

# ЕНЕРГЕТИКА СТАЛОГО РОЗВИТКУ

## ENERGY OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT

УДК 621.311

DOI 10.20535/1813-5420.4.2024.315592

Л.Д. Третякова<sup>1</sup>, д-р. техн. наук, професор, ORCID 0000-0001-5244-746X

В.А. Побігайло<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0003-2673-7329

Є.Р. Усатий<sup>1</sup>, студент

<sup>1</sup>Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

### ЗМІНИ В СВІТОВІЙ ЕНЕРГЕТИЦІ СПРИЧИНЕНІ ВІЙНОЮ РОСІЇ ПРОТИ УКРАЇНИ

**Проблематика.** Російське вторгнення в Україну, відмова росії від постачання запланованих обсягів природного газу в країни Європейського Союзу спричинили світову енергетичну і фінансову кризи та загальмували рух до розвитку відновлювальної енергетики. Для багатьох країн перехід до стабільних та екологічно чистих джерел енергії став проблематичним.

**Мета дослідження.** Загальний огляд та аналітичний аналіз тенденцій розвитку споживання енергетичних ресурсів та впровадження відновлювальних джерел в електроенергетичних системах у 2017-2023 роках за матеріалами дослідження International Energy Agency (IEA), наведеними у World Energy Outlook (WEO) [1-6].

**Методика реалізації.** У статті для дослідження використано тенденції розвитку світової системи відновлювальних станцій на підставі забезпечення кліматичної нейтральності, нульових викидів та чистого екологічного середовища. Дослідження змін та способів обмеження негативних наслідків від військових дій в Європі та Близькому Сході виконано за перспективними планами IEA.

**Результати дослідження.** Наведено огляд зміни структури енергоресурсів у світовому енергетичному балансі. Показано, що енергетична криза призвела до різкого зростання видобутку викопного палива, передусім вугілля та нафти. З метою стабілізації цін на паливо та зниження ціни на вироблену електроенергію розпочато будівництво нових потужностей для виробництва 250 млрд. кубометрів скрапленого газу щорічно. Наведено статистичну та прогнозовану інформацію щодо структури світового балансу енергоносіїв і річного виробництва електроенергії за видами генерації. Розглянуто екологічні негативні наслідки, які зареєстровано на останні три роки: підвищена емісія CO<sub>2</sub>; забруднення повітря дрібнодисперсним пилом; забруднення ґрунтів і водних горизонтів; зміна кліматичних показників. Проаналізовано проблеми, які утворилися для реалізації нових проєктів будівництва відновлювальних джерел, розвитку електроенергетичної інфраструктури, безпеки та надійності електропостачання. Виконано аналіз запропонованих заходів за кількома сценаріями щодо збільшення виробництва і використання сонячної, вітрової та атомної енергії, зменшення залежності від традиційних джерел енергії та перспективи досягнення нульових викидів діоксиду вуглецю до 2030 року.

**Висновки.** Дії, спрямовані на скорочення споживання енергії, прогнозоване зниження цін на паливо, заплановані перезапуски атомної енергетики та подальше впровадження відновлювальних станцій – такі запропоновані заходи дають змогу вирішувати світові проблеми, що виникли. Впевненість у вирішенні поставлених завдань надають підтвердження з боку 83 країн та Європейського Союзу вчасно та в повному обсязі виконати зобов'язання стосовно досягнення нульового рівня викидів діоксиду вуглецю. Вивчення досвіду та напрямів розвитку світової енергетики створить можливість до швидкого відновлення енергетичної структури в Україні в післявоєнний час.

**Ключові слова:** енергетична криза, екологічні наслідки, відновлювальна енергетика, викиди діоксиду вуглецю.

Світова енергетика з початку XXI сторіччя знаходиться в процесі масштабних змін, які насамперед скеровані на інтенсивне впровадження основних технологій відновлюваної енергетики в умовах відповідного зниження їх вартості та обмеження використання викопних природних копалин та нафтопродуктів. У планах розвитку (WEO-2017) [1] енергетичної галузі вперше було впроваджено новий важливий напрямом – «Сценарій сталого розвитку і нових стратегій в енергетики» з комплексним підходом щодо узгодження основних цілей світового сталого розвитку («Цілі сталого розвитку» на період

2015–2030 роки ) [7] та положень «Рамковою конвенцією ООН про зміни клімату (UNFCCC)» [8] щодо запобігання змінам клімату на 2021–2030 роки. Згідно наведеного сценарію основні напрями розвитку було визначено як «подальше впровадження природного газу поряд зі стрімко зростаючою відновлювальною енергетикою та забезпечення загального доступу до недорогого, надійного, стійкого і сучасного енергопостачання в будь-якій країні світу». У вказаних документах наголошувалося, що задля створення умов стосовно обмеження зростання глобального потепління на 1,5 °C до 2050 року потрібно реалізувати щонайменше такі сфери діяльності:

1. Активізувати державну політику з виробництва енергії з альтернативних джерел. Таке положення передбачало зростання інвестицій у будівництво нових електростанцій з використання відновлювальної енергії;

2. Впровадження інноваційних технологій і палива, використання яких дає змогу зменшити викиди діоксиду вуглецю (CO<sub>2</sub>). Потрібно передбачити будівництво потужних електростанцій із застосуванням палива з низьким рівнем викидів, насамперед АЕС, з впровадженням технологій для уловлювання CO<sub>2</sub> та його постійного зберігання або перетворення на кліматично нейтральне паливо.

За «Сценарієм сталого розвитку і нових стратегій» прогнозувалося, що низьковуглецеві джерела подвоють свою частку та в 2040 році досягнуть 60% в структурі електроенергетики, у кінцевому енергоспоживанні частка прямого та непрямого використання відновлювальних джерел зросте з 9% до 16% [2, 3]. Стрімке зростання використання відновлювальних джерел в електроенергетиці та вимоги Паризької угоди «наближать кінець періоду широкого використання вугілля». Споживання нафти продовжуватиме зростати до 2040 року, але вже нижчими темпами. Підвищення енергоефективності та заходи з економії знизять потребу в зростанні видобутку та виробництві енергії. Однак сценарій «сталого розвитку» на планеті закінчився 24 лютого 2024 році з початком вторгнення росії в Україну. Нині, як відзначають аналітики, світ вступив в період трансформацій на підставі тривалих військових конфліктів [9].

Вторгнення росії в Україну призвело до ескалації глобальної енергетичної та фінансової кризи, що може стати історичним поворотним моментом у політиці та енергетиці в найближчі роки. Продовжуючи бойові дії в Україні, РФ створює ризики виникнення затяжних конфліктів на Близькому Сході та Африці. Геополітична напруженість руйнує енергетичну безпеку та перспективи швидких, технологічних, безпечних і фінансово доступних процесів розвитку. Геополітика та енергетика завжди пов'язані впродовж усієї ери застосування природного і викопного палива. Імпортери є залежними від експортерів у постачанні, а експортери так само залежні у плані отримання прибутку та розвитку технологій. Історично політичні та комерційні відносини між виробниками та споживачами змінювалися, призводячи чи до погіршення, чи до врегулювання як способу управління такою залежністю. У двадцятому сторіччі такі ризики були знижені через створення відкритих міжнародних енергетичних ринків, спочатку вугілля та нафти, а останнім часом і природного газу. Добре функціонуючі ринки, поряд з такими засобами безпеки, як резервні незавантажені потужності основних виробників і координована система запасів нафти, допомогли країнам управляти змінами в попиті і пропозиції та забезпечити запаси у разі відмов, які спричинені екстремальними погодними умовами, природними надзвичайними ситуаціями чи геополітичними подіями.

Вторгнення росії в Україну стало серйозним випробуванням на стійкість сучасної енергосистеми до геополітичних потрясінь. Стрибки цін, що виникли після скорочення постачання газу з Росії, безумовно були суттєвими, але спроба росії використати природний газ як політичний важіль провалилася. У березні та квітні 2022 року International Energy Agency (IEA) оприлюднило план з десяти пунктів щодо зменшення залежності Європейського Союзу від російського природного газу та план з десяти пунктів щодо скорочення використання нафти [10, 11]. Росія втратила свого найбільшого споживача – Європейський Союз, знищила репутацію надійного експортера та створила стимули до пошуку альтернативи природному газу для споживачів. Світова енергетична криза спричинила суттєвий перегляд попиту на природний газ у бік зниження експорту російського газу. Війна в Україні призвела до обмеження закупівлі російського газу. Якщо у 2021 році планувалося щорічне використання газу до 2050 року в обсязі не менш як 1 750 млрд кубометрів, то 2023 року обсяги поставки від інших постачальників знижено до 920 млрд куб. Впровадження новітніх технологій для виробництва водню способом електролізу замість використання природного газу дає можливість до подальшого зменшення обсягів.

Аналіз інформації та прогнозів, які наведено у щорічних звітах IEA, починаючи з 2017 року і до 2023 року [1-6] дає змогу проаналізувати наскільки суттєво вплинули війна між росією та Україною, війна на Близькому сході на подальший розвиток електроенергетики, стан екологічного середовища, доступності людей до систем електропостачання та інших чинників. IEA – це недержавна самостійна міжнародна організація у складі Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). IEA утворена 1974 року з метою сприяння міжнародному співробітництву країн-імпортерів енергоресурсів в напрямках енергетичної та екологічної безпеки. Прогнози IEA базуються на ретельно перевіреній інформації із залученням провідних фахівців з енергетики. Особлива увага приділяється розвитку

раціональних енергетичних проєктів, використанню альтернативної енергетики, міжнародної кооперації в сфер новітніх технологій. Завдання впровадження відновлювальних джерел енергії позиціонуються як пріоритетні в енергетиці. У контексті вирішення окреслених проблем, останніми роками з'явилася велика кількість робіт, у яких аналізуються можливості та способи забезпечення високого рівня енергоефективності в європейських країнах [12–14] та Україні [15, 16].

Ознайомлення з прогнозами розвитку світової енергетики і вивчення рекомендацій щодо подолання наслідків світової енергетичної та фінансової кризи дасть змогу ефективно трансформувати українську енергетичну структуру та швидко відновити енергетичну безпеку у післявоєнний період.

**Мета та завдання** Загальний огляд та аналітичний аналіз тенденцій розвитку споживання енергетичних ресурсів та впровадження відновлювальних джерел в електроенергетичних системах з 2017 по 2023 роки за матеріалами дослідження International Energy Agency (IEA), наведеними у World Energy Outlook (WEO).

**Матеріал і результати досліджень** Енергетична криза призвела до уповільнення розвитку відновлювальних джерел в електроенергетиці, у деяких країнах розвиток систем електропостачання та процеси впровадження екологічно чистих способів опалення та приготування їжі загальмувалися або навіть зменшилися до докризового періоду.

Швидке, але нерівномірне відновлення світової економіки після рецесії, яка була спричинена Covid 19, та подальша енергетична криза створили великі навантаження на частину сучасної енергетичної системи, викликаючи різке зростання цін на ринках природного газу, вугілля та електроенергії. З 2020 року енергоносії подорожчали на 40 %. З 2021 року зареєстровано різкий поворот до використання вугілля та нафти. Ціни на викопне паливо досягли піків 2022 року. Захист споживачів від стрімкого зростання цін на паливо у 2022 році дорого обійшовся уряду США (900 мільярдів доларів на рік на утримання цін на електроенергію на споживчому ринку) та країнам Європейського Союзу (600 млрд євро на екстрену підтримку).

2023 року деякі з безпосередніх наслідків глобальної енергетичної кризи ослабли, але ризики на енергетичних ринках, геополітиці, фінансовій сфері та світовій економіці продовжують зростати. На цьому складному етапі поява нової економіки з використанням чистої енергії, насамперед сонячної, та електричних транспортних засобів дає перспективу до подальшого розвитку. Продажі споживчих газових котлів також мають тенденцію до зниження і в теперішній час відстають від продажі теплових насосів у багатьох країнах Європи та США. У секторі електроенергетики в усьому світі кількість електростанцій, які працюють на вугіллі та природному газі, скоротилася щонайменше вдвічі порівняно з попереднім десятиліттям. Однак починаючи з 2021 року реєструють збільшення обсягів використання вугілля та нафти. Така тенденція великою мірою є причиною скачка річного зростання викидів CO<sub>2</sub>, яке стало найбільшим зареєстрованим за весь період спостереження в новітній історії.

Положення, щодо використання природного газу, який ще в 2018 році вважався найбільш економічним і перспективним видом палива, кардинально змінилися. Упередження щодо безпеки його використання зараз переважають, особливо після того, як росія скоротила постачання газу до Європи та спровокувала зростання цін до чотирьох разів у 2021-2022 роках [17]. З метою стабілізації цін на паливо та зниження ціни на вироблену електроенергію розпочато будівництво нових потужностей для виробництва 250 млрд. кубометрів скрапленого газу щорічно, переважно в США та Катарі. Безперечною перевагою скрапленого газу є можливість його перерозподілу в будь-який момент у місця підвищеного попиту, що створює серйозні труднощі для стратегії диверсифікації росії в бік Азії.

Планувалося, що частка відновлюваних джерел енергії у виробництві електроенергії зросте з 28 % у 2021 році до приблизно 50 % у 2030 році та 80 % до 2050 року [2]. Сподівання, що споживання вугілля впаде з 36 % у виробництві електроенергії у 2021 році до 26 % у 2030 році та 12 % у 2050 році не справдилися [6]. 2023 року використання вугілля в електроенергетичному секторі зросло в багатьох країнах у відповідь на підвищений попит, високі ціни на природний газ і проблеми енергетичної безпеки. Світова генерація електричної енергії за видами палива у 2010 році і 2023 році [6], а також попередній прогноз на 2020 рік, який не було реалізовано [2], наведено на (рис. 1).

Як випливає з рис. 1, попередні прогнози 2017-2018 років щодо зменшення використання природного палива до 37 % не були реалізовані. 2023 року частка використання природних палив залишається на рівні 67%.

Бажання країн прискорити економічне зростання після пандемії наштовхнулося на наслідки від глобальної енергетичної кризи та виникнення широкомасштабних військових дій в Європі, Азії та Африці. Це призвело до зростання обсягів викопного палива, передусім вугілля, на 9%. Якщо світова стабільність не буде забезпечена до 2050 році, обсяг видобутку вугілля впаде лише на (3...7)%. Останні події, ринкові умови та політика змінюють погляди на природний газ та обмежують його використання, водночас підкреслюючи потенціал ядерної енергетики для скорочення викидів та зміцнення енергетичної безпеки. Якщо попит на природні копалини буде залишатися на високому рівні, як це відбувається з вугіллям,

нафтою і газом, то від досягнення глобальних кліматичних та екологічних цілей, задекларованих у [8], потрібно буде відмовитися у найближчому майбутньому. Навіть у разі не розширення зон наявних і прийдешніх військових конфліктів це призведе до подальшого зростання обсягів використання викопного палива та відповідно викидів CO<sub>2</sub> у наступні роки.

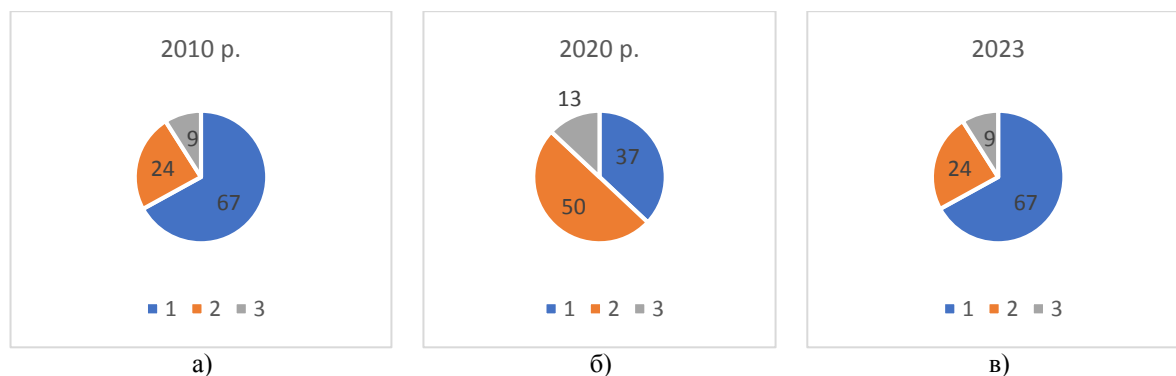


Рисунок 1 - Генерація електроенергії за видами палива: а) 2010 рік; б) прогноз на 2020 рік; в) 2023 рік  
Позначення на рис. 1: 1 – природні палива; 2 – відновлювальні джерела; 3 – атомні станції

Енергетична криза, яка призвела до змінення енергетичного балансу, спричинила низку екологічних небезпек, серед яких: підвищена емісія CO<sub>2</sub>; забруднення повітря; забруднення ґрунтів і водних горизонтів. Енергетичний сектор утворює майже три чверті викидів, які вже підняли глобальні середні температури на 1,1 °C вище з доіндустріальної епохи, з помітним впливом на погоду та екстремальні кліматичні умови (рис. 2).

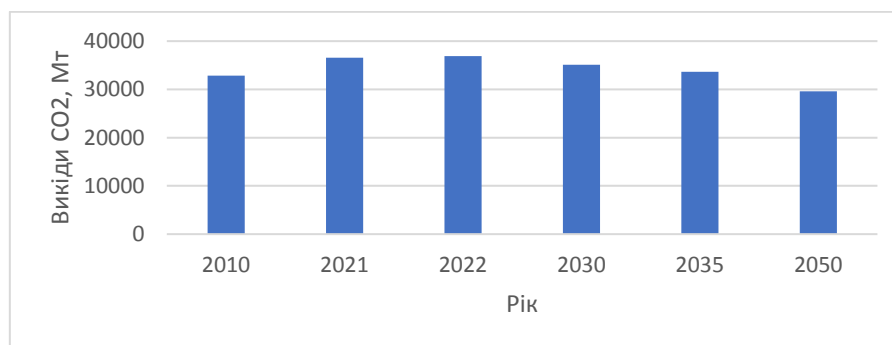


Рисунок 2 - Загальні обсяги викидів діоксиду вуглецю в світі за роками.

2022 року викиди CO<sub>2</sub> в енергетичних системах досягли  $36,6 \cdot 10^3$  Мт, що є найбільшим річним приростом в історії [20]. Використання енергетичного устаткування на викопному паливі є основною причиною забруднення повітря, яким вимушено дихати понад 90 % населення світу, що призводить до понад 6 мільйонів випадків передчасної смерті щорічно [18]. Задля захисту населення планувалося впровадження певних заходів, які поєднують мінімальні стандарти щодо викидів вихлопних газів від автомобільного транспорту, зменшення використання вугілля до виробництва електроенергії та паливної деревини до опалення та приготування їжі, що разом може призвести до помірного зниження глобальних викидів основних забруднювачів повітря в період з 2021 по 2050 роки [19].

2021 року електроенергетичний сектор викинув  $13 \cdot 10^3$  Мт CO<sub>2</sub>, що становить понад третину глобальних викидів CO<sub>2</sub>, пов'язаних з енергетикою. Оновлені прогнози засвідчили, що викиди CO<sub>2</sub> в електроенергетичному секторі досягнуть піку в найближчому майбутньому, з можливим скороченням на 40% лише після 2050 року. Такий результат вказує на те, що у глобальних енергетичних системах не запроваджено суттєвих структурних змін задля відокремлення генерації та використання енергії від викидів [21]. Таке зростання до нового рекордного рівня суперечить зобов'язанням країн досягти чистого нульового рівня викидів до 2030 року.

Вирішення екологічних проблем, пов'язаних з обмеженням викидів CO<sub>2</sub> та глобального потепління до 1,5 °C у 2050–2100 роках, стало проблематичним і складним до реалізації. 2023 року приріст глобальної середньої температури поверхні вже наблизився до 1,2 °C вище за доіндустріальний рівень, що спричиняє хвилі потоків теплоти, буревії, повені, лісові пожежі та інші екстремальні погодні явища. Очікується, що хвилі спеки та зростання потреби в охолодженні будуть збільшуватися з частотою та інтенсивністю

зовнішньої температури повітря [22]. У міру підвищення середньої температури зростатиме кількість країн, в яких цей процес буде становитиме небезпеку для здоров'я населення [23]. Доступ до послуг охолодження приміщень, транспорту, житлових помешкань ставатиме найважливішим для здоров'я населення, комфорту та продуктивності праці, і відсутність доступу до послуг охолодження все частіше утворюватиме осередки соціальної напруженості. Прогнозують, що до 2050 року кількість людей, котрі матиме хоч якусь потребу в охолодженні, зросте щонайменше до 9,4 млрд (понад 95% населення планети), що майже на 2 млрд більше, ніж нині. Планують, що світовий запас побутових кондиціонерів зросте з 1,5 мільярда одиниць у теперішній час до 2,2 мільярда у 2030 році та 4,4 мільярда у 2050 році.

В Україні 2022 року флуктуація температури повітря на всій території перевищила загальносвітову на (0,4...2,1) °C. Стійке підвищення температури повітря зафіксовано за усіма сезонами: перевищення середньорічної температури становить 1,4 °C; влітку приріст досягнув 1,8 °C; взимку – 2,1 °C [24].

Використання викопного палива призводить до забруднення повітря. За останні роки забруднене повітря є причиною щонайменше 19 000 надлишкових смертей щоденно. 2021 року забруднення повітря в приміщеннях стало причиною близько 3,6 мільйонів передчасних смертей, забруднення зовнішнього повітря – 4,2 мільйона. Поряд з тим забруднення повітря призводить до суттєвого підвищення витрат з державних фондів. Виникають прямі витрати, наприклад, пов'язані з наданням додаткової медичної допомоги, та непрямі витрати, наприклад, пов'язані з додатковими випадками від втрати працівниками працездатності або забрудненням сільськогосподарських земель та питної води [25]. Підраховано, що глобальні витрати на медичне обслуговування хворих через вплив забрудненого повітря з дрібними твердими частками діаметром до 2,5 microns (індекс AQ1 PM2.5) становлять до 6% світового ВВП і понад 10% у деяких країнах, зокрема в Індії та Китаї [26].

Україна перебувала на 43 місці в світі до війни за рівнем забрудненості повітря і на 8-му – в Європі [27], зі середньозваженою концентрацією 15 µg/m<sup>3</sup> за допустимої концентрації 5 µg/m<sup>3</sup>. Ведення активних бойових дій на території країни катастрофічно погіршує якість повітря та стан водних горизонтів та ґрунтів. З 2022 року в Україні спостерігається суттєве зростання рівня забруднення повітря. Прямий вплив бойових дій – це детонування снарядів, використання артилерійської зброї, авіабомб та бойової техніки. За даними Державної служби з надзвичайних ситуацій упродовж тільки трьох місяців війни на території України знешкоджено понад 120 тисяч вибухонебезпечних предметів, зокрема 1 978 авіаційних бомб [28]. Водночас російська армія випустила по Україні до 5 000 за перший рік війни і 1 500 ракет – за другий. У деяких випадках ці ракети влучали в українські склади боєприпасів, які теж детонували. Від таких вибухів в атмосферне повітря викидаються свинець, сажа, вуглець й інші шкідливі речовини. Залишки снарядів містять сірку, мідь, залізо та вуглець і залишаються на поверхні, забруднюючи шари ґрунтів і води, що згодом спричинить отруєння людей і тварин. Розливання та розливи нафтопродуктів, як результат ушкодження механізованих колон бойової техніки, також спричиняє небезпечне забруднення ґрунтів і природних джерел питної води [29]. Непрямий вплив бойових дій – це пожежі в екосистемах, вибухи нафтобаз, атаки на промислові об'єкти та склади з хімічною сировиною та іншими небезпечними речовинами, наприклад, пінополіуретаном, мінеральними добривами, лакофарбовими виробами, аміачною селітрою тощо. Нафтобази були й залишаються однією з головних цілей російських ракет. Станом на 24 травня 2024 року зафіксовано 36 влучань в об'єкти нафтової інфраструктури [28]. Від пожеж на нафтобазах в атмосферне повітря викидаються важкі метали, діоксид сірки, сажа, оксиди азоту тощо. Такі забруднення, потрапляючи у ґрунт, з часом погіршують якість підземних та поверхневих вод. Обсяг викидів від загоряння лісів, нафтобаз та інших об'єктів становить 182 мільйони тон шкідливих речовин щорічно. Розгортання військових дій з використанням зброї масового руйнування на економічно розвинутих територіях означає, що 2030 року кількість людей, котрі піддаватиметися впливу повітря з високими концентраціями забруднення дрібними твердими частинками (PM2.5), збільшиться на 640 мільйонів порівняно з 2021 роком.

2023 року країни виконали свої державні зобов'язання стосовно обмеження викидів та очищення повітря менше як на 20%, поряд з тим заплановані фінансові витрати необхідно закрити до 2030 року задля утримання напряму руху до досяжності 1,5 °C. Фінанси є відсутньою ланкою до прискореного розгортання відновлювальних джерел енергії в країнах, що розвиваються. Натомість, щоб привести світ на шлях до обмеження приросту температури на рівні 1,5 °C, потрібно збільшити щорічні інвестиції в проекти та інфраструктуру чистої енергетики до майже 4 трильйонів доларів США до 2030 року.

За останній рік електроенергетичні системи через коливання цін на паливо, розподіл енергії та інфляцію зіткнулися з низкою проблем щодо доступності та безпеки. За оцінками фахівців ринкова кон'юнктура та енергетична криза підвищили середньосвітову вартість постачання електроенергії майже до 30% у 2022 році. Європейський Союз стикається з особливим тиском після потроєння оптових цін на електроенергію в першому півріччі 2022 року порівняно з попереднім роком. Здебільшого це є наслідком рекордно високих цін на природний газ, поряд з тим це також відображає здороження вугілля і нафти та посилюється зниженням доступності до атомної та гідроенергетики. Поточне інфляційне середовище

також впливає на зростання витрат до компонентів відновлювальних джерел, серед яких сонячні фотоелектричні модулі, батареї та інвертори. 2022 року витрати на сонячні та гібридні міні-мережі зросли принаймні на 20%, порівняно з рівнем 2019 року. Це також створює проблеми щодо виконання запланованих контрактів на нові проекти, обмежуючи активність інвесторів у 2024 році. Збільшення інвестицій у розвиток масового виробництва компонентів, а саме сонячних фотоелектричних систем, вітрових турбін, побутових теплових насосів та стаціонарних акумуляторів 2023 року зареєстровано тільки в США.

Такі негативні економічні наслідки призвели до зростання кількості людей, котрі живуть у крайній бідності, сповільнюючи прогрес забезпечення загального доступу до електроенергії та чистого приготування їжі. Натомість такий процес посилюється фінансовою кризою, яка примушує енергетиків до відмови від будівництва та використання відновлювальних джерел енергії. 2022 року вперше за десятиліття кількість людей у всьому світі, котрі не мають доступу до електроенергії, зросла та досягла 774 мільйонів, що означитиме збільшення на 20 мільйонів людей порівняно з 2021 роком. Окремо потрібно відзначити, що постійні артилерійські та ракетні обстріли призвели до обмеженого доступу до систем тепло та електропостачання практично всіх громадян на території України.

Внаслідок кризи виникли три взаємопов'язані проблеми щодо подальшого розвитку систем електропостачання: зростання цін на електроенергію для промислових та побутових споживачів; обмежене впровадження резервних джерел енергії; гальмування розвитку електричних мереж. Електричні мережі є основою електроенергетичних систем і потребують розширення та модернізації для підтримки енергетичного переходу. Ризики, пов'язані з процесом потепління, призводять до екстремальних погодних явищ (спеки, пожежам, холодам), що безумовно впливає на перенавантаження електромереж та спричиняють їх аварійне відключення. Загальну довжину мереж систем електропостачання потрібно збільшити майже від 30% до 90% з 2021 до 2050 року. З цієї метою щорічні інвестиції в мережі повинні зростати орієнтовно з 300 мільярдів доларів США в попередні роки до (550...630) мільярдів доларів США до 2030 року і (580...830) мільярдів доларів США до 2050 року. Однак реалізація складних проектів навіть за таких інвестицій може зайняти десятиліття, що в більшості випадків вдвічі довше, ніж розробка інфраструктури сонячних фотоелектричних і вітрових станцій чи зарядних станцій до електромобілів. Довгострокове планування є найважливішим чинником і вимагає високої компетенції фахівців, оскільки потрібно враховувати чинники з високим рівнем невизначеності, серед іншого: зростання попиту; збільшення обсягів регульованих відновлюваних джерел енергії; а також можливості для цифровізації.

Регулювання електричної системи є фундаментом безпеки електропостачання. Змінення структури попиту та зростання обсягів сонячної фотоелектричної та вітрової енергетики подвоюють потреби в гнучкості до 2030 року та збільшують їх майже вчетверо до 2050 року. На нинішньому етапі регулювання в енергетичних системах передусім забезпечується тепловими та гідроелектричними станціями. Вважається, що таке завдання можна вирішити в майбутньому через застосування водню, акумуляторів, викопного палива з уловлюванням вуглецю, заходів з реагування попиту, біоенергетики та іншими відновлюваними джерелами енергії, які підлягають диспетчеризації.

Електроенергія забезпечує зростаючу частку загального кінцевого споживання енергії в усіх економіках. За прогнозами [6] світовий попит на електроенергію зросте на 5 900 ТВт·год за сценарієм заявленої політики (STEPS) і понад 7 000 ТВт·год за сценарієм оголошених зобов'язань (APS) до 2030 року, що еквівалентно додаванню поточного рівня попиту в Сполучених Штатах та Європейському Союзі. У країнах з розвинутою економікою транспорт суттєво підвищуватиме попит на електроенергію, оскільки частка ринку електромобілів зростатиме з 8% у 2021 році до 32% у STEPS і майже до 50% у APS до 2030 року.

У країнах з ринками, що формуються, і країнах, що розвиваються, зростання населення та зростання попиту на охолодження призведе до збільшенню попиту на електроенергію. У Китаї до 2030 року частка власників кондиціонерів зросте майже приблизно на 40% порівняно з поточними рівнями. Прогнозований світовий попит у 2050 році на електроенергію підвищиться на 75% від нинішнього за сценарієм STEPS, на 120% – за сценарієм APS і на 150% – за сценарієм Net Zero Emissions by 2050 (NZE).

За останнє десятиліття виробництво сонячної енергії суттєво розширилося, збільшившись у декілька разів у всьому світі. Більш як 100 країн завершили проекти будівництва сонячних фотоелектричних станцій у 2022 році з використанням здебільшого імпортованих сонячних модулів, які виробляють у 40 країнах, серед яких Китай є основним експортером [30]. Очікувалося, що така тенденція продовжуватиметься підвищеними темпами, оскільки інвестиції, які планувалися, мали збільшити загальні потужності виробництва сонячних модулів приблизно з 640 ГВт у 2016 році до 9 200 ГВт у середньостроковій перспективі до 2030 року. Однак 2023 року цей процес сповільнився та у вересні 2023 року було опубліковано оновлену програму «Нульові викиди до 2050 року» (NZE), в якій передбачено зведення до нуля шкідливих викидів в атмосферу та досягнення нульових викидів до 2050 року [31]. У програмі наголошується: «Потрібно декарбонізувати енергетичний сектор. 25 відсотків енергії Європейський Союз отримує від відновлювальних джерел, і ми поставили мету досягти 38 відсотків до

2030 року». На рис. 3 наведено встановлену потужність сонячних і вітряних станцій фактичну за 2019-2023 роки і прогнозовано на 2030 рік.

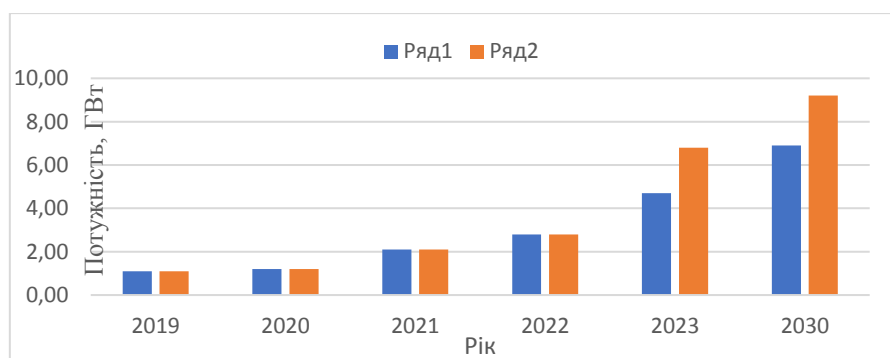


Рисунок 3 - Встановлена потужність сонячних і вітрових станцій: ряд 1 – за прогнозами 2023 року; ряд 2 – за прогнозами 2020 року.

Як випливає з рис. 3, процес вводу в експлуатацію сонячних і вітрових станцій відбувається повільніше ніж прогнозувалося у 2020 році [3]. Прогнози 2023 року [6] не передбачають різкого зростання відновлювальної енергетики, зменшуючи введені до 2030 року потужності на 33%.

Прогнозується, що до 2030 року в Китаї кількість сонячних фотоелектричних і морських вітрових електростанцій зросте на 30%. Перспективи ядерної енергетики також покращилися, чому сприяло продовження терміну служби діючих атомних реакторів у Японії, Кореї та Сполучені Штатах, а також впровадження нових реакторів у європейських країнах.

Відновлювані джерела енергії, зокрема сонячні фотоелектричні та вітрові станції, отримують найбільше переваг серед усіх джерел енергії в цьому десятилітті. Планують, що на них буде припадати 43% виробництва електроенергії в усьому світі в 2030 році, порівняно з 28% 2023 року. Прискореними темпами росте виробництво сонячних панелей у 40 країнах (рис. 4). Планується підвищити середній коефіцієнт використання сонячних модулів з 0,4 до 0,6 [6].

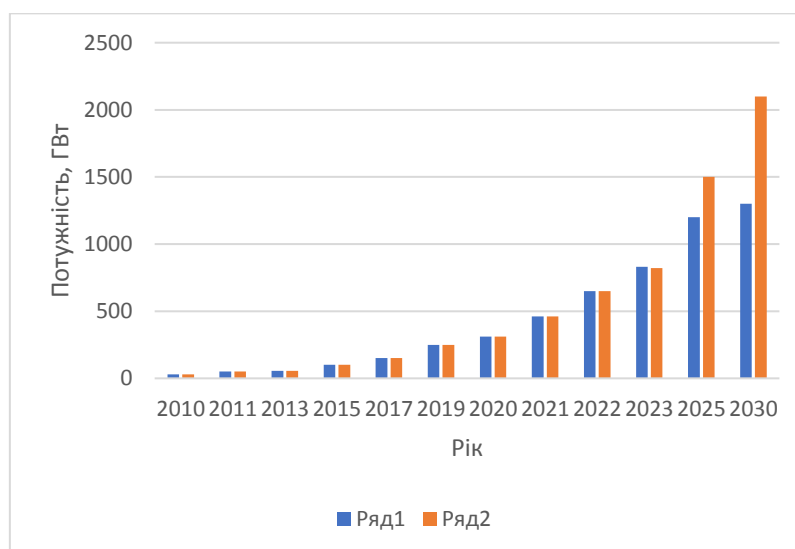


Рисунок 4 - Приріст глобального виробництва і встановленої потужності сонячних панелей: ряд 1 – за сценарієм STEPS; ряд 2 - за сценарієм APS.

Передумови сьогодення вплинули на змінення балансу технологій чистої енергетики, які використовують для досягнення цілей зі скорочення викидів. Деяке скорочення під час впровадження додаткових потужностей вітрових станцій [32] поряд з розвитком сонячної фотоелектричної енергії та прискорені темпи у впровадженні теплових насосів у будівлях створюють очікування, що такі станції забезпечать до 40% у загальній світовій генерації до 2030 році.

Натомість світова економіка стикається з проблемами, які заважають або суттєво гальмують розвиток інноваційних технологій. З поміж причин, які вже зафіксовані у 2023 році, такі:

1. Інвестиції в чисту енергетику в країнах з ринками, що формуються, і країнах, що розвиваються, перестали зростати. Вважається, що це спричинено процесом закупівлі підвищених обсягів резервних енергоносіїв та продовольчих товарів через їх постійне подорожчання;

2. Зруйновано збалансоване поєднання інвестицій у відновлювальні джерела, у електростанції з традиційними джерелами з низьким рівнем викидів CO<sub>2</sub> та в енергетичну інфраструктуру. Такі плани потрібно неодмінно доповнювати більшими, розумнішими та переоптимізованими інфраструктурними мережами. Довоєнна мережева інфраструктура в Україні є яскравим прикладом дисбалансу: час очікування підключення нової відновлювальної станції до мережі займав кілька років і, схоже, далі буде збільшуватися, а не скорочуватися. Це заважає ефективності впровадження поточних проєктів і ставить під сумнів доцільність впровадження нових;

3. Перехід до відновлювальних джерел підвищує попит на критично важливі природні мінерали та окремі елементи. Нині через військові дії виникли занепокоєння щодо постійного, вчасного, дешевого постачання критично важливих мінералів задля технологій виробництва електроенергії, електромереж, акумуляторних батарей та електромобілів;

4. Складнощі, які обмежують реалізацію співпраці між урядами країн. Вочевидь, об'єднання спільних зусиль прискорить розвиток технологій відновлювальної енергетики, забезпечить розширення та економічно ефективне постачання енергії, створить об'єднані енергосистеми з резервованими мережами, які можуть забезпечити надійне енергопостачання у разі виникнення відмов чи аварійних ситуацій.

У ході теперішніх подій тривають енергетичні змінення, які зміщують попит між окремими видами палива та джерелами електроенергії, водночас посилюючи в кінцевому підсумку контроль над власниками ресурсів викопного палива. Процес буде тривалим та виробники викопного палива, зокрема Організація країн-експортерів нафти залишатимуться впливовими. Попит на нафту буде зростати на 0,8% щорічно до 2030 року та досягне максимального піку приблизно на рівні 103 мільйони барелів щоденно. Але з часом (на межі 30-х-40-х років за прогнозами) попит буде зменшуватися, оскільки споживачі розвивають все більший спектр досконалих технологій отримання енергії від відновлювальних джерел, які з часом стають рентабельнішими та економічно привабливішими. Енергетична криза підтверджує такі прогнози, оскільки розгортання відновлюваних джерел енергії та підвищення їх ефективності в Європейському Союзі замістило майже 20 млрд кубометрів газу і нафти, що становить 25% від створеного росією штучного дефіциту в постачанні. Поряд з тим швидке збільшення продажу електротранспорту викликає оптимізм щодо обмеження видобутку нафти.

Попит на енергію в країнах з розвинутою економікою буде скорочуватися впродовж решти цього десятиліття орієнтовно на 0,5% щорічно. Прогнозується, що попит на енергію продовжить зростати в країнах з ринками, що формуються, і країнах, що розвиваються, на 1,4% щорічно. Дії спрямовані на скорочення споживання енергії, прогнозоване здешевлення палива, заплановані перезапуски атомної енергетики та подальше впровадження відновлювальних станцій – такі запропоновані заходи дають змогу вирішувати поставлені раніше світові проблеми. Впевненість у вирішенні поставлених завдань надають підтвердження з боку 83 країн та Європейського Союзу виконувати вчасно та в повному обсязі зобов'язання стосовно цілей щодо нульового рівня викидів CO<sub>2</sub>. Це можливо прискорить процес переходу до отримання енергії від відновлювальних джерел. Беручи до уваги поточну ситуацію в енергетиці в Україні, потрібно усвідомити, що розвиток відновлювальної енергетики всередині країни безумовно може стати активом у часи геополітичного напруження.

#### **Висновки**

Світова енергетична криза, спровокована війною росії проти України, привернула увагу до важливості забезпечення швидких та впорядкованих перетворень в енергетиці з орієнтацією на екологічні проблеми та наслідки для кожної країни. Дії росії на енергетичних ринках газу і нафти спричинили поштовх інфляції та зростання цін на паливо, електроенергію та продовольство.

Головною метою розвитку світової енергетики на період до 2035 року визначено забезпечення енергетичної та екологічної безпеки і перехід до енергоефективного та енергоощадного використання і споживання енергоресурсів з впровадженням інноваційних технологій. Дії, які спрямовані на скорочення споживання енергії, прогнозоване здешевлення викопного палива, заплановані перезапуски атомної енергетики та подальше впровадження відновлювальних станцій – такі запропоновані заходи дають змогу вирішувати поставлені світові проблеми.

Відповідно до прогнозів International Energy Agency в енергетиці задля створення умов стосовно обмеження зростання глобального потепління до 2050 року, потрібно реалізувати щонайменше такі сфери діяльності:

1. Активізувати державну політику з виробництва альтернативних джерел енергії. Зростання обсягів використання викопного палива частково зумовлено нездатністю країн прискорити зростання обсягів інвестицій у розвиток альтернативної енергії та інфраструктури систем електропостачання.

2. Впровадити інноваційні технології та відповідні види палива, використання яких дає змогу зменшити викиди CO<sub>2</sub>. Потрібно передбачити будівництво потужних електростанцій із застосуванням



палива з низьким рівнем викидів, насамперед АЕС, а також впровадження технологій для уловлювання CO<sub>2</sub> та його постійного зберігання або перетворення на кліматично нейтральне.

3. Закінчити військові дії в Європі та Близькому Сході, посилити контроль за дотримання базових положень міжнародного права, впроваджуючи дієві зміни в геополітиці.

Вивчення та усвідомлювання світового досвіду та перспективних напрямів розвитку електроенергетичних систем дасть змогу швидко відновити, перетворити та реформувати енергетику України у післявоєнний період.

#### Список використаної літератури

1. World Energy Outlook 2017 (WEO-2017). [Retrieved from] <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2017>
2. World Energy Outlook 2019 (WEO-2019). [Retrieved from] <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019>
3. World Energy Outlook 2020 (WEO-2020). [Retrieved from] <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020/overview-and-key-findings>
4. World Energy Outlook 2021 (WEO-2021). [Retrieved from] <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021>
5. World Energy Outlook 2022 (WEO-2022). [Retrieved from] <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>
6. World Energy Outlook 2023 (WEO-2023). [Retrieved from] <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>
7. Перетворення нашого світу: Порядок денний в області сталого розвитку на період до 2030 року», від 25 вересня 2015 року. [Retrieved from] <https://www.undp.org/uk/ukraine/tsili-staloho-rozvytku>
8. Рамкова конвенція Організації Об'єднаних Націй про зміну клімату (UNFCCC). [Retrieved from] [https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995\\_044#Text](https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_044#Text)
9. Виступ державного секретаря США Blinken A.J на засіданні Ради безпеки ООН. [Retrieved from] <https://www.c-span.org/video/?526259-1/un-security-council-meeting-russian-invasion-ukraine>
10. Building a Unified National Power Market System in China. [Retrieved from] <https://www.iea.org/reports/building-a-unified-national-power-market-system-in-china>
11. Net Zero Roadmap: A Global Pathway to Keep the 1.5 °C Goal in Reach. [Retrieved from] <https://www.iea.org/reports/net-zero-roadmap-a-global-pathway-to-keep-the-15-0c-goal-in-reach>
12. Кириленко О.В., Денисюк С.П., Блінов І.В. Енергетичний менеджмент: нові пріоритети XXI століття. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2023. № 1. С. 7-27. DOI 10.20535/1813-5420.1.2024.297508
13. Кириленко О.В., Денисюк С.П., Блінов І.В. Цифрова трансформація: сучасні тенденції та завдання. Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України. 2023. № 65. С. 5–14. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2023.65.005>
14. Fahad Zia M., Elbouchikhi E., Benbouzid M. Microgrids energy management systems: A critical review on methods, solutions, and prospects. *Applied Energy*. 2018. Vol. 222. Pp. 1033-1055.
15. Кириленко О.В., Блінов І.В., Зайцев С.О., Палачов С.О., Васильченко В.І. Впровадження міжнародних та європейських стандартів для розвитку ОЕС України згідно з концепцією Smart Grid. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2022. № 63. С. 5–12. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2022.63.005>
16. Кириленко О.В. Заходи та засоби перетворення енергетики України на інтелектуальну екологічно безпечну систему. *Вісник Національної академії наук України*. 2022. № 3. С. 18–23.
17. REPowerEU. План стрімкого зниження залежності від російського викопного палива і швидкого просування «зеленого переходу» [Retrieved from] [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/uk/IP\\_22\\_3131](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/uk/IP_22_3131) 18.
18. Reza Perdana M., Noor Alamsyah M., Sigit Sukmono S, Andri Hendriyana A. Identification of AVO Attribute Response to the Presence of CO<sub>2</sub> Content Using AVO Modelling Method in Lower Talang Akar Formation (LTAF), South Sumatra Basin. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik (The Mining-Geology-Petroleum Engineering Bulletin)*. DOI: 10.17794/rgn.2024.3.8
19. Regulation (eu) 2023/956 of the european parliament and of the council of 10 May 2023 establishing a carbon border adjustment mechanism. *Official Journal of the European Union*. L 130/52. 16.5.2023. [Retrieved from] <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023R0956>
20. Government Energy Spending Tracker: June 2023 update. [Retrieved from] <https://www.iea.org/reports/government-energy-spending-tracker-2>
21. Polyanska A., Pazynich Y., Mykhailyshyn K., Babets D., Toš P. Aspects of energy efficiency management for rational energy resource utilization. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik (The Mining-Geology-Petroleum Engineering Bulletin)* DOI: 10.17794/rgn.2024.3.2
22. WHO. Health factors involved in working under conditions of heat stress. Report of a WHO scientific group. Geneva: World Health Organization, 1969:1-32. Accessed December 23, 2023. [Retrieved from] [https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/40716/WHO\\_TRS\\_412.pdf?sequence=1](https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/40716/WHO_TRS_412.pdf?sequence=1).
23. Bach Aaron J. E., Thepaksorn P., Thepaksorn Hom E.K., Borg D.N. Practical cooling interventions for preventing heat strain in indoor factory workers in Thailand. *Americal Journal of industrial medicine*.2024. Vol. 67. Is. 6. DOI: 10.1002/ajim.23589
24. Сайт Гідрометцентру України. [Retrieved from] [https://www.facebook.com/UkrHMC/?locale=uk\\_UA](https://www.facebook.com/UkrHMC/?locale=uk_UA)

25. Третьякова Л.Д., Панасюк І.В., Мітюк Л.О. Метод ідентифікації небезпек та прогнозування виникнення надзвичайних ситуацій у разі забруднення ґрунту сполуками важких металів. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2022. № 3. С.115-125. DOI 10.20535/1813-5420.3.2022.272097.

26. World Bank. (2023). State and Trends of Carbon Pricing 2023. [Retrieved from] <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/39796>

27. World Air Quality Report 2023. [Retrieved from] [https://www.iqair.com/dl/2023\\_World\\_Air\\_Quality\\_Report.pdf?srsltid=AfmBOopwMb4AiHLTaSRUBp4ohy2IyT-QYHOКcGARLQvGXmOjk3CkdEBc](https://www.iqair.com/dl/2023_World_Air_Quality_Report.pdf?srsltid=AfmBOopwMb4AiHLTaSRUBp4ohy2IyT-QYHOКcGARLQvGXmOjk3CkdEBc)

28. Державна служба з надзвичайних ситуацій України [Retrieved from] <https://dsns.gov.ua/>

29. Tretiakova L., Mitiuk L. Mathematical modelling technique to assess soil conditions. *New Technologies in Environmental Science*. 2023, № 3, P. 103-106. DOI: 10.53412/jntes-2023-3-4

30. Solar PV Global Supply Chains. [Retrieved from] <https://www.iea.org/reports/solar-pv-global-supply-chains>

31. Матеріали 26-та Конференція ООН з питань зміни клімату у Глазго, 1-12 листопада 2023 року. [Retrieved from] <https://www.ukrinform.ua/rubric-world/3263883-nulovi-vikidi-do-2050-roku-velika-simka-pogodila-splini-klimaticnicili.html>

32. Кирик В.В., Штефурца С.О. Європейська офшорна мережа з вітровими електростанціями. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2023. № 4. С. 112-118. DOI 10.20535/1813-5420.4.2023.290938

**L. Tretiakova<sup>1</sup>**, Dr. Sc. (Eng.), Prof., ORCID 0000-0001-5244-746X  
**V. Pobigaylo<sup>1</sup>**, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0003-2673-7329  
**E. Usatii<sup>1</sup>**, student

<sup>1</sup>**National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”**

## **CHANGES IN THE GLOBAL ENERGY SECTOR CAUSED BY RUSSIA'S WAR AGAINST UKRAINE**

**Problems.** *The Russian invasion of Ukraine, Russia's refusal to accept the planned volumes of natural gas to the countries of the European Union caused a global energy and financial crisis, and changed the movement towards the development of renewable energy. the transition to sustainable and clean energy sources has become problematic for many countries.*

**Objective.** *General review and analytical analysis of trends in the development of energy consumption and the introduction of renewable sources in electric power systems in 2017-2023 using the results of research International Energy Agency (IEA), listed in World Energy Outlook (WEO) [1-6].*

*Methodology of implementation Trends in the development of the world system of renewable power plants to ensure climate neutrality, zero emissions, and a clean ecological environment have been analyzed for the study of the topic article. The study of changes and ways to limit the negative consequences of hostilities in Europe and the Middle East was carried out according to the long-term plans of the IEA.*

**Results.** *An overview of changes in the structure of energy resources in the world energy balance is presented. It is shown that the energy crisis has led to a sharp increase in the production of fossil fuels, primarily coal and oil. The construction of new capacities for the production of 250 billion tons of liquefied gas has begun. in order to stabilize fuel prices and reduce the price of electricity. Statistical and forecast information on the structure of the world energy balance and annual electricity production by types of generation is provided.*

*The environmental negative consequences registered for the last three years are considered: increased CO<sub>2</sub> emissions; air pollution with fine dust; pollution of soils and water horizons; changes in climatic indicators. The problems that have arisen for the implementation of new projects for the construction of renewable sources, the development of electric power infrastructure, security and reliability of power supply are analyzed. An analysis of the proposed measures under several scenarios to increase the production and use of solar, wind and nuclear energy, reduce dependence on traditional energy sources and the prospect of zero carbon dioxide emissions by 2030 is carried out.*

**Conclusions.** *Actions aimed at reducing energy consumption, projected reduction in fuel prices, planned restarts of nuclear power and further implementation of renewable power plants – these are the proposed measures that make it possible to solve the problems that have arisen around the world. Confidence in meeting the tasks is confirmed by 83 countries and the European Union to meet their commitments to achieve zero carbon dioxide emissions on time and in full. Learning from the experience and directions of development of the world energy sector will create an opportunity for the rapid restoration of the energy structure in Ukraine in the post-war period.*

**Keywords:** *energy crisis, environmental consequences, renewable energy, carbon dioxide emissions.*

Надійшла: 29.09.2024

Received: 29.09.2024