

В. Г. Петрук¹
А. П. Полив'ячук¹
Р. В. Петрук¹
С. М. Кватернюк¹
С. В. Гавадза¹

АНАЛІЗ ІННОВАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ СОНЯЧНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ В КОНТЕКСТІ ДЕКАРБОНІЗАЦІЇ ПОВОЄННОЇ ЕКОНОМІКИ УКРАЇНИ

¹Вінницький національний технічний університет

Одним з найважливіших чинників забезпечення декарбонізації економіки та усіх сфер діяльності людства і України, зокрема, є відновлювані джерела енергії (ВДЕ). Серед них особливо вирізняється сонячна генерація або фото-, геліо- енергетика. При цьому Сонце та сонячна енергія — основа життя та невичерпне, найбезпечніше і найекологічніше джерело енергії для людства на віддалену перспективу. Сонячна енергія поширюється, в основному, у вигляді тепла (інфрачервоний ІЧ-спектр) та світла (видимі довжини хвиль). Вона виникає на Сонці в результаті термоядерного синтезу ядер водню (дейтерію, тритію) у важкі ядра гелію, після чого через дефект мас виділяється неймовірно величезна енергія в 7 MeV на один нуклон. Потік сонячної енергії становить $3,9 \cdot 10^{26}$ Вт, з якого близько $1,7 \cdot 10^{17}$ Вт досягає Землі. Сонце випромінює щодня у напрямку нашої планети 960 мільярдів кВт·год безкоштовної енергії. Така її кількість теоретично може забезпечити енергетичні потреби людства протягом тривалого часу. У статті проаналізовано інноваційні технології сонячної генерації з позицій декарбонізації (девуглетизації), зокрема, для повоєнного відновлення економіки України. Водночас декарбонізація — це обмеження видобутку вуглецевмісних речовин і відповідних природних ресурсів, а також зменшення обсягів викидів парникових газів, зокрема і вуглецевмісних та сажових часток. Альтернативою цьому є всебічне впровадження ВДЕ, і насамперед СЕС. Зазначено, що основою для фотовольтаїки є монокристалічний, іноді полікристалічний та аморфний кремній. Проаналізовано також нові композиції напівпровідників, які є менш затратні, але проблематичні з погляду реалізації у промислових масштабах. Підсумовано, що економіка повоєнної України має відновлюватись виключно в контексті природоохоронних технологій декарбонізації, а також завдяки всебічному розвитку індивідуальних СЕС та інших ВДЕ.

Ключові слова: декарбонізація, сонячна енергетика, відновлювані джерела енергії, інсоляція, фотовольтаїка.

Вступ

Сонячна енергія значною мірою визначає і керує кліматом і погодою та є важливим чинником фотосинтезу і відповідно основою життя екосистем на Землі. Уся область довжин хвиль випромінювання Сонця (99,9 %) здебільшого знаходиться у діапазоні 150...4000 нм. Ультрафіолетова компонента, зокрема її спектральний максимум знаходиться в діапазоні 200...300 нм, значною мірою поглинається озоном на висоті 15...30 км (максимум 20...25 км) до земної поверхні. Людство має у своєму арсеналі як Сонце — нескінченне джерело енергії, так і природні матеріали для реалізації геліогенеруючих технологій. Йдеться, насамперед, про кремній (силіцій), як унікальний напівпровідниковий матеріал, сполук якого у земній корі близько 30 % (кварц, пісок, кремнезем, солі кремнієвої кислоти та багато інших силіційовмісних сполук). Є також сподівання, що на базі сучасних нанотехнологій зі зростанням новітніх розробок і матеріалів, зокрема на основі сполук не менш унікального хімічного елемента — вуглецю (карбону), а саме його модифікацій: графену, карбіну, фулерену, нанотрубок та нанокілець людство незабаром вирішить вищезазначені пробле-

ми генерації екологічно чистої енергії [3], [5].

Мета роботи — аналіз сучасних природоохоронних технологій сонячної генерації та проблеми підвищення їхньої ефективності, як головного чинника декарбонізації енергетики і, в цілому, економіки, зокрема, повосенні України.

Аналіз проблеми та результатів дослідження

Як відомо, територія України, з погляду енергетичного потенціалу, умовно поділена на 4 кліматичні зони з різною сонячною інсоляцією, а саме: Крим і південь Одеської області — I зона, 1350 кВт/м²·рік; південний схід держави, значною мірою, де зараз тривають воєнні дії і окуповані країною-терористом — II зона, 1250 кВт/м²·рік; північні та центральні області — IV зона, 1050 кВт/м²·рік; і, нарешті, південний захід України, в основному Карпатський та Закарпатський регіон — III зона, 1150 кВт/м²·рік. Південні райони Вінницької області теж можна віднести до II-III кліматичної зони. Річний розподіл сонячного випромінювання за місяцями показано на рис. 1. Густина сонячного потоку поза межами Землі дорівнює приблизно 1,35 кВт/м², а максимальна інтенсивність сонячного випромінювання на поверхні нашої планети в околі 1кВт/м², але це декілька годин у літні дні. Середня інтенсивність сонячного світла на земній кулі становить 200...250 Вт/м². За рік надходження сонячної радіації на територію України оцінюється на рівні $7,2 \cdot 10^{14}$ кВт год, що еквівалентно 88,4 млрд тонн у.п. Для Вінниччини це становить $3,7 \cdot 10^9$ тонн у. п. [6]. При цьому склад сонячного випромінювання такий: ПЧВ ~ 46 %, УФВ ~ 9 %, видима частина спектра ~ 45 %, мізерна кількість гамма-квантів (~0,01...1 нм), а також рентгенівських променів (~1...100 нм) та «довгих» хвиль санти-, деци-, метро- та кілометрових діапазонів.

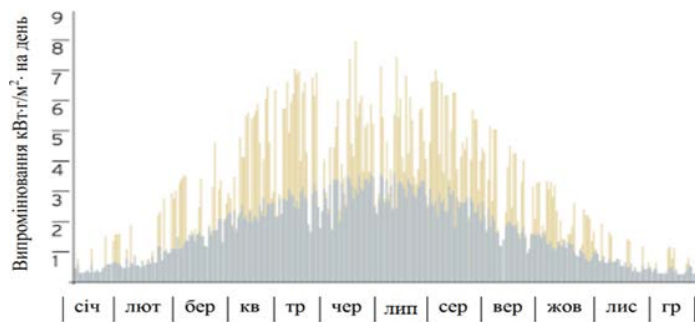


Рис. 1. Річний розподіл сонячного випромінювання за місяцями:
суцільне сіре тло — розсіяне випромінювання;
переривчастий спектр — пряме випромінювання

Як випливає з рис. 1, звичайно ж, максимум сонячної інсоляції припадає на світлі дні у літні місяці [7].

При цьому, за даними Державного агентства з енергоефективності та енергозбереження України, частка відновлюваних джерел енергії у загальному енергобалансі нашої держави за останні 10...15 років зросла вдвічі і становить близько 10...13 % у різних секторах економіки. При цьому генерація електричної енергії сонячними електричними станціями (СЕС) за цей період зросла на порядок і становить

понад 1 ТВт·год (рис. 2), а кількість встановлених СЕС, зокрема тих, що працює з 2010 року за «зеленим тарифом», зросла на сьогодні з декількох сотень до декількох тисяч. Особливо це стосується приватних домогосподарств, у яких ця цифра збільшилась теж приблизно на порядок.

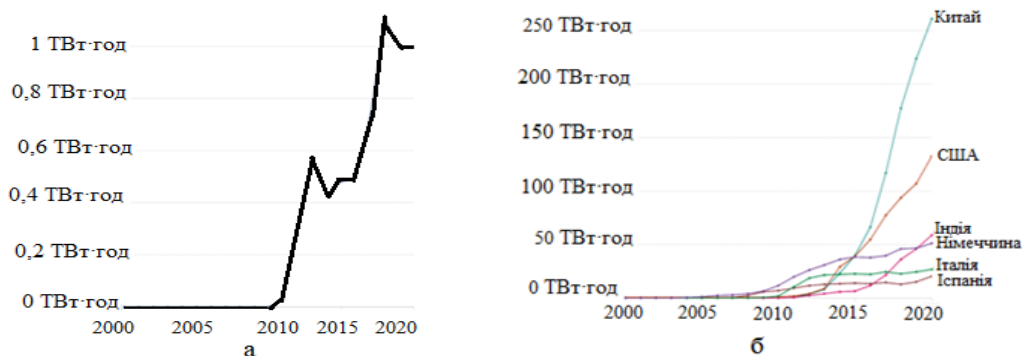


Рис. 2. Динаміка виробленої електроенергії СЕС: а — Україною; б — іншими країнами світу

Основним стимулом до такого бурхливого розвитку ВДЕ в Україні став так званий «зелений тариф» на електричну енергію, отриману з альтернативних джерел. «Зелений тариф» — це державний закупівельний тариф електроенергії за підвищеною ціною у приватних осіб і організацій, що використовують альтернативні джерела енергії (18,09 євроцентів за 1 кВт·год — сонячна генерація

і 16,26 євроцентів за 1 кВт·год — вітрова). Значною мірою, завдяки цьому крокові, у 2019 р. Україна увійшла у десятку країн світу за темпами розвитку ВДЕ, а у 2020 р. — у п'ятірку європейських країн за темпами розвитку саме сонячної енергетики. У інших рейтингових системах Україна теж значно піднялася вверх. За даними НКРЕКП, станом на кінець 2021 р. встановлена потужність сектора відновлюваної енергетики України досягла 9655,9 МВт, враховуючи і сонячні системи для приватних домогосподарств [2], [8].

За даними Асоціації сонячної енергетики України, за останні роки попит на домашні автономні сонячні електростанції зріс у понад десять разів, а на промислові об'єкти — у 4...5 разів. Сьогодні найзатребуванішими є автономні геліосистеми з батареями електричних акумуляторів, що дозволяє використовувати сонячну енергію навіть вночі [1].

У сонячній енергетиці можна виділити два напрями перетворення сонячної енергії в електричну:

– фотоелектричний метод, коли електромагнітне випромінювання ІЧ та видимого діапазону Сонця перетворюється в електроенергію постійного електричного струму;

– термодинамічний метод, коли сконцентрована сонячна енергія використовується для отримання тепла і пари, щоб або обертання турбогенератора для виробництва як постійного, так і змінного електричного струму, або для опалення та гарячого водопостачання.

Фотоелектричний метод забезпечується за допомогою фотоелектричних перетворювачів (ФЕП), або сонячних елементів (СЕ), або фотоелементів (ФЕ). В результаті СЕ генерують електричний струм пропорційно інтенсивності сонячного випромінювання. Ця генерація можлива завдяки напівпровідниковим перетворювачам з селективною спектральною чутливістю на основі фотоелектричного ефекту з *n-p*-переходами, а конкретніше — на вентильному фотоелектричному ефекті. Переважна кількість фотоелементів (90...95 %) базується на полікристалічному, аморфному або монокристалічному кремнії (отримується переважно методом Чохральського — витягування з розплаву) з ККД в околі 15...20 %. Каскадні та арсенід-галієві ФЕ в окремих випадках можуть забезпечити ККД до 30...35 %. При цьому ФЕ, зібрані з великої кількості паралельно або послідовно з'єднаних сонячних елементів, називаються сонячними батареями або сонячними панелями. Для їхнього виробництва використовують складну планарну технологію, яка забезпечує у приповерхневому шарі напівпровідникової структури *p-n*-перехід на основі акцепторних та донорних домішок з утворенням пари «електрон–дірка». При цьому збуджені квантами світла електрони після рекомбінації з дірками долають ширину забороненої зони і опиняються у зоні провідності. Дірки залишаються у валентній зоні. Відтак, у такому *p-n*-переході на межі двох різнозарядових зон виникає різниця потенціалів, та електрорушійна сила на зовнішніх електродах, яка зумовлює постійний струм крізь опір навантаження або зовнішнього джерела-споживача (акумулятор або електрогенератор чи засіб освітлення тощо).

Схема перетворення енергії квантів світла в електричну енергію показана на рис. 3.

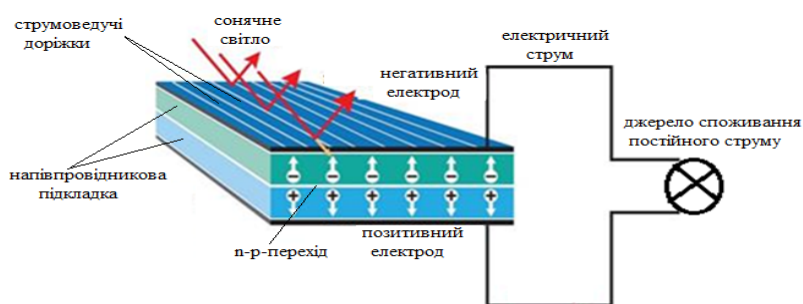


Рис. 3. Принципова схема перетворення сонячного світла у постійний електричний струм

Далі електрична енергія від ВДЕ (вітрова, геотермальна, сонячна, біогазова тощо) передається до контролера-диспетчера, який перерозподіляє за заданою програмою постійний електричний струм на акумулятор або на інвертор, який перетворює постійний у змінний струм заданої напруги і далі спрямовує його до споживача або, у разі надлишку, у зовнішню електричну мережу (рис. 4).

Термодинамічний метод реалізується на сонячних колекторах — пристроях для збору енергії як у видимому діапазоні, так і у ІЧ-спектрі. Різновидом сонячного колектора є сонячний водонагрівач для виробництва гарячої води, іншої теплоаккумуляції або передачі споживачеві (рис. 5).

На цьому етапі розвитку фотовольтаїки зростає попит на тонкоплівкові, відносно дешеві, гнучкі сонячні батареї чи панелі — фотоелектричні пристрої, у яких шар напівпровідника напильний на тонку підкладку із загальною товщиною струмогенерувального шару близько 1 мкм. На початкових етапах розвитку тонкоплівкових технологій таким шаром слугував аморфний кремній.

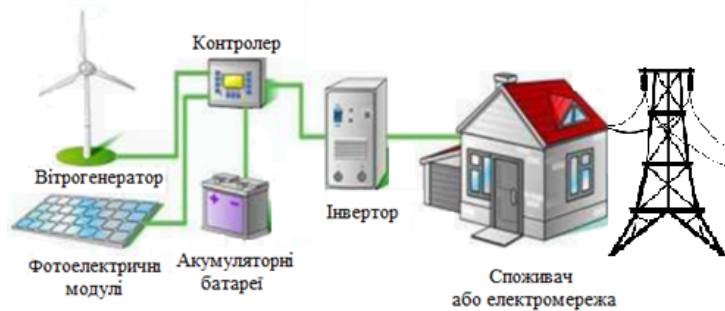


Рис. 4. Загальна схема сонячної генерації



Рис. 5. Сонячний водонагрівач

Головний недолік таких структур — низький ККД близько 3...10 % та незначний строк експлуатації. Є і переваги — мобільність, можливість трансформації форми (гнучкість), мала вага, підвищена ефективність роботи в похмурі дні тощо. Тому, на відміну від СЕ першого покоління, тонкоплівкові панелі останнім часом виготовляють з декількох шарів ФЕ, що складаються, до прикладу, із телуриду кадмію (CdTe), селеніду міді (CuSe), індій-галію (InGa), арсеніду галію (GaAs) та ін. Цікавинками є ФЕ на основі перовскіту (CaTiO_3), сучасних нанотехнологій тощо. Разом з тим, технології отримання таких багатошарових, багатокаскадних, бінарних, нестехіометричних сумішей в композиті з полімерами — надзвичайно складне завдання, особливо його реалізації в промислових масштабах.

Передові країни, з погляду сонячної генерації, такі як: Китай, Індія, США, країни ЄС невпинно нарощують і темпи росту, і обсяги ВДЕ, але, насамперед, СЕС і ВЕС. В умовах воєнних загроз, зокрема від Росії, як країни-агресора і терориста, яка шантажує людство не тільки ядерними загрозами, але і викопними вуглецевісними ресурсами, цивілізований світ спрямовує свої зусилля на реструктуризацію своїх природно-енергетичних ресурсів. Ці країни протягом останніх років збільшують обсяги, зокрема, термодинамічних СЕС баштового типу, СЕС з модульними параболічними концентраторами, дзеркальними параболічними СЕС з двигуном Стірлінга, найсучасніших одноосьових екліптичних геліостатів та інших інноваційних природоохоронних та енергоефективних технологій. У будь-якому разі, тренд зростання сонячної генерації як у світі, так і, зокрема, в Україні незворотній. На тепер головне завдання науковців не тільки підвищення ККД сонячних панелей (як і інших ВДЕ) за рахунок розробки і впровадження ефективніших первинних перетворювачів світла в електрику, але й спрощення технологій, зменшення енергозатратності, збільшення доступності тощо.

Висновки

Отже, післявоєнна економіка України має нарощуватися переважно на основі ВДЕ і природоохоронних енергоефективних технологій декарбонізації та «зеленої» трансформації. А в умовах, коли РФ, як країна-агресор, захопила Запорізьку АЕС, зруйнувала Каховську ГЕС, знищила в Україні майже усю інфраструктуру ТЕС, нашій державі зараз вкрай важливо впроваджувати навіть не стільки великі СЕС, бо є загроза їхнього пошкодження або руйнування, а саме малі модулі з сонячних панелей потужністю в межах від одного до декількох кВт на дахах кожного будинку та індивідуальних господарствах. Це деякою мірою забезпечить енергонезалежність споживачів і дасть можливість українцям вистояти у цій, зокрема і енергетичній, війні.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] М. М. Рожелюк, *Досвід використання регенеративних джерел енергії в Україні та країнах Європи*. Київ, Україна: НУ «Києво-Могилянська академія», 2022, с. 84-94.
- [2] Верховна Рада України, *Закон України від 20 серпня 2022 р. Про альтернативні джерела енергії*. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/555-15#Text>.
- [3] Й. С. Мисак, О. Т. Возняк, О. С. Дацько, і С. П. Шаповал, *Сонячна енергетика: теорія та практика*. Львів, Україна: НУ «Львівська політехніка», 2014, 340 с.
- [4] Н. Присяжнюк, *Втрати та перспективи сонячної енергетики під час війни в Україні*, 2023. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://Speka.media/p168dv>.
- [5] *Сонячна енергетика в Україні*. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://Aveston.com/articles/solar-in-ukraine-2019/>.
- [6] С. О. Кудря, *Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії*. Київ, Україна: НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського», 2012, 304 с.
- [7] *Енергія сонця*. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://generacia.org.ua/?gad_source=1&gclid=CjwKCAjw14yyBhAgEiwADSEjeNj6S6cn2RWQKcJ_UnBzTz6jMTxn8yCjXL_burjH14Ut8b_xnZ3AShoCAHgQAvD_BwE.

[8] *Способи використання сонячної енергії в будинках і в промисловості.* [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://isolar.com.ua/ua/price/?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=google&utm_content=1&gad_source=1&gclid=CjwKCAjw14yyBhAgEiwADSEjePKSbnBo0DJcb0ZO2MuQRnH8J63RwJziQf7PsNAjOJO_ed5rFmiRQBoCdtsQAvD_BwE.

Рекомендована кафедрою екології, хімії та технологій захисту довкілля ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 15.05.2024 р.

Петрук Василь Григорович — д-р техн. наук, професор, професор кафедри екології, хімії та технологій захисту довкілля, e-mail: petrukvg@gmail.com ;

Полив'янчук Андрій Павлович — д-р техн. наук, професор, професор кафедри екології, хімії та технологій захисту довкілля, e-mail: ap3@ukr.net ;

Петрук Роман Васильович — д-р техн. наук, професор, професор кафедри екології, хімії та технологій захисту довкілля, e-mail: prrom07@gmail.com ;

Кватернюк Сергій Михайлович — д-р техн. наук, професор, професор кафедри екології, хімії та технологій захисту довкілля, e-mail: kvaternuk@vntu.edu.ua ;

Гавадза Сергій В'ячеславович — аспірант кафедри екології, хімії та технологій захисту довкілля.

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

V. H. Petruk¹
A. P. Polivyanchuk¹
R. V. Petruk¹
S. M. Kvaterniuk¹
S. V. Gavadza¹

Analysis of Innovative Technologies of Solar Generation in the Context of Decarbonization of the Post-War Economy of Ukraine

¹Vinnitsia National Technical University

One of the most important factors in ensuring the decarbonization of the economy and all spheres of human activity is renewable energy sources (RES). Among them, solar generation or photo- and solar energy stand out. At the same time, the Sun and solar energy are the basis of life and an inexhaustible, safest and most ecological source of energy for mankind in the long term. Solar energy propagates mainly in the form of heat (infrared IR spectrum) and light (visible wavelengths). It occurs on the Sun as a result of thermonuclear fusion of hydrogen nuclei (deuterium, tritium) into heavy helium nuclei, after which an incredibly huge energy of 7 MeV per nucleon is released due to a mass defect. The flux of solar energy is $3.9 \cdot 10^{26}$ W, of which about $1.7 \cdot 10^{17}$ W reaches the Earth. The sun emits 960 billion kWh of free energy every day in the direction of our planet. Such amount of it can theoretically provide the energy needs of mankind for a long time. The article analyzes innovative technologies of solar generation from the standpoint of decarbonization, in particular, for the post-war recovery of Ukraine's economy. At the same time, decarbonization means limiting the production of carbon-containing substances and natural resources, as well as reducing the amount of greenhouse gas emissions, including carbon-containing and soot particles. An alternative to this is the comprehensive implementation of RES, and, first of all, solar power plant. It is claimed that the basis for photovoltaics is monocrystalline, sometimes polycrystalline and amorphous silicon. New compositions of semi-conductors are also analyzed, which are less costly, but problematic from the point of view of implementation on an industrial scale. It is concluded that the economy of post-war Ukraine should be restored exclusively in the context of environmental protection technologies of decarbonization, as well as comprehensive development of individual solar power plants and other renewable energy sources.

Keywords: decarbonization, solar energy, renewable energy sources, insolation, photovoltaics.

Petruk Vasyl H. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Chair of Ecology, Chemistry and Environmental Protection Technologies, e-mail: petrukvg@gmail.com ;

Polyvyanchuk Andriy P. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Chair of Ecology, Chemistry and Environmental Protection Technologies, e-mail: ap3@ukr.net ;

Petruk Roman V. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Chair of Ecology, Chemistry and Environmental Protection Technologies, e-mail: prrom07@gmail.com ;

Kvaternuk Serhiy M. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Chair of Ecology, Chemistry and Environmental Protection Technologies, e-mail: kvaternuk@vntu.edu.ua ;

Gavadza Serhiy V. — Post-Graduate Student of the Chair of Ecology, Chemistry and Environmental Protection Technologies