

ГЛОБАЛЬНІ ВИКЛИКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ СТРУКТУРНОГО РОЗВИТКУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКИ УКРАЇНИ

©2022 КИЗИМ М. О., ШПІЛЄВСЬКИЙ В. В., ЗІНЧЕНКО В. А., ШПІЛЄВСЬКИЙ О. В.

УДК 338.45:621.31
JEL: L94

Кизим М. О., Шпілевський В. В., Зінченко В. А., Шпілевський О. В. Глобальні виклики та перспективи структурного розвитку електроенергетики України

Однією з важливих проблем економічного розвитку України сьогодні є низька енергоефективність суспільного виробництва при високому рівні зовнішньої енергозалежності. Мета дослідження полягає у визначенні сучасних глобальних викликів, та, з урахуванням них, окреслення перспектив структурного розвитку електроенергетики України. Сучасне бачення перспектив енергетичного розвитку світової економіки проаналізовано на основі результатів форсайт-прогнозів провідних міжнародних інституцій та енергетичних компаній. Проаналізовано зміст глобального енергетичного переходу та його основних напрямів в електроенергетичному секторі. Визначено, що поряд із парадигмою глобального енергетичного переходу значна увага світового суспільства приділяється розвитку екологічно безпечних способів генерації, до яких передусім відносять електрогенерацію на основі відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). Сукупність технологій електрогенерації розподілено на два типи за двома загальними ознаками ресурсів: 1 – технології електрогенерації, в основу яких закладено процес перетворення органічного та ядерного палива в електроенергію; 2 – технології електрогенерації, в основу яких закладено процеси перетворення енергії невичерпних і відновлюваних джерел енергії (крім біологічних) в електроенергію. Розроблено методику обчислення та порівняння ресурсних характеристик технологій електрогенерації; розраховано ресурсоемність; наведено витрати на виробництво електроенергії за технологіями електрогенерації; надано порівняльну комплексну (техніко-економічну) оцінку ефективності технологій на основі застосування матричного методу. На основі проведеного аналізу складено загальний рейтинг ефективності технологій електрогенерації. Визначено технології, доцільні до використання в Україні. Доведено, що першочерговими заходами зі структурно-технологічної модернізації енергетичного комплексу України повинна стати реалізація напрямів розвитку, що узгоджуються з положеннями парадигми глобального енергетичного переходу, а саме: створення системи управління енергомережею нового покоління (smart grids); розвиток розподіленої енергетики.

Ключові слова: енергетика, глобальний енергетичний перехід, електроенергетика, Україна, глобальні виклики, форсайт-прогнози, структурний розвиток, структурно-технологічна модернізація, електрогенерація, технології електрогенерації, відновлювані джерела енергії, розподілена енергетика.

Рис.: 3. **Табл.:** 4. **Формул:** 3. **Бібл.:** 25.

Кизим Микола Олександрович – доктор економічних наук, професор, член-кореспондент НАН України, проректор Харківського національного університету міського господарства ім. О. М. Бекетова (вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, 61002, Україна)

E-mail: m.kyzym@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8948-2656>

Researcher ID: <https://publons.com/researcher/3118229/mykola-kyzym/>

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57216130870>

Шпілевський Володимир Вікторович – кандидат економічних наук, завідувач відділу промислової політики та енергетичної безпеки, Науково-дослідний центр індустріальних проблем розвитку НАН України (пров. Інженерний, 1а, 2 пов., Харків, 61166, Україна)

E-mail: shpilevskiyv@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2003-0632>

Зінченко Володимир Анатолійович – доктор економічних наук, старший науковий співробітник Науково-дослідного центру індустріальних проблем розвитку НАН України (пров. Інженерний, 1а, 2 пов., Харків, 61166, Україна)

E-mail: zinchenko.vlan@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4293-7101>

Шпілевський Олексій Володимирович – молодший науковий співробітник, Науково-дослідний центр індустріальних проблем розвитку НАН України (пров. Інженерний, 1а, 2 пов., Харків, 61166, Україна)

E-mail: ndc_ipr@ukr.net

UDC 338.45:621.31
JEL: L94

Kyzym M. O., Shpilevskiy V. V., Zinchenko V. A., Shpilevskiy O. V. Global Challenges and Prospects for the Structural Development of Ukraine's Electric Energy Industry

One of the important problems of the economic development of Ukraine today is the low energy efficiency of social production with a high level of external energy dependence. The purpose of the study is to define modern global challenges, and, with account of them, to outline the prospects for the structural development of the electric energy industry in Ukraine. The current vision of the prospects for the energy development of the world economy is analyzed on the basis of the results of foresight forecasts, accomplished by the leading international institutions and energy companies. The content of the global energy transition and its main directions in the electric energy sector is analyzed. It is determined that along with the paradigm of the global energy transition, considerable attention is paid to the development of environmentally friendly generation methods, which primarily include electric energy generation based on renewable energy sources (RES). The aggregate of power generation technologies is divided into two types according to two common features of resources: 1 – power generation technologies, which are based on the process of converting organic and nuclear fuel into electric energy; 2 – power generation technologies, which are based on the processes of converting energy of inexhaustible and renewable energy sources (except biological) into electric energy. A methodology for calculating and

comparing the resource characteristics of power generation technologies is developed; resource intensity is computed; the costs of electric energy production using power generation technologies are provided; a comparative comprehensive (technical-economic) assessment of the efficiency of technologies based on the use of the matrix method is presented. Based on the carried out analysis, an overall rating of the efficiency of power generation technologies is compiled. Technologies expedient for use in Ukraine have been identified. It is proved that the priority measures for the structural-technological modernization of the energy complex of Ukraine should be the implementation of development directions consistent with the provisions of the paradigm of the global energy transition, namely: the creation of a new generation power grid management system (smart grids); development of distributed energy.

Keywords: energy industry, global energy transition, electric energy, Ukraine, global challenges, foresight forecasts, structural development, structural and technological modernization, power generation, power generation technologies, renewable energy sources, distributed energy industry.

Fig.: 3. **Table.:** 4. **Formulae:** 3. **Bibl.:** 25.

Kyzym Mykola O. – D. Sc. (Economics), Professor, Corresponding Member of NAS of Ukraine, Pro-rector of the O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv (17 Marshala Bazhanova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine)

E-mail: m.kyzym@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8948-2656>

Researcher ID: <https://publons.com/researcher/3118229/mykola-kyzym/>

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorid=57216130870>

Shpilevskiy Volodymyr V. – PhD (Economics), Head of Department of Industrial Policy and Energy Security, Research Centre of Industrial Problems of Development of NAS of Ukraine (2 floor 1a Inzhenernyi Ln., Kharkiv, 61166, Ukraine)

E-mail: shpilevskyyv@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2003-0632>

Zinchenko Volodymyr A. – D. Sc. (Economics), Senior Research Fellow of the Research Centre of Industrial Problems of Development of NAS of Ukraine (2 floor 1a Inzhenernyi Ln., Kharkiv, 61166, Ukraine)

E-mail: zinchenko.vlan@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4293-7101>

Shpilevskiy Oleksii V. – PhD (Economics), Junior Research Fellow, Research Centre of Industrial Problems of Development of NAS of Ukraine (2 floor 1a Inzhenernyi Ln., Kharkiv, 61166, Ukraine)

E-mail: ndc_jpr@ukr.net

Однією з важливих проблем економічного розвитку України сьогодні є низька енерго-ефективність суспільного виробництва при високому рівні зовнішньої енергозалежності. Висока енергоємність виробництва є одним із факторів, що визначають невисоку конкурентоспроможність вітчизняної продукції як на внутрішньому, так і на зовнішньому ринках. Подолання цих проблем визнано на державному рівні пріоритетними напрямками розвитку науки і техніки. Однак суттєвих позитивних тенденцій у паливно-енергетичній сфері країни до сьогодні ще не досягнуто.

Разом із тим енергетичні реформи, що здійснюються в Україні, мають на меті імплементацію європейського наднаціонального, здебільшого конкурентного, законодавства в національну практику в умовах відсутності бачення енергетичної моделі країни, узгодженою з тенденціями та стратегічними напрямками економічного розвитку країни, що створює цілий ряд проблем у сфері її енергозабезпечення, таких як нерациональна структура джерел первинної енергії, надлишок потужностей енергоперетворення, високі втрати енергії при постачанні споживачам та ін. Основною причиною виникнення цих негативних явищ є неузгодженість структурних зрушень у національній економіці та енергетиці.

Різним аспектам проблеми розвитку вітчизняної енергетики загалом та електроенергетики зокрема присвячено ряд робіт науковців, серед яких: І. Хоменко, О. Плахтій, В. Нерубацький, І. Стасюк; М. Суппонен; В. Омельченко, В. Сіденко, М. Біляв-

ський; О. Суходоля, Ю. Харазішвілі, Д. Бобро; В. Хаустова; Т. Салашенко; Є. Котляров; О. Лелюк та ін. [1–10]. Проте існування цілого ряду не вирішених проблем у розвитку вітчизняної електроенергетики, що поглиблюються впливом нових глобальних викликів, потребує продовження досліджень у цьому напрямку.

Мета дослідження полягає у визначенні сучасних глобальних викликів, та, з урахуванням них, окреслення перспектив структурного розвитку електроенергетики України.

Ключові позиції сучасного бачення перспектив енергетичного розвитку світової економіки формуються під впливом результатів форсайт-прогнозів, що розробляються провідними міжнародними інституціями та енергетичними компаніями, серед яких окремо слід виділити: Прогноз світової енергетики Міжнародного Енергетичного Агентства (МЕА) за 2016 р. [11], Міжнародний енергетичний прогноз Адміністрації енергетичної інформації США (АЕІ США) за 2016 р. [12], Прогноз розвитку енергетики світу і Росії до 2040 р. Інституту енергетичних досліджень РАН (ІНЕД) за 2014 р. [13], Інституту економіки енергетики Японії (ІЕЕЯ) за 2016 р. [14], British Petroleum (BP) за 2016 р. (BP-2016) [15] і Exxon Mobil (EM) за 2016 р. [16]. Горизонт більшості форсайт-прогнозів, за винятком BP, складає 25 років, «що дозволяє адекватно оцінювати картину й економічну ефективність проєктів з можливістю побачити наслідки прийнятих рішень (як правило, з моменту прийняття інвестиційного рішення до введення вели-

ких енергетичних об'єктів в експлуатацію проходить до 10 років, термін окупності може перевищувати 15 років)» [13].

Найбільш широко визнаною у світі організацією з питань форсайт-прогнозування є МЕА, яке має більш ніж 10 річний досвід розробки прогнозів світової енергетики (з 2004 р.). Із 2010 р. загальноприйнятим став сценарний підхід, згідно з яким дотепер розробляються три сценарії розвитку світової енергетики [11]:

- ✦ *сценарій нинішньої політики (екстраполяційний)*, який враховує тільки прийняті національні заходи в енергетичній сфері без урахування майбутніх змін;
- ✦ *сценарій нової політики (форсайт-прогноз)*, що приймає до уваги як прийняті напрямки в енергетичній політиці, так і взяті на себе зобов'язання, які будуть реалізовані в майбутньому об'єктивно, виходячи з критерію економічної доцільності;
- ✦ *сценарій-50 (оптимістичний)*, що адаптує політичні заходи з імовірністю 50% на шлях обмеження середньосвітової температури на 2 °С в довгостроковій перспективі порівняно з доіндустріальним рівнем.

Найбільшої уваги в рамках даного дослідження заслуговують такі висновки за прогнозами світової енергетики (ПСЕ), виконаними МЕА.

Вугілля було і залишається основним джерелом електрогенерації, хоча останні форсайт-прогнози вбачають сповільнення зростання енергоефективності вугільної електрогенерації. Це свідчить про низькі темпи та бар'єри на шляху проникнення прогресивних технологій у вугільну електрогенерацію. Аналогічне сповільнення відзначається і за питомими викидами CO₂ від вугільної електрогенерації.

Разом із цим визначається, що потужності вугільної електрогенерації зростають більш прискореними темпами, аніж обсяг виробництва електроенергії, що визначає зниження інтенсивності використання виробничих потужностей. Даний прогноз складено з урахуванням зміни в призначенні вугільної електрогенерації, а саме: переходу від роботи ТЕС у базовому режимі до роботи в регулюючому режимі покриття коливань потужності генерації на основі ВДЕ.

Зважаючи на високу питому вагу вугільної електрогенерації як у поточній, так і в майбутній енергетичній картині світу, МЕА розглядає її як невід'ємну складову технологічних перетворень. Ще у 2012 р. МЕА розробило технологічну дорожню карту по розгортанню HELE-технологій (*High-Efficiency, Low-Emissions Coal-Fired Power Generation* – високоефективна та низьковуглецева вугільна електрогенерація). Обґрунтування необхідності розвитку HELE-технологій обумовлено нижченаведеними причинами [17]:

- ✦ у багатьох країнах досі використовується неефективні технології електрогенерації з низькими вартістю та якістю вугілля;
- ✦ хоча випробування показали потенціал зі скорочення викидів від спільного спалювання біомаси, така практика не є широко поширеною;
- ✦ експлуатація вугільних електростанцій супроводжується споживанням великої кількості води, що представляє причину серйозного занепокоєння в посушливих регіонах;
- ✦ забруднення непарниковими газами може викликати серйозні проблеми зі здоров'ям і часто шкодить місцевій інфраструктурі та, як наслідок, економіці. Хоча технології для зниження таких викидів вже доступні, не всі країни ще поширили їх ефективно.

Своєчасне розгортання технологій наступного покоління, зокрема, здатне продемонструвати таке [17]:

- ✦ передові технології спалювання та газифікації вугілля;
- ✦ інтеграцію технологій уловлювання CO₂ з технологіями спалювання та газифікації належного рівня
- ✦ підвищення ефективності електрогенерації з первинного, недорогого вугілля, низької якості;
- ✦ зменшення витрат води за HELE-технологій при збереженні їх продуктивності.

Мета розгортання HELE-технологій двояка: підвищити ефективність перетворення та скоротити викиди CO₂. Перспективними HELE-технологіями вбачаються такі [17]: технології надкритичних (SC) та ультранадкритичних (USC), а також просунутих ультранадкритичних (A-USC) параметрів пари, а також комбінованого циклу з інтегрованою газифікацією вугілля (IGCC).

Перші дві технології забезпечують базове навантаження та доступні вже зараз. Вугілля низької якості або низькосортне (наприклад, лігніт) є кандидатами для більш ефективної електрогенерації, зокрема з використанням сушіння до його спалювання. Розширене використання IGCC забезпечує найвищу енергоефективність і найнижчі шкідливі викиди, до того ж, прийнятна для використання в пікових режимах експлуатації.

Природному газу відводиться особливе місце у світовій електрогенерації майбутнього, оскільки серед викопних паливно-енергетичних ресурсів він характеризується найнижчими питомими викидами шкідливих речовин, здатний покривати пікові навантаження в енергосистемах і має відносно розвинуті технології, які дозволяють будувати нові генеруючі потужності з порівняно меншими капітальними витратами. Форсайт-прогнози МЕА передбачають прискорені темпи зростання газоспоживання.

Так, згідно з прогнозами МЕА, передбачається зростання вагомості природного газу в загальному світовому енергобалансі. Прогнозується, що до 2035 р. природний газ має покрити 22–23% усіх потреб у первинних енергоресурсах для електрогенерації. Передбачається, що зростання енергоефективності перетворення природного газу на електроенергію приведе до зростання виробництва електроенергії з цього виду викопного палива в 1,6 разу. Водночас завантаженість газових електрогенеруючих потужностей залишається відносно низькою – на рівні 40%, що свідчить про переважне їх використання для покриття пікового попиту в енергосистемах.

Окремі прогнозні оцінки розвитку газової електрогенерації передбачає розвиток двох технологій: газотурбінної електрогенерації відкритого циклу (*open-cycle gas turbine* – *OCGT*) і газотурбінної електрогенерації комбінованого циклу (*combined-cycle gas turbine* – *CCGT*) – із віддаванням переваги останній [17]. Технологія газової електрогенерації на основі виключно парових турбін сьогодні вже не розглядається.

Газотурбінні установки (як *OCGT* і *CCGT*) вважаються перспективною технологією майбутнього також у зв'язку з можливістю диверсифікації вхідного палива. Окрім природного газу, на них можливо використовувати інші види рідких (зокрема, мазут) та газоподібних вуглеводнів. Можливість диверсифікації первинних енергоресурсів на *OCGT* обумовлюється їх потужностями. Так, використання мазуту на *OCGT* вимагає використання великих камер згоряння для спалювання важких видів палива, тоді як невеликі аеро-похідні *OCGT* з декількома маленькими пальниками або камерами згоряння є високочутливими до змін параметрів палива.

Сучасні *CCGT* є більш екологічно прийнятними навіть у порівнянні з передовими вугільними електростанціями (технології *SC* та *USC*) – перші викидають приблизно менше на 50% CO_2 і до 9 разів NO_x за 1 кВт · год, ніж останні.

Здатність конкурувати у технології *OCGT* і *CCGT* порівняно із сегментом вугільної генерації наразі збільшується у зв'язку зі скороченням розриву між цінами на природний газ і вугілля у світі.

Загалом, як *OCGT*, так і *CCGT* вважаються зрілими технологіями, які економічно й екологічно придатні для застосування в майбутньому. Наступні зміни прогнозуються МЕА як поліпшуючі інновації, які спрямовані на:

- † по-перше, зростання рівня енергоефективності за рахунок зростання робочих температур;
- † по-друге, скорочення капітальних та експлуатаційних витрат;
- † по-третє, скорочення шкідливих викидів від електрогенерації.

Незважаючи на відносно високі темпи зростання атомної енергетики за прогнозами МЕА, відзначається скорочення частки атомних потужностей у загальному обсязі. МЕА прогнозує, що для забезпечення високого рівня безпеки атомна генерація була і буде використовуватися в базовому режимі навантаження.

Усе вироблене ядерне паливо буде використовуватися лише на потреби електрогенерації. МЕА не передбачає підвищення ефективності трансформації ядерного палива в електроенергію у прогнозованому періоді, яка і у 2035 р. залишиться на рівні 33% (цілі ядерної безпеки ставляться понад цілі енергоефективності) [18].

Отже, атомна енергетика була та залишається напрямом досягнення низьковуглецевого майбутнього, а атомна електрогенерація вважається зрілою технологією, яке забезпечуватиме базове навантаження в енергосистемах.

Гідроенергетика є ваговою складовою забезпечення низьковуглецевого майбутнього, однак потенціал гідроенергетичних ресурсів обмежений екологічними критеріями та соціально-економічними чинниками. Проте МЕА прогнозує зростання виробництва гідроенергії в майбутньому.

Аналогічна відповідність відзначається і за темпами приросту гідроелектрогенеруючих потужностей, завантаженість яких прогнозується на рівні 40%, що характеризує їх як високоманеврові джерела електрогенерації як в теперішньому, так і майбутньому.

МЕА розроблено технологічну дорожню карту розвитку гідроелектроенергетики, якою цей вид гідроелектрогенерації визнано як зрілу технологію, що буде забезпечувати основну частку виробництва електроенергії з відновлювальних джерел у майбутньому [18; 19].

Однак екологічні наслідки для водних басейнів становлять основну перешкоду в розвитку гідроенергетики. Так, зростання ступеня використання гідроенергетичного потенціалу в країнах ЄС обмежений Водною директивою, згідно з якою передбачено повернення стану водних об'єктів до початкового рівня. Запроваджені національні плани з розвитку електроенергетики в країнах ЄС основну увагу приділяють мікро- та малій гідроелектроенергетиці, обмежуючи зростання великих потужностей. Основним напрямом розвитку гідроенергетики в ЄС є будівництво нових ГАЕС або відкритого, чи насосного, циклів на основі реконструкції, або перебудови старих ГЕС.

Інші відновлювальні джерела енергії (ВДЕ), з яких основними є сонячна та вітрова енергія, є найбільш швидко зростаючим джерелом електрогенерації. Саме вони повинні спрямувати світову енергетику на шлях сталого розвитку.

В абсолютному вираженні прогноз відновлювальної енергетики переоцінюється з року в рік у на-

прямі збільшення: так, наприклад, прогноз на 2035 р. у ПСЕ-2016 вищий за ПСЕ-2010 на 32,4%.

Основними стримуючими чинниками розвитку є такі:

- ✦ по-перше, негарантоване виробництво електроенергії, яке залежить від погодних умов, відсутність розвинених технологій зберігання;
- ✦ по-друге, висока капіталомісткість технологій, що обумовлює високі повні витрати на виробництво електроенергії;
- ✦ по-третє, значна державна підтримка їх виробництва, відміна якої у країнах ОЕСР планується після 2020 р., що істотно скоротить інвестиційну привабливість галузі.

За таких умов прискорення розгортання відновлювальної енергетики можливо шляхом її підкріплення маневровими та вільними потужностями гарантованих джерел електрогенерації, з урахуванням здешевлення технологій, а також розвитком високівольтних мереж трансформаторної передачі.

Сучасні тенденції розвитку світової енергетики формуються під впливом парадигми так званого глобального енергетичного переходу, шляхи реалізації якої знаходяться в рамках вищезазначених напрямів технологічного розвитку електроенергетики.

Світові експертні організації вважають, що суть енергетичного переходу полягає в реалізації напрямів розвитку й освоєнні інноваційних технологій енергоперетворення, які для електроенергетики наведено на *рис. 1*.

Розглянемо більш детально сутність напрямів реалізації енергетичного переходу.

Управління енергосистемою за парадигмою енергетичного переходу сьогодні має назву «розумна енергосистема» і є узагальненням розвинутих на даний час технологій «розумних мереж» (*smart grids*). Дані мережі необхідні для розвитку розподіленої генерації, а також масового використання ВДЕ в енергосистемі (для вирішення проблеми нестабільності генерації енергії). Головним наслідком розвитку «розумних мереж» для електроенергетики є відхід від концепції базового навантаження та перехід до концепції підлаштування навантаження під споживану потужність. У результаті реалізації даного напрямку очікується загострення конфлікту між ядерно-вугільною генерацією з повільною зміною потужності та генерацією на основі ВДЕ з гнучкою зміною потужності (у вітровій енергетиці). У разі збігу мінімуму навантаження та максимуму генерації ВДЕ буде потрібно відключення від мережі або ВДЕ, або ядерних чи вугільних енергоблоків, причому з останніми будуть проблеми через технічні причини, а для цього необхідне розроблення регламентів, що оптимізують роботу енергосистем у подібних ситуаціях.

Далека передача електроенергії. Поява великої кількості дрібних джерел генерації, зростання реактивного навантаження, ускладнення топології мереж, необхідність підвищення якості електроенергії вимагають узгодження фаз і управління коефіцієнтом потужності. Ці завдання передбачається вирішити за допомогою технологій FACTS і ліній передачі постійного струму.

FACTS (*Flexible Alternative Current (AC) Transmission Systems*) – гнучкі системи передачі на змінному струмі. Системи FACTS з'явилися близько 1990 р. Передумовами їх розробки послужила поява ряду електронних компонентів високої потужності, достатніх для забезпечення управління фазою, активною та реактивною потужністю, напругою в мережі та трансформаторних підстанціях. Поки таких систем у світі одиниці.

Потужність, що передається ЛЕП, обмежена нагріванням дротів. Постійний струм дозволяє по тій самій лінії передавати удвічі більшу потужність, ніж змінний. Крім того, лінії постійного струму дозволяють пов'язувати частини мережі змінного струму з різною фазою та частотою. Ключовим для поширення ЛЕП постійного струму стало створення потужних напівпровідникових випрямлячів і інверторів. У СРСР була створена ЛЕП ПТ 1150 кВ.

Відсутність потреб електроенергії в надпровідниках давно привертає енергетиків. Однак зниження вартості надпровідникового обладнання відстає від прогнозів. Незважаючи на відкриття в 1986 р. високотемпературної надпровідності, потужноструміві металеві провідники доводиться охолоджувати рідким гелієм.

Акумулятори, суперконденсатори та надпровідникові накопичувачі запасують енергію постійного струму. Світлодіоди й електронні прибори споживають постійний струм. Тому можна очікувати створення двох паралельних мереж у кінцевого споживача: низьковольтної постійного струму для живлення освітлення (світлодіодного), електроніки слабких струмів і силової мережі змінного струму.

Розвиток технологій далекої передачі електроенергії також дозволить знизити потребу в генеруючих потужностях, підвищити надійність енергопостачання та гнучко задовольняти попит на енергію.

Технології накопичення електроенергії в енергосистемі необхідні для підвищення ефективності використання потужностей і підвищення надійності енергопостачання. Особливо важливі ці технології для розвитку відновлюваної електроенергетики в силу нестабільності вироблення на ВДЕ залежно від погодних умов.

Технології у сфері акумулювання енергії:

- ✦ гідроакумулюючі станції (ГАЕС з ККД до 65%);
- ✦ акумулятори та суперконденсатори;
- ✦ стиснене повітря (ККД до 30–40%);
- ✦ супермаховики (ККД може досягати 90% і більше);

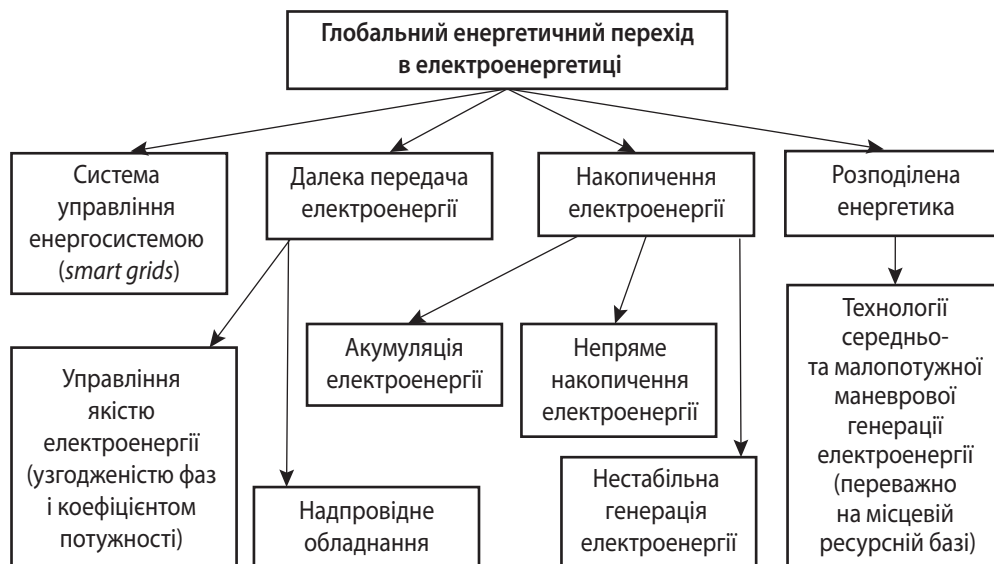


Рис. 1. Глобальний енергетичний перехід та його основні напрями в електроенергетичному секторі

Джерело: сформовано за [20].

- ✦ надпровідні котушки (ККД до 2050 р. може бути доведений до 99%);
- ✦ водневі генератори (ККД до 2050 р. може досягти 50–60%);
- ✦ акумулятори тепла з використанням фазових переходів або енергії хімічних реакцій (ККД до 30%).

Найбільш економічно ефективними накопичувачами енергії є ГАЕС і свинцево-кислотні акумулятори.

Розподілена енергетика. Попит на стійкий доступ до енергетичних та інформаційних систем, перехід до більш кваліфікованих видів енергії посилять попит на розвиток розподіленої енергетики. Розподілена енергетика дозволяє підвищити надійність і незалежність енергопостачання, гарантувати управління енергозабезпеченням для окремого споживача. Технологічний прогрес дає можливість економічно виправданого розвитку розподіленої генерації. Розвиток розподіленої генерації передбачає інтеграцію енергетики в техносферу, яка може відбуватися за двома напрямками. По-перше, в даний час енергія виробляється переважно на великих спеціалізованих підприємствах (особливо електроенергія), але вже сформувався тренд збільшення виробництва енергії як побічного продукту інших технологічних процесів на неспеціалізованих підприємствах, що в умовах високих цін на енергоносії стає рентабельним. По-друге, розвиток ВДЕ в рамках технологій «активного будинку» і «активної будівлі» дозволяє використовувати потенціал виробництва енергії безпосередньо в будівлях за рахунок сонячної енергетики, теплової енергії, відходів і т. п. Як наслідок, у перспективі буде відбуватися трансформація споживачів енергії (промислових, сервісних і комунальних) у виробників, які

частково забезпечують власні потреби, а частково постачають енергію іншим споживачам. Найбільший потенціал розвитку розподіленої генерації зосереджено в розвинених країнах у зв'язку з високим технологічним рівнем і постіндустріальним типом економіки.

Поряд із парадигмою глобального енергетичного переходу значна увага світового суспільства приділяється розвитку екологічно безпечних способів генерації, до яких передусім відносять електрогенерацію на основі ВДЕ.

Вітроенергетика. Розвиток наземних вітроенергетичних установок досягнув стадії зрілості. Прогнозується, що капітальні витрати на їх будівництво можуть бути знижені до 2030 р. до 950 дол. США, а до 2050 р. – до 900 дол. США за 1 кВт установленної потужності. Потенціал зниження витрат для морських вітроенергетичних установок істотно вище. До 2030 р. капітальні витрати на їх будівництво можуть бути знижені до 1500 дол. США, а до 2050 р. – до 1300 дол. США за 1 кВт установленної потужності.

Розвиток *сонячної фотовольтаїки* (прямого перетворення сонячної енергії в електроенергію) в перспективі буде дуже швидким, оскільки технологія ще не досягла стадії зрілості. Капітальні витрати на будівництво СЕС можуть бути знижені до 2030 р. до 1000 дол. США, до 2050 р. – до 750 дол. США за 1 кВт установленної потужності.

Розвиток *термальної сонячної енергетики* в перспективі буде дуже швидким, оскільки технологія не досягла стадії зрілості. Капітальні витрати на будівництво термальних СЕС можуть бути знижені до 2030–2050 р. до 4200 дол. США за 1 кВт установленної потужності.

На сучасному етапі глобального енергетичного розвитку для генерації електричної енергії використо-

вугілля обмежена кількість базових технологій енергоперетворення. Ознаками, що визначають специфічні відмінності технологій, є види первинної енергії та способи енергоперетворення, що використовуються в електрогенерації. Саме ці складові технологій визначають їх технічну й економічну ефективність.

Зважаючи на вищевказане, критерієм відбору технологій, доцільних до застосування в Україні, обрано їх технічну та ресурсоефективність, для оцінки яких використано зворотні до них характеристики ресурсоемності та вартості виробництва енергії.

Сукупність технологій електрогенерації в цілях даного дослідження можна поділити на два типи за двома загальними ознаками ресурсів.

До *першого типу* групи слід віднести технології електрогенерації, в основу яких закладено процес перетворення органічного та ядерного палива в електроенергію.

До *другого типу* слід віднести технології електрогенерації, в основу яких закладено процеси перетворення енергії невичерпних і відновлюваних джерел енергії (крім біологічних, які включено до першої групи) в електроенергію.

Ресурси технологій першого типу являють собою енергетичну сировину, витрати якої прямо залежать від обсягів виробництва електроенергії за певною технологією, тобто є змінною величиною.

Ресурси технологій другого типу являють собою земельні ділянки, водойми та споруди, необхідні для розміщення пристроїв уловлювання енергії відновлюваних джерел. Вони є постійною величиною, достатньою для забезпечення максимального завантаження потужностей електрогенерації незалежно від обсягів виробництва електроенергії.

Абсолютні величини використання різних видів ресурсів для забезпечення електрогенерації мають різний вимір і методики обчислення, а тому не можуть бути використані для складення виваженої порівняльної оцінки ресурсних характеристик різних технологій.

Необхідність проведення в рамках даної роботи порівняння ресурсних характеристик технологій електрогенерації визначила завдання щодо розроблення методичного підходу та методики їх обчислення в єдиному вимірі.

Для характеристики ресурсоемності виробництва енергії залежно від типу технологій електрогенерації використовувались:

- ✦ для технологій на основі процесів перетворення палива та ядерної енергії – витрати паливно-енергетичної сировини в енергетичному вимірі на одиницю виробництва енергії, з розмірністю кДж/кВт · год;
- ✦ для характеристики ресурсоемності технологій на основі процесів перетворення енергії відновлюваних і невичерпних джерел (Сонця,

вітру, руху води тощо) – величина ресурсів, необхідних для забезпечення виробництва електроенергії на базі ВДЕ в енергетичному еквіваленті, з розмірністю кДж/кВт · год.

Правомірність обчислення величини ресурсів, необхідних для забезпечення електрогенерації на базі ВДЕ в енергетичному вимірі (еквіваленті), обумовлена тим, що вказані ресурси визначають потужність освоєної частини відновлюваних джерел енергії.

В основу процедури приведення величини ресурсів, необхідних для забезпечення генерації на базі ВДЕ, закладено допущення, що ефективність електрогенерації даного типу дорівнює найвищій ефективності серед технологій, віднесених до першого типу. Для цього еталоном для обчислення величини ресурсів вибрано технологію газотурбінної електрогенерації комбінованого циклу (CCGT).

Обчислення величини ресурсів, необхідних для забезпечення електрогенерації на базі ВДЕ в енергетичному еквіваленті, проводилося по кожній з технологій даного типу за формулою:

$$NR_n - K_{rec} \cdot NR_e, \quad (1)$$

де NR_n – норма ресурсоемності виробництва одиниці електроенергії за певною технологією другого типу (невідомо величина);

K_{rec} – коефіцієнт перерахунку ресурсоемності виробництва електроенергії за технологією-еталоном у відповідну величину за певною технологією другого типу (невідоме значення);

NR_e – норма ресурсоемності виробництва електроенергії за технологією-еталоном, у даному випадку – 8 168 кДж/кВт · год.

K_{rec} розраховувався за формулою:

$$K_n^{np} = \frac{W_e}{W_n}, \quad (2)$$

де W_e – потужність виробництва електроенергії електростанцією-еталоном, у даному випадку – 3 153 600 000 кВт · год на рік;

W_n – потужність виробництва електроенергії електростанцією з технологією електрогенерації другого типу (невідомо величина), кВт · год на рік.

W_n розраховується за формулою:

$$W_n = \frac{W_e}{F_t \cdot K_n^{ben}}, \quad (3)$$

де F_t – фонд робочого часу електростанцій (теоретично досяжний) – 8 760 годин;

K_n^{ben} – коефіцієнт використання встановленої потужності певної електростанції з технологією електрогенерації другого типу.

Розрахунок значень показників ресурсоемності та приведених витрат на виробництво електроенергії за технологіями електрогенерації виконано за матеріалами [21–25]. Результати проведених розрахунків наведено в *табл. 1* і *табл. 2*.

Таблиця 1

Ресурсоємність виробництва електроенергії за технологіями електрогенерації

№ з/п	Позначення технології	Основна ознака технології	Ресурсоємність виробництва електроенергії, кДж/кВт · год	Індекс ресурсоємності виробництва електроенергії
1	CCFPP	Традиційні вугільні ТЕС (спалювання кускового вугілля)	9950	0,292
2	PCC	Спалювання пиловидного вугілля	9685	0,312
3	PCUS	Ультранадкритичне спалювання пиловидного вугілля	8800	0,491
4	IGCC	Комбінований цикл з інтегрованою газифікацією вугілля	9182	0,338
5	OCGT	Газотурбінна електрогенерація відкритого циклу	9306	0,082
6	CCGT	Газотурбінна електрогенерація комбінованого циклу	8168	0,113
7	BC	Спалювання біомаси	11611	0,420
8	BBFB	Піроліз біомаси в киплячому шарі	14243	0,673
9	BG	Газифікація біомаси	9915	0,675
10	Nuclear gen. 3	Ядерні реактори 3-го покоління	9407	0,459
11	HP	Великі ГЕС	22299	0,455
12	SHP	Малі ГЕС	22299	0,455
13	Solar PV	Сонячні батареї	49008	1,000
14	Wind onshore	Континентальні вітряки	49008	1,000
15	Wind offshore	Вітряки на узбережжі	49008	1,000

Джерело: складено за [21–25].

Таблиця 2

Приведені витрати на виробництво електроенергії технологіями електрогенерації

№ з/п	Позначення технології	Основна ознака технології	Норма витрат на одиницю виробництва енергії, дол. США/кВт · год			Індекс витрат виробництва електроенергії
			капітальних вкладень*	операційних витрат	приведених витрат	
1	2	3	4	5	6	7
1	CCFPP	Традиційні вугільні ТЕС (спалювання кускового вугілля)	0,0183	0,0014	0,0197	0,292
2	PCC	Спалювання пиловидного вугілля	0,0195	0,0037	0,0232	0,312
3	PCUS	Ультранадкритичне спалювання пиловидного вугілля	0,0307	0,0053	0,0361	0,491
4	IGCC	Комбінований цикл з інтегрованою газифікацією вугілля	0,0212	0,0049	0,0260	0,338
5	OCGT	Газотурбінна електрогенерація відкритого циклу	0,0051	0,0013	0,0064	0,082
6	CCGT	Газотурбінна електрогенерація комбінованого циклу	0,0071	0,0017	0,0088	0,113
7	BC	Спалювання біомаси	0,0789	0,0076	0,0864	0,420

1	2	3	4	5	6	7
8	BBFB	Піроліз біомаси в киплячому шарі	0,1265	0,0140	0,1404	0,673
9	BG	Газифікація біомаси	0,1268	0,0165	0,1433	0,675
10	Nuclear gen. 3	Ядерні реактори 3-го покоління	0,0216	0,0109	0,0325	0,459
11	HP	Великі ГЕС	0,0369	0,0104	0,0473	0,432
12	SHP	Малі ГЕС	0,1384	0,0104	0,1487	0,540
13	Solar PV	Сонячні батареї	1,1272	0,0148	1,1420	1,000
14	Wind onshore	Континентальні вітряки	0,3957	0,0172	0,4130	0,346
15	Wind offshore	Вітряки на узбережжі	0,4781	0,0536	0,5317	0,424

Примітка: * – розраховано на обсяг виробленої енергії в період окупності інвестицій (за проектом).

Джерело: складено за [21–25].

На основі значень розрахованих індексів, які згруповано в *табл. 3*, проведено порівняльну комплексну (техніко-економічну) оцінку ефективності технологій на основі застосування матричного методу (*рис. 2, рис. 3*).

Дані, наведені на *рис. 2*, свідчать, що три технології електрогенерації знаходяться на периферії матриці, на межі мінімальної ефективності використання ресурсів. Мінімальну ефективність ресурсів та економічну ефективність має технологія фотоелектричної генерації (позначка 13). Технології вітрової електрогенерації (позначки 14 і 15) також знаходяться на межі мінімальної ефективності використання ресурсів у квадранті високої енергоємності та низьких витрат.

Положення технологій вітроелектричної генерації на полі матриці свідчить, що її застосування доцільне тільки на незатребуваних до господарського використання землях.

Зважаючи на вказане, основну групу технологій електрогенерації більш детально розглянуто за вибіркою, з якої виключено вищерозглянуті технології Solar PV; Wind onshore; Wind offshore.

Матрицю комплексної оцінки ефективності по уточненій вибірці технологій наведено на *рис. 3*.

Дані матриці, наведеної на *рис. 3*, свідчать, що до квадранта найменшої ресурсоємності та витрат входять сучасні технології теплової електрогенерації. Найвищу ефективність мають газові технології, високу – вугільні. Виключенням з даної сукупності стала тільки технологія електрогенерації на основі ультранадкритичного спалювання пиловидного вугілля (*Pulverized coal Ultra Supercritical – PCUS*), яка через високу норму приведених витрат на виробництво електроенергії увійшла до іншого квадранта – низької ресурсоємності та високих витрат.

До квадранта низької ресурсоємності та високих витрат, крім згаданої технології (PCUS), увійшли

ще групи технологій теплової електрогенерації на основі використання біопалива (BC, BBFB, BG) та ядерної генерації третього покоління (Nuclear gen. 3). Високі витрати на виробництво енергії за технологіями PCUS і Nuclear gen. 3 визначаються новизною та високою складністю самих технологій, а також низьким освоєнням виробництва специфічного технологічного обладнання та матеріалів для них. Високі приведені витрати на виробництво електроенергії за тепловими технологіями на основі використання біопалива визначені їх нетрадиційністю та незначною масштабністю, яка притаманна електростанціям з технологіями даного типу.

До квадранта високої енергоємності та витрат входять технології гідрогенерації – великі та малі ГЕС.

Аналіз вищенаведених матриць дозволив скласти загальний рейтинг ефективності технологій електрогенерації, який наведено в *табл. 4*.

ВИСНОВКИ

Проведена порівняльна оцінка ефективності технологій електрогенерації показала, що доцільними до використання в Україні є:

- ✦ газотурбінна генерація комбінованого та відкритого циклів (CCGT, OCGT);
- ✦ генерація комбінованого циклу з інтегрованою газифікацією вугілля (IGCC);
- ✦ генерація на основі спалювання пиловидного вугілля (PCC);
- ✦ останні покоління конденсаційних (традиційних) ТЕС на основі спалювання кускового вугілля (CCFPP).

Перспективними до освоєння в Україні є:

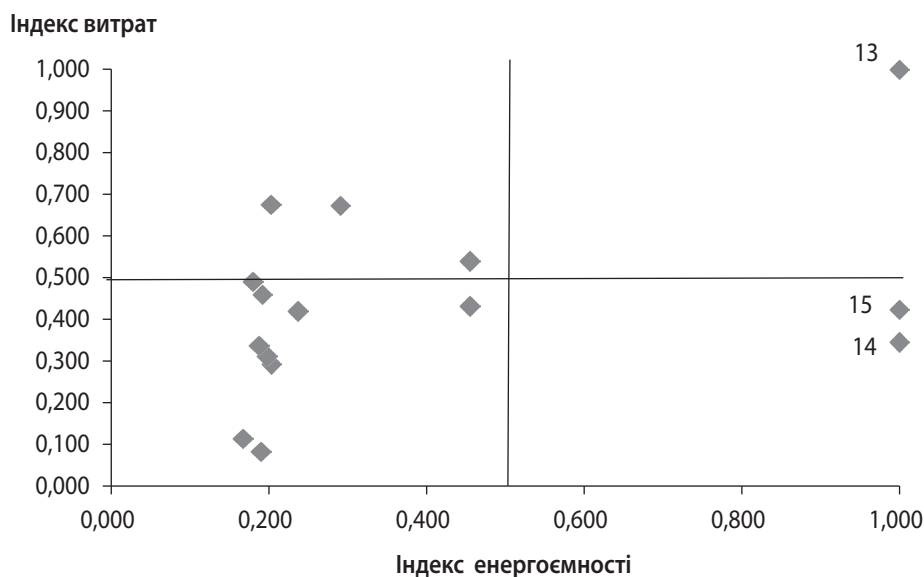
- ✦ генерація на основі ультранадкритичного спалювання пиловидного вугілля (PCUS);
- ✦ ядерні реактори 3-го покоління (Nuclear gen. 3).

З указаного переліку доцільних до використання й освоєння технологій електрогенерації високоманевреними, а отже, придатними для оперативного

Індекси ресурсоємності та приведених витрат основних технологій електрогенерації

№ з/п	Позначення технології	Основна ознака технології	Індекс ресурсоємності		Індекс витрат	
			величина	рейтинг	величина	рейтинг
1	CCFPP	Традиційні вугільні ТЕС (спалювання кускового вугілля)	0,375	8	0,292	3
2	PCC	Спалювання пиловидного вугілля	0,365	6	0,312	4
3	PCUS	Ультранадкритичне спалювання пиловидного вугілля	0,332	2	0,491	11
4	IGCC	Комбінований цикл з інтегрованою газифікацією вугілля	0,346	3	0,338	5
5	OCGT	Газотурбінна електрогенерація відкритого циклу	0,351	4	0,082	1
6	CCGT	Газотурбінна електрогенерація комбінованого циклу	0,308	1	0,113	2
7	BC	Спалювання біомаси	0,437	9	0,420	7
8	BBFB	Піроліз біомаси в киплячому шарі	0,537	12	0,673	13
9	BG	Газифікація біомаси	0,374	7	0,675	14
10	Nuclear gen. 3	Ядерні реактори 3-го покоління	0,354	5	0,459	10
11	HP	Великі ГЕС	0,455	10–11	0,432	9
12	SHP	Малі ГЕС	0,455	10–11	0,540	12
13	Solar PV	Сонячні батареї	1,000	12–15	1,000	15
14	Wind onshore	Континентальні вітряки	1,000	12–15	0,346	6
15	Wind offshore	Вітряки на узбережжі	1,000	12–15	0,424	8

Джерело: складено за [21–25].



Умовні позначення: технології відповідають нумерації, прийнятій у табл. 1 і табл. 2.

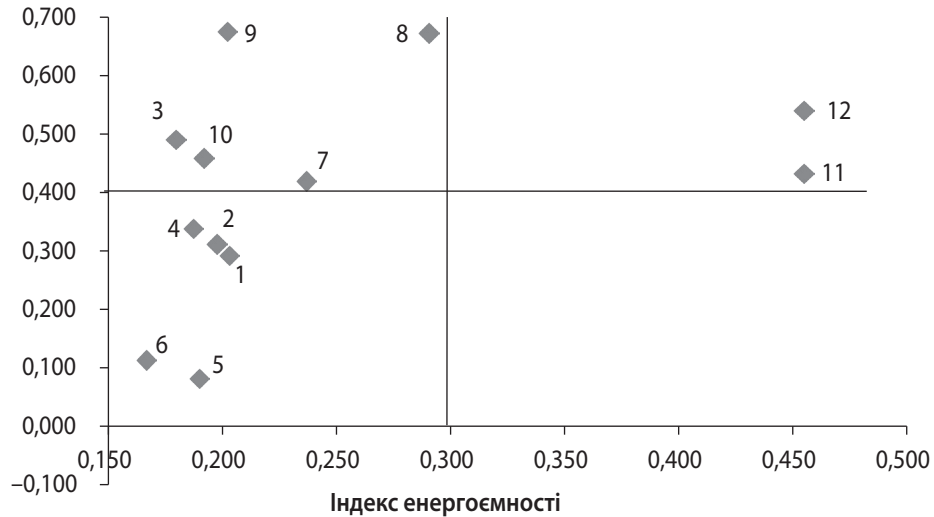
Рис. 2. Матриця комплексної оцінки ефективності технологій електрогенерації

Джерело: авторська розробка.

регулювання навантажень в енергетичних мережах і використання у комплексах розподіленої енергетики є газові технології CCGT, OCGT і вугільна технологія IGCC.

Окремо слід визначити що майже всі вищевказані технології електрогенерації, крім ядерної, засновані на процесах перетворення в електроенергію органічного палива – газу та вугілля. З наведеного

Індекс витрат



Умовні позначення: технології відповідають нумерації, прийнятій у табл. 1 і табл. 2.

Рис. 3. Матриця комплексної оцінки ефективності атомних, теплових та гідравлічних технологій електрогенерації
Джерело: авторська розробка.

Таблиця 4

Загальний рейтинг технологій електрогенерації

№ з/п	Позначення технології	Основна ознака технології	Загальний рейтинг ефективності технології
1	CCFPP	Традиційні вугільні ТЕС (спалювання кускового вугілля)	5
2	PCC	Спалювання пиловидного вугілля	4
3	PCUS	Ультранадкритичне спалювання пиловидного вугілля	6
4	IGCC	Комбінований цикл з інтегрованою газифікацією вугілля	3
5	OCGT	Газотурбінна електрогенерація відкритого циклу	2
6	CCGT	Газотурбінна електрогенерація комбінованого циклу	1
7	BC	Спалювання біомаси	8
8	BBFB	Піроліз біомаси в киплячому шарі	14
9	BG	Газифікація біомаси	10–11
10	Nuclear gen. 3	Ядерні реактори 3-го покоління	7
11	HP	Великі ГЕС	9
12	SHP	Малі ГЕС	12–13
13	Solar PV	Сонячні батареї	15
14	Wind onshore	Континентальні вітряки	10–11
15	Wind offshore	Вітряки на узбережжі	12–13

Джерело: авторські розрахунки.

переліку технологій електрогенерації, доцільних до використання в Україні уже сьогодні, є тільки конденсаційні ТЕС, усі інші потребують освоєння.

Першочерговими заходами зі структурно-технологічної модернізації енергетичного комплексу України повинна стати реалізація напрямів розвитку, що узгоджуються з положеннями парадигми глобального енергетичного переходу, а саме:

- ✦ створення системи управління енергомережею нового покоління (*smart grids*);
- ✦ розвиток розподіленої енергетики. ■

БІБЛІОГРАФІЯ

1. Хоменко І. В., Плахтій О. А., Нерубацький В. П., Стасюк І. В. Електроенергетика України. Структура,

- керування, інновації : монографія. Харків : Планета-Прінт, 2020. 132 с.
- Суппонен М. Україна на шляху до функціонального ринку електроенергії – що досягнуто, чого бракує? URL: https://www.lowcarbonukraine.com/wp-content/uploads/PP3_06_2019_Electricity-Market_final_ukr.pdf
 - Енергетика України: виклики та ініціативи / Омельченко В., Сіденко В., Білявський М. та ін. Київ : Заповіт, 2020. 62 с. URL: https://razumkov.org.ua/uploads/article/2020_energy_initiatives.pdf
 - Wang D. et al. Electricity Price Instability over Time: Time Series Analysis and Forecasting / Wang D., Gryshova I., Kuzym M., Salashenko T., Khaustova V., Shcherbata M. *Sustainability*. 2022. Vol. 14. Iss. 15. Art. 9081. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14159081>
 - Chen Q. et al. Electricity Markets Instability: Causes of Price Dispersion / Chen Q., Balian A., Kuzym M., Salashenko T., Gryshova, I., Khaustova V. *Sustainability*. 2021. Vol. 13. Iss. 22. Art. 12343. DOI: <https://doi.org/10.3390/su132212343>
 - Хаустова В. Є., Котляров Є. І., Лелюк О. В. Аналіз державної політики розвитку електроенергетики України. *Бізнес Інформ*. 2018. № 12. С. 182–193. URL: https://www.business-inform.net/export_pdf/business-inform-2018-12_0-pages-182_193.pdf
 - Хаустова В. Є., Лелюк О. В. Аналіз структурних зрушень у виробництві та споживанні електроенергії в Україні. *Проблеми і перспективи економіки та управління*. 2018. № 4. С. 91–105. DOI: [10.25140/2411-5215-2018-4\(16\)-91-105](https://doi.org/10.25140/2411-5215-2018-4(16)-91-105)
 - Khaustova V., Salashenko T. I., Lelyuk O. V. Energy Security of National Economy Based on the System Approach. *Науковий вісник Полісся*. 2018. № 2. Ч. 1. С. 79–92. DOI: [10.25140/2410-9576-2018-1-2\(14\)-79-92](https://doi.org/10.25140/2410-9576-2018-1-2(14)-79-92)
 - Енергетична безпека України: методологія системного аналізу та стратегічного планування : аналітична доповідь / за заг. ред. О. М. Суходолі. Київ : НІСД, 2020. 178 с. URL: https://niss.gov.ua/sites/default/files/2020-12/sukhodolia_energy_security_sayt-1.pdf
 - Теоретико-прикладні аспекти декарбонізації та розвитку розподіленої електроенергетики України : кол. моногр. / за ред. М. О. Кизима. Харків : ФОП Лібуркіна Л. М., 2020. 344 с.
 - World Energy Outlook 2016 / International Energy Agency. URL: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2016>
 - International Energy Outlook 2016 / US Energy Information Administration. URL: [http://www.eia.gov/forecasts/ieo/pdf/0484\(2016\).pdf](http://www.eia.gov/forecasts/ieo/pdf/0484(2016).pdf)
 - Прогноз развития энергетики мира и России до 2040 / Институт энергетических исследований РАН. URL: <https://www.eriras.ru/files/prognoz-2040.pdf>
 - Asia / World Energy Outlook 2015 / The Institute of Energy Economics of Japan. URL: <http://eneken.iecej.or.jp/data/6379.pdf>
 - BP Energy Outlook 2016 edition / British Petroleum. URL: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2016.pdf>
 - Exxon Mobil. 2016 Summary Annual Report. URL: https://www.annualreports.com/HostedData/AnnualReportArchive/e/NYSE_XOM_2016.pdf
 - Kehlhofer R., Rukes B., Hannemann F., Stirnimann F. Combined-Cycle Gas & Steam Turbine Power Plants. 3rd ed. PennWell Corp., Tulsa, Oklahoma, USA, 2009. 430 p.
 - Technology Roadmap Nuclear Energy. 2015 edition / International Energy Agency. URL: https://iea.blob.core.windows.net/assets/3b1ca208-29e1-4418-9de8-f8d468dc3f61/Nuclear_RM_2015_FINAL_WEB_Sept_2015_V3.pdf
 - Оновлена Енергетична стратегія України до 2030 р. від 07.06.2013 р. / Міністерство енергетики та вугільної промисловості України. URL: mre.kmu.gov.ua/fuel/doccatalog/document?id=222032
 - Глобальная энергетика и устойчивое развитие. Мировая энергетика – 2050 (Белая книга) / под ред. В. В. Бушуева, В. А. Каламанова. М. : ИД «Энергия», 2011. 360 с.
 - Technology Roadmap: Hydropower / International Energy Agency. URL: <https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-hydropower>
 - The International Renewable Energy Agency (IRENA) is an intergovernmental organisation dedicated to renewable energy / Biomass power generation URL: http://costing.irena.org/media/2793/re_technologies_cost_analysis-biomass.pdf
 - The International Renewable Energy Agency (IRENA) is an intergovernmental organisation dedicated to renewable energy. Power generation 2014. URL: https://www.irena.org/documentdownloads/publications/irena_re_power_costs_2014_report.pdf
 - Projected Costs of Generating Electricity 2015. International Energy agency. URL: <https://www.oecd-nea.org/ndd/pubs/2015/7057-proj-costs-electricity-2015.pdf>
 - Kost C. et al. Levelized Cost of Electricity Renewable Energy Technologies / Fraunhofer institute. 2021. URL: https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/en/documents/publications/studies/EN2021_Fraunhofer-ISE_LCOE_Renewable_Energy_Technologies.pdf

REFERENCES

- “Asia / World Energy Outlook 2015”. The Institute of Energy Economics of Japan. <http://eneken.iecej.or.jp/data/6379.pdf>
- “BP Energy Outlook 2016 edition”. British Petroleum. <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2016.pdf>
- Chen, Q. et al. “Electricity Markets Instability: Causes of Price Dispersion”. *Sustainability*, art. 12343, vol. 13, no. 22 (2021). DOI: <https://doi.org/10.3390/su132212343>
- “Enerhetychna bezpeka Ukrainy: metodolohiia systemnoho analizu ta stratehichnoho planuvannia : analitychna dopovid” [Energy Security of Ukraine: Methodology of System Analysis and Strategic Planning: Analytical Report]. Kyiv : NISD, 2020. https://niss.gov.ua/sites/default/files/2020-12/sukhodolia_energy_security_sayt-1.pdf

- "Exxon Mobil. 2016 Summary Annual Report". https://www.annualreports.com/HostedData/AnnualReportArchive/e/NYSE_XOM_2016.pdf
- Globalnaya energetika i ustoychivoye razvitiye. Mirovaya energetika – 2050 (Belaya kniga) [Global Energy and Sustainable Development. World Energy – 2050 (White Paper)]. Moscow: ID «Energiya», 2011.
- "International Energy Outlook 2016". US Energy Information Administration. [http://www.eia.gov/forecasts/ieo/pdf/0484\(2016\).pdf](http://www.eia.gov/forecasts/ieo/pdf/0484(2016).pdf)
- Kehlhofer, R. et al. *Combined-Cycle Gas & Steam Turbine Power Plants*. Tulsa, Oklahoma, USA: PennWell Corp., 2009.
- Khaustova, V. Ye., and Leliuk, O. V. "Analiz strukturnykh zrushen u vyrobnytstvi ta spozhyvanni elektroenerhii v Ukraini" [Analysis of Structural Changes in the Production and Consumption of Electric Energy in Ukraine]. *Problemy i perspektyvy ekonomiky ta upravlinnia*, no. 4 (2018): 91-105.
DOI: 10.25140/2411-5215-2018-4(16)-91-105
- Khaustova, V. Ye., Kotliarov, Ye. I., and Leliuk, O. V. "Analiz derzhavnoi polityky rozvytku elektroenerhetyky Ukrainy" [Analyzing the State Policy on Development of the Electric Power Industry of Ukraine]. *Biznes Inform*, no. 12 (2018): 182-193. https://www.business-inform.net/export_pdf/business-inform-2018-12_0-pages-182_193.pdf
- Khaustova, V., Salashenko, T. I., and Lelyuk, O. V. "Energy Security of National Economy Based on the System Approach". *Naukovyi visnyk Polissia*, vol. 1, no. 2 (2018): 79-92.
DOI: 10.25140/2410-9576-2018-1-2(14)-79-92
- Khomenko, I. V. et al. *Elektroenerhetyka Ukrainy. Struktura, keruvannia, innovatsii* [Electricity of Ukraine. Structure, Management, Innovation]. Kharkiv: Planeta-Print, 2020.
- Kost, C. "Levelized Cost of Electricity Renewable Energy Technologies". Fraunhofer institute. 2021. https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/en/documents/publications/studies/EN2021_Fraunhofer-ISE_LCOE_Renewable_Energy_Technologies.pdf
- Omelchenko, V. et al. "Enerhetyka Ukrainy: vyklyky ta initsiatyvy" [Energy of Ukraine: Challenges and Initiatives]. Kyiv : Zapovit, 2020. https://razumkov.org.ua/uploads/article/2020_energy_initiatives.pdf
- "Onovlena Enerhetychna stratehiia Ukrainy do 2030 r. vid 07.06.2013 r." [The Updated Energy Strategy of Ukraine until 2030 Dated June 7, 2013]. Ministerstvo enerhetyky ta vuhilnoi promyslovosti Ukrainy. mpe.kmu.gov.ua/fuel/doccatapg/document?id=222032
- "Prognoz razvitiya energetiki mira i Rossii do 2040" [Forecast for the Development of Energy in the World and Russia until 2040]. Institut energeticheskikh issledovaniy RAN. <https://www.eriras.ru/files/prognoz-2040.pdf>
- "Projected Costs of Generating Electricity 2015". International Energy agency. <https://www.oecd-nea.org/ndd/pubs/2015/7057-proj-costs-electricity-2015.pdf>
- Supponen, M. "Ukraina na shliakhu do funktsionalnoho rynku elektroenerhii – shcho dosiahnuto, choho brakuie?" [Ukraine Is on the Way to a Functional Electricity Market – What Has Been Achieved, What Is Missing?]. https://www.lowcarbonukraine.com/wp-content/uploads/PP3_06_2019_Electricity-Market_final_ukr.pdf
- "Technology Roadmap Nuclear Energy". International Energy Agency. https://iea.blob.core.windows.net/assets/3b1ca208-29e1-4418-9de8-f8d468dc3f61/Nuclear_RM_2015_FINAL_WEB_Sept_2015_V3.pdf
- "Technology Roadmap: Hydropower". International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-hydropower>
- "The International Renewable Energy Agency (IRENA) is an intergovernmental organisation dedicated to renewable energy". Biomass power generation. http://costing.irena.org/media/2793/re_technologies_cost_analysis-biomass.pdf
- "The International Renewable Energy Agency (IRENA) is an intergovernmental organisation dedicated to renewable energy". *Power generation 2014*. https://www.irena.org/documentdownloads/publications/irena_re_power_costs_2014_report.pdf
- Teoretyko-prykladni aspekty dekarbonizatsii ta rozvytku rozpodilenoj elektroenerhetyky Ukrainy* [Theoretical and Applied Aspects of Decarbonization and Development of Distributed Electric Power Industry of Ukraine]. Kharkiv: FOP Liburkina L. M., 2020.
- "World Energy Outlook 2016". International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2016>
- Wang, D. et al. "Electricity Price Instability over Time: Time Series Analysis and Forecasting". *Sustainability*, art. 9081, vol. 14, no. 15 (2022).
DOI: <https://doi.org/10.3390/su14159081>