. The obtained results of the study include coverage of the main stages of development of the energy industry of Ukraine, the latest pre-war changes in this area and achievements in the formation of the wind industry, which allows us to make proposals for its further development in the war and post-war periods. The practical value of the article is to solve a serious energy crisis in the state, which arose at the end of 2022. Switching to alternative energy sources, namely wind energy, will help reduce CO<sub>2</sub> emissions into the air, stop environmental changes and balance the energy situation within the country.

**Keywords:** renewable energy, wind energy, wind energy sources, wind generators, post-war recovery, technologies, innovations.

**Постановка проблеми.** Розвиток вітроенергетики стає все більш актуальним у сучасному світі через низку проблем, які постають перед людством. Однією з таких проблем є глобальна кліматична криза, спричинена збільшенням концентрації парникових газів в атмосфері. Викопне паливо є основним джерелом цих викидів, а ще це є обмежений ресурс, що з часом вичерпується.

Україна має значний потенціал для розвитку відновлюваних джерел енергії, зокрема вітроенергетики. У цьому контексті Україна є привабливим місцем для розвитку цієї галузі через сприятливі вітрові умови та близькість до центрів попиту на енергію. До того ж, враховуючи втрати та руйнації, які зазнала енергетична галузь у 2022–2023 роках внаслідок масованих ракетних атак та активних бойових дій з боку РФ, проблема відновлення та розвитку «зелених» джерел енергії є ключовою та вкрай необхідною для успішного функціонування й розвитку української економіки. Тому дослідження принципів галузі відновлюваної енергетики та її розвитку в Україні є сучасним і актуальним.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Дослідженням теоретичних та практичних питань переходу на відновлювані джерела енергії й їх розвитку в Україні займається велика кількість науковців, серед яких: Тучинський Б., Кудря С., Іванченко І. [2], Хворостян Я. Є., Домнін Д. О. [3], Руда М. В., Бойко Т. Г. [3].

**Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми.** В процесі роботи більш широко розглянуто класифікацію методів оцінки ефективності вітрової енергії, а саме: враховано соціальний фактор – ставлення громади до встановлення енергетичних об'єктів, як один з методів оцінки ефективності.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Збільшення залежності від джерел енергії протягом ХХ століття, що викидають вуглець, означає, що енергетична про-

мисловість часто робить значний внесок у забруднення та вплив економіки на довкілля. Донедавна викопне паливо було основним джерелом виробництва енергії в більшості країн та головним джерелом глобального потепління та забруднення. У рамках адаптації людини до глобального потепління багато розвинених країн інвестують у відновлювані джерела енергії.

Виробництво та споживання енергетичних ресурсів є дуже важливим для світової економіки. Будь-яка економічна діяльність потребує енергетичних ресурсів, незалежно від того, чи то для виробництва товарів, забезпечення транспорту чи для роботи комп'ютерів. Широкий попит на енергію може стимулювати конкуруючі енергетичні підприємства та формування роздрібних ринків енергії.

У 2022 році галузь промисловості безпосередньо відповідала за викиди 9,0 Гт CO<sub>2</sub>, що становить чверть викидів CO<sub>2</sub> у світовій енергетичній системі. Річні викиди трохи знизилися як у 2020, так і в 2022 роках, але недостатньо для відповідності сценарію чистих нульових викидів до 2050 року (NZE), згідно з яким промислові викиди впадуть приблизно до 7 Гт CO<sub>2</sub> до 2030 року [1].

Вже досягнуто певних покращень у сфері енергоефективності та використання відновлюваної енергії, а також зроблено деякі позитивні кроки у сфері міжнародного співробітництва та інновацій. Однак прогрес відбувається надто повільно. Вища ефективність використання енергії, швидше впровадження палива з низьким вмістом вуглецю, а також активний розвиток виробничих процесів із майже нульовим рівнем викидів – все це необхідно для істотного прогресу на шляху до етапів сценарію NZE і має бути зроблено до 2030 р.

Оскільки була згадана теми енергоефективності та її значимості при плануванні генерації енергетичних ресурсів, то не можна не згадати за методи, що використовуються в науці задля оцінки ефективності конкретного виду енергії (в нашому випадку, вітрової).

Тож пропонується розглянути кілька методичних підходів щодо оцінки вітроенергетичної ефективності, що визнані світовою профільною спільнотою та включають такі елементи:

1. Оцінка життєвого циклу (LCA) – оцінює вплив продукту, процесу чи діяльності на навколишнє середовище протягом усього життєвого циклу [2]. Я. Є. Хворостян та Д. О. Домнін стверджують [3], що LCA є комплексним методом, який розглядає екологічні аспекти від видобутку ресурсів до утилізації. Однак М. В. Руда [4] стверджує, що LCA може не охопити всі непрямі ефекти.

2. Нормована вартість енергії (LCOE) – розраховує вартість одиниці електроенергії протягом усього терміну експлуатації активу, що виробляє енергію, включаючи всі витрати, такі як встановлення, експлуатація та технічне обслуговування [2]. Б. Тучинський та інші вважають [2], що LCOE забезпечує чіткий економічний показник для порівняння різних джерел енергії, однак не повністю відображає суспільні переваги енергії вітру. Загалом, доведено, що нормована вартість вітрової енергії найвища, після газу (рис. 1).

3. Окупність інвестицій (EROI) – оцінює вихідну енергію системи порівняно з енергоспоживанням, необхідним для її будівництва, експлуатації та виведення з неї [4]. Має вирішальне значення для розуміння чистого приросту енергії від вітрових проєктів,

однак не враховує переривчастий характер вітрової енергії.

4. Соціальне визнання та сприйняття громадськістю – враховує громадське ставлення та сприйняття вітроенергетичних проєктів у громаді. Власне, цей елемент є найбільш суб'єктивним, який фактично неможливо виміряти на основі виробничих показників.

На основі запропонованих методів можна також зробити їх порівняння, для визначення найбільш релевантного та доцільного (табл. 1).

Отже, при оцінці ефективності розвитку вітроенергетики вибір відповідної методології є вирішальним. Очевидно, що кожен підхід має свої сильні та слабкі сторони, і вибір методології має узгоджуватися з конкретними цілями та міркуваннями даної оцінки. До того, залежно від місцевості розташування, локального законодавства, потреб споживачів, менталітету тощо необхідно комплексно оцінювати ситуацію та, за потреби, користуватись не одним методом, а кількома одночасно, для вищої ефективності.

В Україні перехід від централізованої планової до ринково-орієнтованої економіки породив складнощі в узгодженні економічної теорії з прагматичними викликами енергетичного сектора. Проте уряд визнав потенціал відновлюваних джерел не лише як засіб скорочення викидів парникових газів, але й як стратегію підвищення енергетичної безпеки.

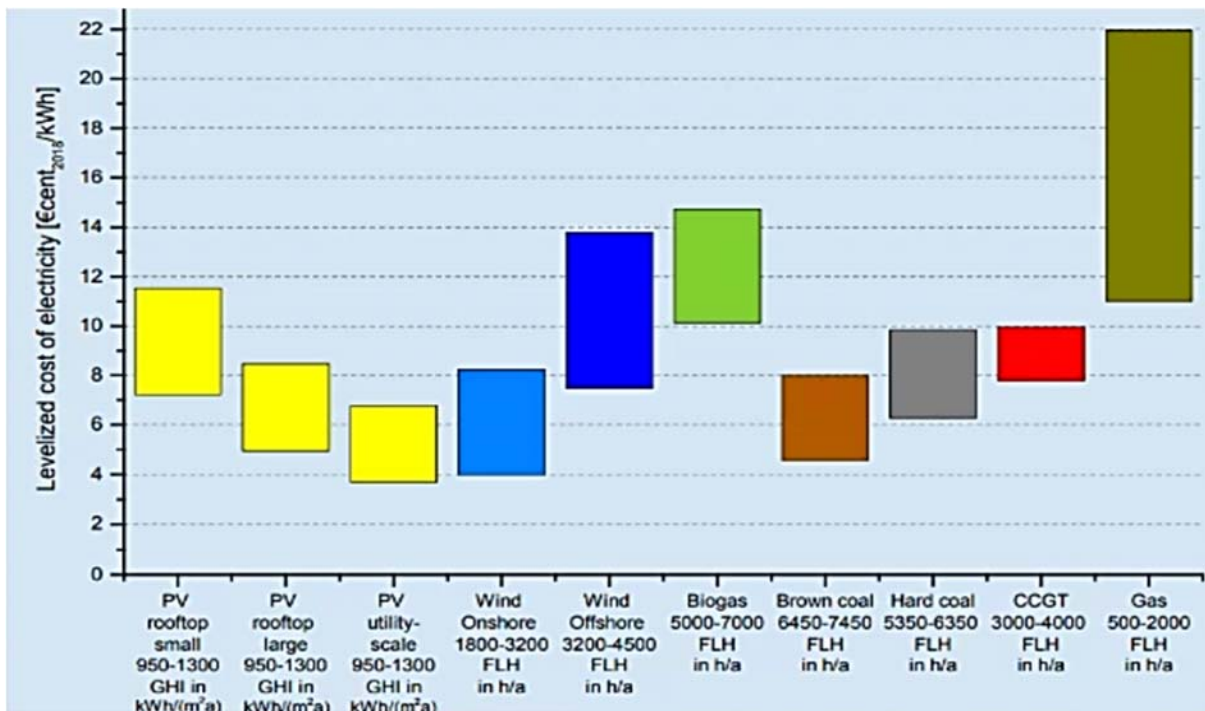


Рис. 1. Нормована вартість різних видів відновлюваної енергії

Джерело: [5]

Таблиця 1

## Порівняльний аналіз методологій оцінки вітрової енергоефективності

Методологія	Сильні сторони	Слабкі сторони
Оцінка життєвого циклу	Комплексний, враховує весь життєвий цикл.	Може пропустити непрямі ефекти
Нормована вартість енергії	Чіткий економічний показник для порівняння.	Можливо, не охопить усіх суспільних переваг.
Повернення інвестицій в енергію	Зосереджено на чистому прирості енергії.	Не враховує переривчастий характер енергії вітру.
Соціальне прийняття	Опирається на місцеве сприйняття громади.	Вразливе до зовнішнього впливу та дезінформації.

*Джерело: складено автором на основі [2; 3; 4]*

Розвиток вітроенергетики в Україні зіткнувся з проблемами, зокрема відсутністю встановленої нормативної бази та фінансових стимулів. Однак, усвідомлюючи потенційні переваги, український уряд вжив заходів для створення сприятливого середовища. Поворотним моментом для вітрової енергетики в Україні стало створення законодавчої бази для підтримки проєктів у сфері відновлюваної енергетики. Значною віхою став Закон України «Про альтернативні джерела енергії» [6], прийнятий у 2003 році. Цей закон створив правову основу для розвитку вітрової та інших відновлюваних джерел енергії, окресливши принципи тарифікування та стимули для залучення інвестицій [6], що заклало початок планомірного розвитку відновлюваної енергетики, зокрема вітрової.

У середині 2000-х років в Україні почали поступово нарощувати вітроенергетичні проєкти. Почали з'являтися вітряні електростанції з більшою потужністю, що сприяло зростанню потенціалу відновлюваної енергетики країни. Встановлення пільгових тарифів на електроенергію, вироблену з відновлюваних джерел, включаючи вітрову, забезпечило інвесторам передбачуваність і забезпечило прийнятну віддачу від інвестицій.

У міру розширення сектору вітроенергетики технологічний прогрес відіграв вирішальну роль у підвищенні ефективності та надійності. На зміну попереднім моделям прийшли сучасні вітрові турбіни з більшою потужністю та покращеними експлуатаційними характеристиками. Такі інновації, як інтеграція розумної електромережі, дистанційний моніторинг і оптимізоване розташування вітряних електростанцій, стали стандартною практикою.

У 2019 році наша країна забезпечила собі місце в десятці країн у світі за темпами роз-

витку відновлюваної енергетики. Зокрема, у 2019 році Україна піднялася на 8 позицію в рейтингу Climatescope від Bloomberg New Energy Finance [7], що підкреслює її привабливість для інвестицій у низьковуглецеву енергетику. Незважаючи на незначне зниження рейтингу BloombergNEF у 2021 році, Україна зберегла позиції країни із значним інвестиційним потенціалом. З 2019 року інвестиції в нові проєкти з відновлюваної енергетики стабільно випереджають інвестиції в проєкти з викопного палива. За останнє десятиліття міжнародні та українські інвестори з ВДЕ вливали в економіку України понад 12 млрд доларів США прямих іноземних інвестицій. Станом на кінець 2021 року більше 35% встановленої потужності ВДЕ належало іноземним інвесторам, що зображує український сектор ВДЕ як висококонкурентний і відкритий [8]. У 2021 році українська енергетика опинилася на критичному рубежі перед необхідністю вибору траєкторії майбутнього розвитку. Цей ключовий момент поширив свій вплив на сектор відновлюваних джерел енергії, додавши елемент невизначеності.

Проте, на жаль, масштабна війна, ініційована Росією на українській землі у лютому 2022 року, занурила сектор ВДЕ у стан очікування та невизначеності. Активні бойові дії, пошкодження та окупація енергетичних об'єктів у поєднанні з додатковими викликами, створеними окремими державними структурами, поглибили скрутне становище галузі. Станом на момент початку широкомасштабного вторгнення, «зелену» енергію в Україні виробляли 34 ВЕС, включно з окупованими територіями. Найбільшими з них були Ботівська, Приморська, Мирненська, Орлівська, Овер'янівська та Новоазовська, до того ж, більшість були введені в експлуатацію у 2019 році [9]. Станом на серпень 2022 року, за

оцінками експертів, уже постраждали 30–40% електростанцій ВДЕ в цих регіонах, що еквівалентно приблизно 1120–1500 МВт встановленої потужності [10]. Українська вітроенергетична асоціація повідомляє про значний вплив, оскільки через війну було зупинено більш ніж  $\frac{3}{4}$  вітроенергетичних потужностей. Із загальної потужності 1673 МВт приблизно 1462 МВт українських вітрогенераторів зараз не працюють [9].

**Висновки.** За результатами проведеного дослідження теоретико-методичних засад становлення та розвитку вітроенергетичної системи в Україні та світі можна зробити наступні висновки:

1. Розглянуто роботи багатьох науковців, вчених та профільних фахівців, що дотримуються різних формулювань та методик оцінювання ефективності виробництва й використання вітрової енергії. Методологія інтегрального показника, яка виділена, як найбільш комплексна й точна, пропонує структурований і комплексний підхід до оцінки ефективності альтернативних джерел енергії, адже охоплює ринкове середовище,

державне регулювання та інвестиційно-інноваційне середовище.

2. Проаналізувавши основні етапи становлення сектору «зеленої» енергетики, можна сказати, що незважаючи на значний потенціал для підвищення енергоефективності, Україна ще не повністю використала цей ресурс. Проте зараз Україна стикається з проблемами, пов'язаними з повномасштабною війною, високою інтенсивністю енергоспоживання, економічною нерівністю та екологічними проблемами. Усі позитивні зміни та проблеми підтверджують ключову роль відновлюваних джерел енергії у післявоєнній відбудові, передбачаючи сталу, вуглецево-нейтральну та безпечну енергетичну систему.

Тож, розвиток альтернативних джерел енергії, зокрема вітрових, надає переваги з будь-якої точки зору. Зокрема, Україна, як сьогоднішній кандидат на вступ до ЄС, зобов'язана розвивати сферу альтернативних джерел енергії навіть під час війни, не лише з огляду на їх високу ефективність, але й на європейські вимоги низьковуглецевого функціонування.

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ:

1. Офіційний сайт міжнародної енергетичної агенції. Сценарій нульових вуглецевих викидів до 2050. URL: <https://www.iea.org/reports/global-energy-and-climate-model/net-zero-emissions-by-2050-scenario-nze> (дата звернення: 20.11.2023).
2. Тучинський Б., Кудря С., Іванченко І. Математична модель аналізу чутливості економічної ефективності інвестиційного проекту вітрової електростанції. *Vidnovluvana energetika*. 2020. № 3 (62). С. 42–50.
3. Хворостян Я. С., Домнін Д. О. Підвищення ефективності роботи гібридних енергосистем з вітроенергетичними установками шляхом використанням інноваційних методів оптимізації і моделювання. *Міжнародний науково-технічний журнал "Сучасні проблеми електроенергетичної та автоматики"*, 2021. С. 466–467.
4. Руда М. В., Бойко Т. Г. Оцінка еколого-економічної ефективності життєвого циклу вітрової установки. Інтеграція освіти, науки та бізнесу в сучасному середовищі: зимові диспути: тези доп. І Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції, 6–7 лютого 2020 р. Дніпро, 2020. Т. 3. С. 109.
5. Офіційний сайт компанії сонячної енергії Solarity. Що таке LCOE? URL: <https://solarity.eu/ua/blog/what-does-lcoe-mean/> (дата звернення: 21.11.2023).
6. Про альтернативні джерела енергії : Закон України від 20.02.2003 № 555-IV. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/555-15> (дата звернення: 21.11.2023).
7. Climatescope by BloombergNEF. URL: <https://www.global-climatescope.org/> (дата звернення: 22.11.2023).
8. Економічна правда. Wind of change: які зміни несе вітрова енергетика Україні: веб-сайт. URL: <https://www.epravda.com.ua/columns/2023/01/6/695729/> (дата звернення: 23.11.2023).
9. Офіційний сайт Вітроенергетичної Асоціації України. URL: <https://uwea.com.ua/> (дата звернення: 24.11.2023).
10. Майже всі потужності вітроенергетики України знищені через війну – дослідження. URL: <https://forbes.ua/news/mayzhe-vsi-potuzhnosti-vitroenergetiki-ukraini-znishcheni-vnaslidok-rosiyskogo-vtorgnepnyu-doslidzhennya-14092022-8344> (дата звернення: 24.11.2023).

#### REFERENCES:

1. International Energy Agency (IEA). Net Zero Emissions by 2050 Scenario (NZE). Available at: <https://www.iea.org/reports/global-energy-and-climate-model/net-zero-emissions-by-2050-scenario-nze> (accessed November 20, 2023).

2. Tuchynskiy B., Kudria S., Ivanchenko I. (2020) Matematychna model analizu chutlyvosti ekonomichnoi efektyvnosti investytsiinoho proektu vitrovoi elektrostansii [Renewable energy. Mathematical model of sensitivity analysis of economic efficiency of an investment project of a wind power plant]. *Vidnovluvana energetika*. No. 3 (62), pp. 42–50. (in Ukrainian)
3. Khvorostian, Ya. Ye., Domnin, D. O. (2021) Pidvyshchennia efektyvnosti roboty hibrydnykh enerhosystem z vitroenerhetychnykh ustanovkamy shliakhom vykorystanniam innovatsiinykh metodiv optymizatsii i modeliuvannia. *Mizhnarodnyi naukovo-tekhnichnyi zhurnal "Suchasni problemy elektroenerhotekhniky ta avtomatyky"* [International Scientific and Technical Journal "Modern Problems of Electric Power Engineering and Automation". Improving the efficiency of hybrid power systems with wind power plants using innovative optimization and modeling methods], pp. 466–467. (in Ukrainian)
4. Ruda, M. V., Boiko, T. H. (2020) Otsinka ekoloho-ekonomichnoi efektyvnosti zhyttievoho tsykladu vitrovoi ustanovky. *Intehratsiia osvity, nauky ta biznesu v suchasnomu seredovyschi: zymovi dysputy: tezy dop. I Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi internet-konferentsii* [Integration of education, science and business in the modern environment: winter disputes: theses I International Scientific and Practical Internet Conference. Assessment of environmental and economic efficiency of the life cycle of a wind installation], February 6s-7s, pp. 109. (in Ukrainian)
5. Ofitsiynyi sait kompanii soniachnoi enerhii Solarity. Shcho take LCOE? [The solar company Solarity. What is LCOE?]. Available at: <https://solarity.eu/ua/blog/what-does-lcoe-mean/> (accessed: November, 21 2023).
6. Pro alternatyvni dzherela enerhii : Zakon Ukrainy vid 20.02.2003 № 555-IV. [The Verkhovna Rada of Ukraine. The law about alternative sources of energy]. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/go/555-15> (accessed: November, 21 2023).
7. Climatscope by BloombergNEF. Available at: <https://www.global-climatescope.org> (accessed: November, 22 2023).
8. Ekonomichna pravda. Wind of change: yaki zminy nese vitrova enerhetyka Ukraini [Economic truth. Wind of change: which changes bring wind energy for Ukraine]. Available at: <https://www.epravda.com.ua/columns/2023/01/6/695729/> (accessed: November, 23 2023).
9. Ofitsiynyi sait Vitroenerhetychnoi Asotsiatsii Ukrainy. [Wind Energy Association of Ukraine]. Available at: <https://uwea.com.ua/> (accessed: November, 24 2023).
10. Maizhe vsi potuzhnosti vitroenerhetyky Ukrainy znyshcheni cherez viinu – doslidzhennia [Almost all of Ukraine's wind power capacity destroyed due to war – research]. Available at: <https://forbes.ua/news/mayzhe-vsi-potuzhnosti-vitroenergetiki-ukraini-znishcheni-vnaslidok-rosiyskogo-vtorgnennya-doslidzhennya-14092022-8344> (accessed: November, 24 2023).