



Прийнято 28.03.2026. Прорецензовано 06.05.2026. Опубліковано 30.05.2026.

УДК 621.311:621.311.243

DOI: 10.31471/1993-9981-2026-1(56)-145-162

## ІНТЕГРАЦІЯ ГІБРИДНИХ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ У ГАЗОВИДОБУВНІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ ТА ОЦІНЮВАННЯ ЇХ ВПЛИВУ НА ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

### Ващишак І. Р.

Кандидат технічних наук, доцент  
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу  
76019, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна  
<https://orcid.org/0000-0002-9078-6726>  
e-mail: [iryana.vashchysyak@nung.edu.ua](mailto:iryana.vashchysyak@nung.edu.ua)

### Криницький О. С.

Кандидат технічних наук, доцент  
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу  
76019, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна  
<https://orcid.org/0000-0003-2338-8661>  
e-mail: [oleksandr.krynytskyi@nung.edu.ua](mailto:oleksandr.krynytskyi@nung.edu.ua)

### Райтер П. М.

Доктор технічних наук, професор  
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу  
76019, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна  
<https://orcid.org/0000-0002-3437-2844>  
e-mail: [petro.raiter@nung.edu.ua](mailto:petro.raiter@nung.edu.ua)

### Середюк О. Є.

Доктор технічних наук, професор  
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу  
76019, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна  
<https://orcid.org/0000-0002-8539-2693>  
e-mail: [orest.serediuk@nung.edu.ua](mailto:orest.serediuk@nung.edu.ua)

---

Запропоноване посилання: Ващишак, І. Р., Криницький, О. С., Райтер, П. М. & Середюк, О. Є. (2026). Інтеграція гібридних фотоелектричних систем у газовидобувній промисловості та оцінювання їх впливу на якість електроенергії. *Методи та прилади контролю якості*, 1(56), 145-162. doi: 10.31471/1993-9981-2026-1(56)-145-162

\* Відповідальний автор



**Анотація.** У статті досліджено особливості інтеграції фотоелектричних систем (ФЕС) у енергетичну інфраструктуру об'єктів газовидобувної галузі з урахуванням впливу на показники якості електроенергії. Актуальність роботи зумовлена необхідністю підвищення енергоефективності, надійності електропостачання та зниження залежності від централізованих джерел енергії в умовах зростання частки відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). Встановлено, що сучасний етап розвитку ФЕС у промисловості характеризується переходом від локального використання до впровадження гібридних енергетичних систем, які функціонують в автономних або слабо пов'язаних із мережею режимах. Особливу увагу приділено аналізу параметрів якості електроенергії, зокрема гармонічних спотворень, відхилень напруги та частоти, а також впливу нелінійного і реактивного навантаження, характерного для технологічного обладнання газовидобувних об'єктів. Обґрунтовано, що ігнорування зазначених факторів призводить до зниження стійкості режимів роботи електричних мереж, зростання втрат електроенергії та підвищення ризику відмов обладнання. Встановлено, що мобільні та стаціонарні ФЕС, які застосовуються у польових умовах, характеризуються підвищеними вимогами до контролю коефіцієнта потужності та гармонічного складу струмів і напруг. На основі аналізу кліматичних умов України визначено потенціал використання сонячної енергії в регіонах газовидобутку, зокрема Харківській та Полтавській областях, де рівень глобальної горизонтальної інсоляції становить у середньому 1200–1300 кВт·год/м<sup>2</sup> на рік. Показано, що навіть відносно невеликі за потужністю ФЕС здатні забезпечити значну частку енергоспоживання окремих виробничих об'єктів. Практичне значення роботи полягає у формуванні комплексного підходу до інтеграції ФЕС, який передбачає поєднання техніко-економічного аналізу, оптимізації режимів роботи та обов'язкової метрологічної оцінки якості електроенергії. Запропонований підхід дозволяє підвищити надійність функціонування енергосистем, мінімізувати негативний вплив ВДЕ на параметри мережі та забезпечити ефективне використання відновлюваних джерел енергії в умовах промислової експлуатації.

**Ключові слова:** відновлювальні джерела енергії, децентралізована генерація, фотоелектрика, гармонічні спотворення, параметри електричних мереж, показник якості.

## Вступ

Внаслідок масштабних руйнувань енергетичної інфраструктури України з початку повномасштабного вторгнення значна частина централізованих генеруючих потужностей виведена з ладу, майже дві третини регульованих потужностей виявилися пошкодженими або знищеними [1].

Одним із ключових напрямів вирішення енергетичних проблем України є розвиток децентралізованої генерації [2–4]. Найсамперед це пов'язано з підвищенням стійкості системи: локальне виробництво електроенергії дозволяє зменшити уразливість до централізованих атак, нарощувати резерви і оперативніше реагувати на перевантаження мереж. У цьому контексті газодобувна промисловість України є доцільним об'єктом для впровадження гібридних фотоелектричних систем (ФЕС), з огляду на територіальну розосередженість виробничих майданчиків та наявність значного локального навантаження [5]. Водночас їх інтеграція у розподілені електричні мережі супроводжується суттєвими технічними обмеженнями, пов'язаними з керованістю режимів, забезпеченням якості електроенергії та узгодженням із існуючими системами захисту і регулювання [6]. Зокрема, характерними є підвищення рівня гармонічних спотворень, нестабільність напруги

та ускладнення процесів балансування потужностей у локальних вузлах мережі.

У межах даного дослідження залишається невирішеним питання точного визначення потенціалу для впровадження ФЕС у газовидобувній галузі, а також те, як саме особливості цих технологічних систем враховувати при проектуванні живлення та забезпеченні якості електричної енергії. Критично важливо оцінити, які елементи технологічного процесу можна забезпечити живленням від відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) і яким чином організувати їх спільну роботу з мережею, не погіршуючи якість електропостачання та дотримуючись нормативних вимог щодо показників напруги, частоти та гармонік.

**Мета роботи** – розроблення підходу до оцінювання ефективності інтеграції гібридних ФЕС у структуру енергозабезпечення газовидобувних підприємств із урахуванням показників якості електричної енергії та режимних характеристик локальних електричних мереж.

## Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень та публікацій

Останніми роками спостерігається суттєве зростання кількості досліджень, присвячених декарбонізації нафтогазової

галузі, впровадженню гібридних енергетичних систем та підвищенню енергетичної автономності віддалених виробничих об'єктів за рахунок використання фотоелектричних установок, систем накопичення енергії та інших ВДЕ. Водночас сучасні дослідження свідчать, що інтеграція фотоелектричних та гібридних систем у нафтогазовидобувну інфраструктуру повинна враховувати не лише енергетичні та економічні аспекти, але й показники якості електроенергії. Це зумовлено чутливістю технологічного обладнання (компресорів, насосів, частотно-регульованих приводів та систем автоматизації) до відхилень напруги, частоти, гармонічних спотворень і перехідних процесів.

Бібліографічне дослідження виконано на основі аналізу наукових публікацій, індексованих у базі даних Scopus, що забезпечує репрезентативність вибірки за рахунок широкого охоплення рецензованих джерел. На першому етапі сформовано англомовні пошукові запити для відбору публікацій, присвячених застосуванню сонячних, фотоелектричних та гібридних енергетичних систем у нафтогазовидобувній галузі. Після очищення від нерелевантних і дубльованих записів сформовано фінальну вибірку для аналізу. На другому етапі проведено кількісний аналіз публікацій, включаючи динаміку наукової активності, географічний розподіл, ключові джерела, авторів та установи, що дозволило визначити основні центри досліджень і тенденції розвитку напрямку. На третьому етапі виконано бібліометричне картографування у VOSviewer на основі аналізу співзвучності ключових слів, співавторства та бібліографічних зв'язків. Виявлено основні тематичні кластери, пов'язані з фотоелектричною генерацією, гібридними мікромережами, декарбонізацією та оптимізацією енергосистем. Додатково проаналізовано терміни, пов'язані з якістю електроенергії (гармоніки, стабільність напруги, частотні відхилення), що дозволило оцінити рівень інтеграції цієї проблематики у дослідженнях застосування ВДЕ в нафтогазовій галузі.

Бібліографічний аналіз проведено за трьома напрямками, які охоплюють най-

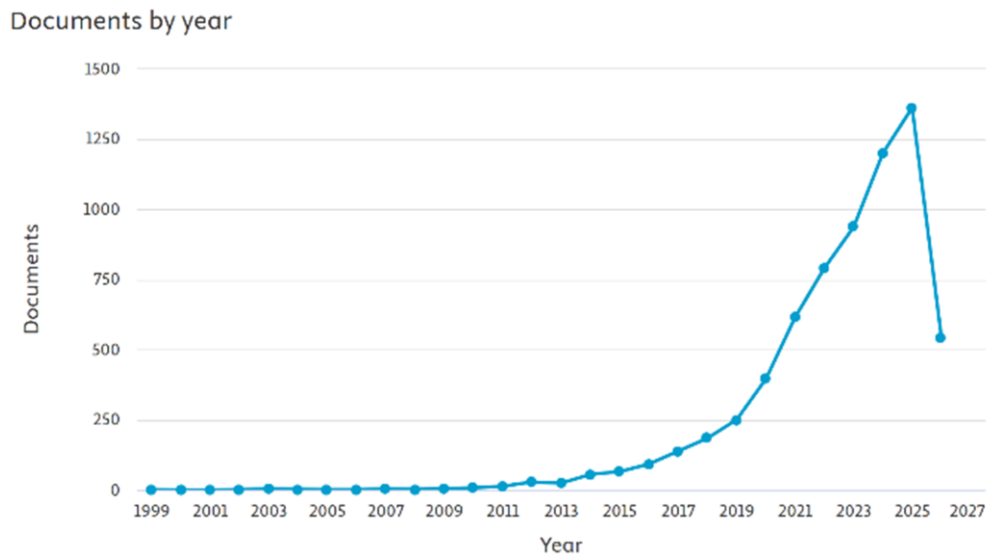
більш релевантні аспекти використання сонячних електростанцій і ВДЕ у нафтогазовидобувній галузі: оптимізація гібридних енергосистем в нафтогазовидобутку; вплив ФЕС на обладнання газовидобувної галузі; економічна доцільність. За результатами пошуку отримано 6714 публікацій за першим напрямком, 753 – за другим і 700 – за третім напрямками, причому в усіх випадках було застосовано обмеження за предметними галузями Energy, Engineering та Environmental Science. На рисунку 1 наведено графіки зміни кількості публікацій за роками для кожного з трьох напрямків.

Найбільш масштабним є *перший напрямок*, присвячений оптимізації гібридних енергосистем у нафтогазовидобутку. Його розвиток характеризується переходом від поодиноких досліджень до різкого зростання після 2018-2019 рр.: кількість публікацій зростає з 65 у 2015 р. до 1357 у 2025 р. Це свідчить про формування системного підходу, що охоплює енергоменеджмент, гібридні мікромережі, водневу енергетику та оптимізацію генерації й накопичення енергії.

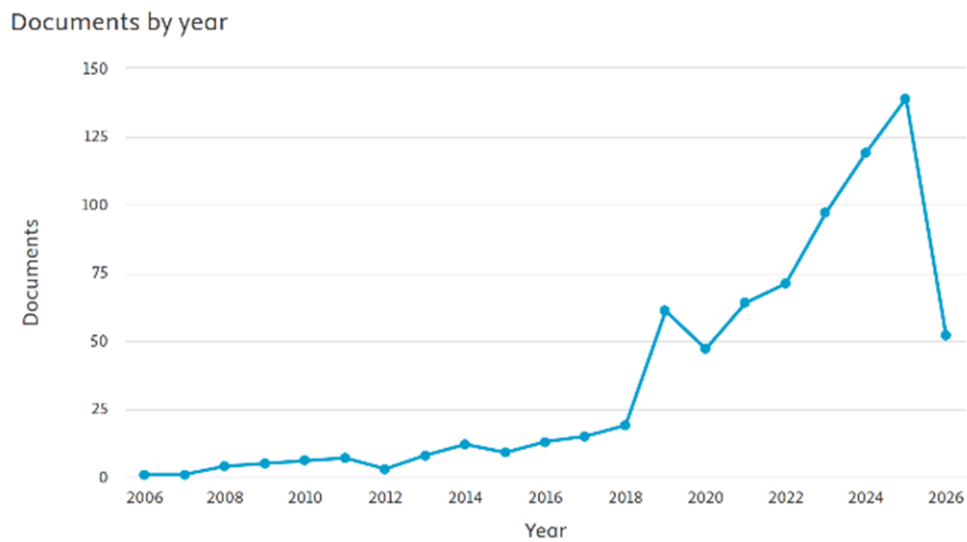
*Другий напрямок*, що стосується впливу ФЕС на обладнання газовидобувної галузі, має менший, але більш спеціалізований масив досліджень. Після 2019 р. спостерігається стабільне зростання (з 58 до 135 публікацій у 2025 р.), що вказує на формування окремого наукового сегмента. Він є критично важливим для практики, оскільки пов'язує впровадження ВДЕ з надійністю та безпечністю роботи обладнання.

*Третій напрямок*, присвячений економічній доцільності впровадження ФЕС, розвивається поступово: з 21 публікації у 2015 р. до 80 у 2025 р. Його особливістю є вища концептуальна зрілість і міждисциплінарний характер, що поєднує енергетику, економіку та оцінку ризиків.

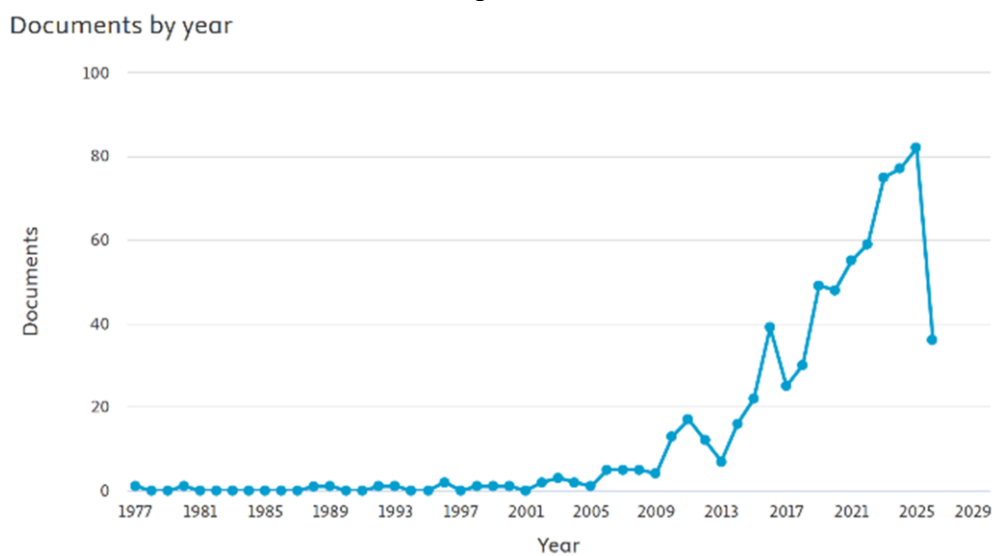
Загалом усі напрями демонструють активізацію після 2020 р., що зумовлено зростанням уваги до декарбонізації та енергетичної автономності. При цьому перший напрямок має системний характер, другий – прикладний, а третій формує економічне підґрунтя впровадження ФЕС у нафтогазовидобутку.



напрямок 1



напрямок 2

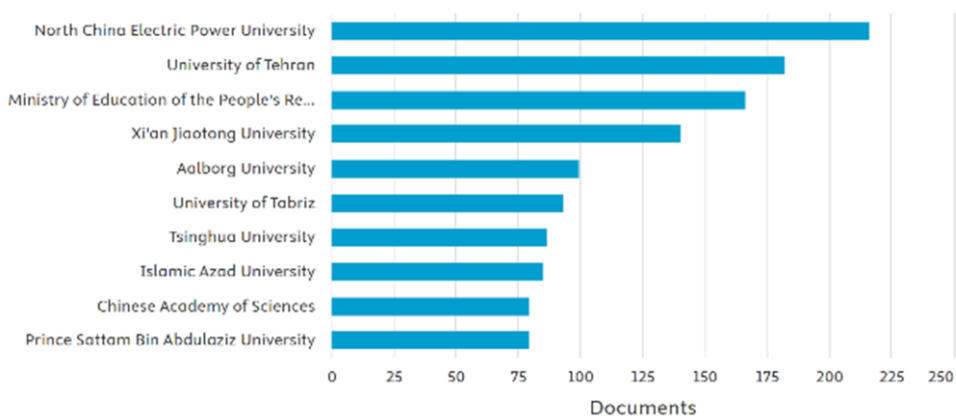


напрямок 3

Рисунок 1 – Графік зміни кількості публікацій за напрямками в розрізі років

### Documents by affiliation

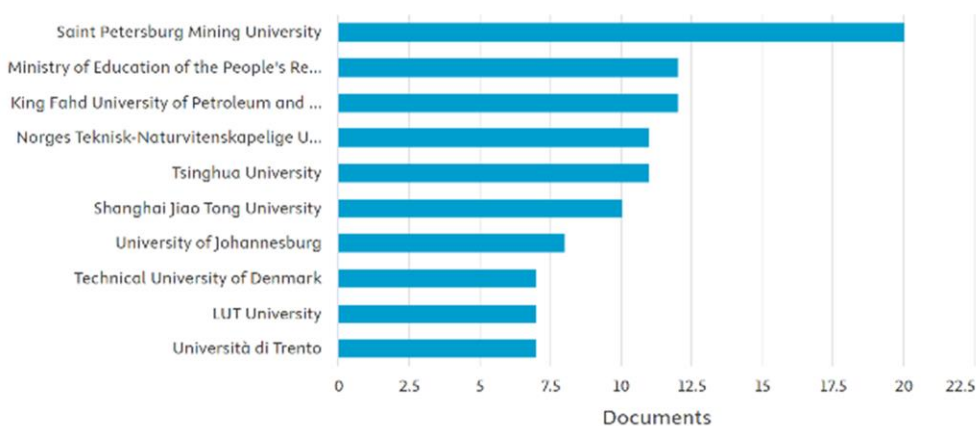
Compare the document counts for up to 15 affiliations.



напрямок 1

### Documents by affiliation

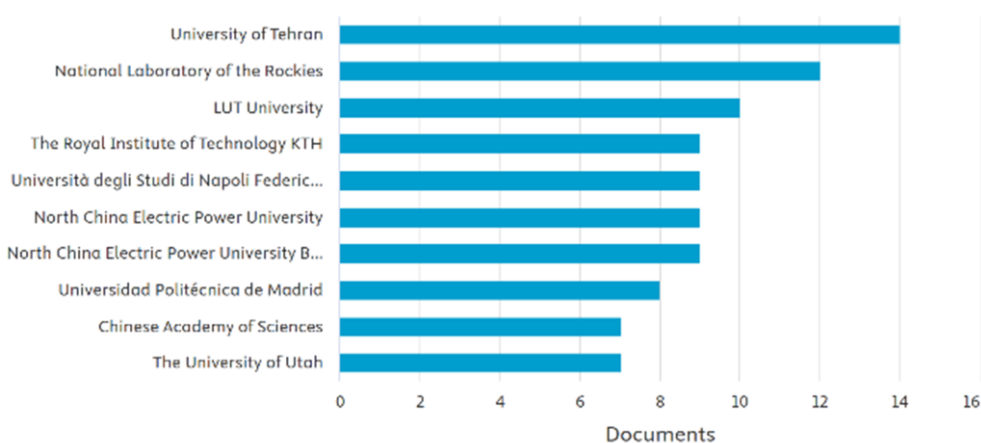
Compare the document counts for up to 15 affiliations.



напрямок 2

### Documents by affiliation

Compare the document counts for up to 15 affiliations.

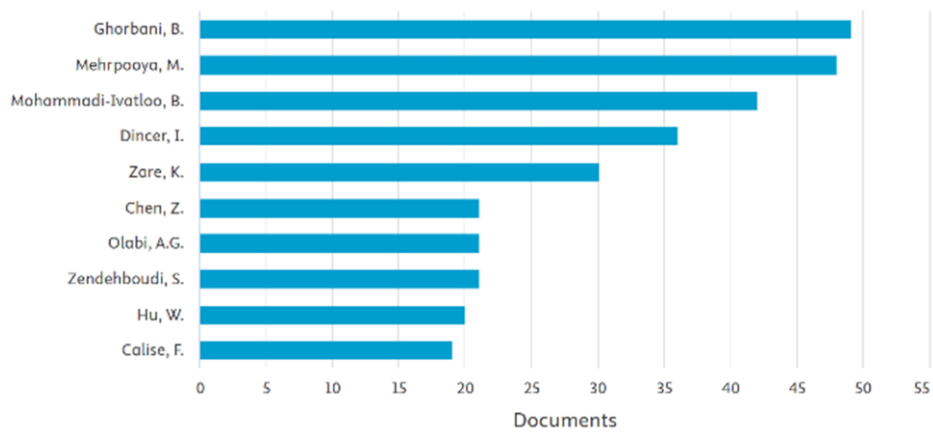


напрямок 3

**Рисунок 2 – Діаграми приналежності публікації до наукових установ по визначених напрямках**

### Documents by author

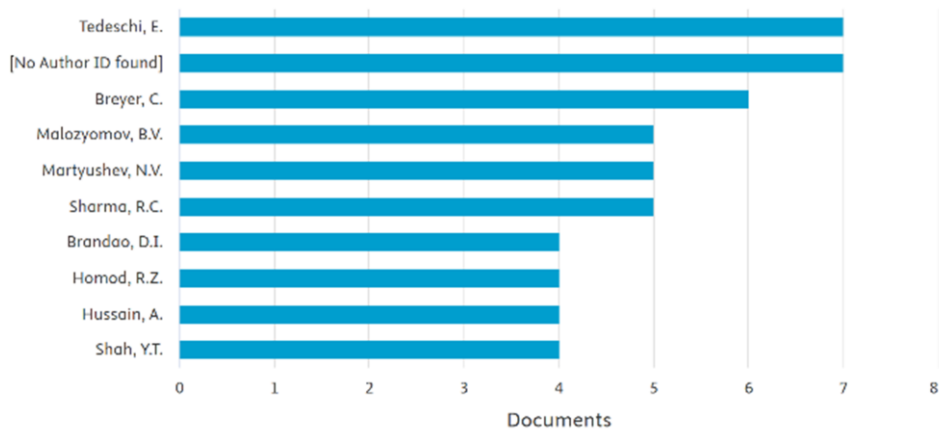
Compare the document counts for up to 15 authors.



напрямок 1

### Documents by author

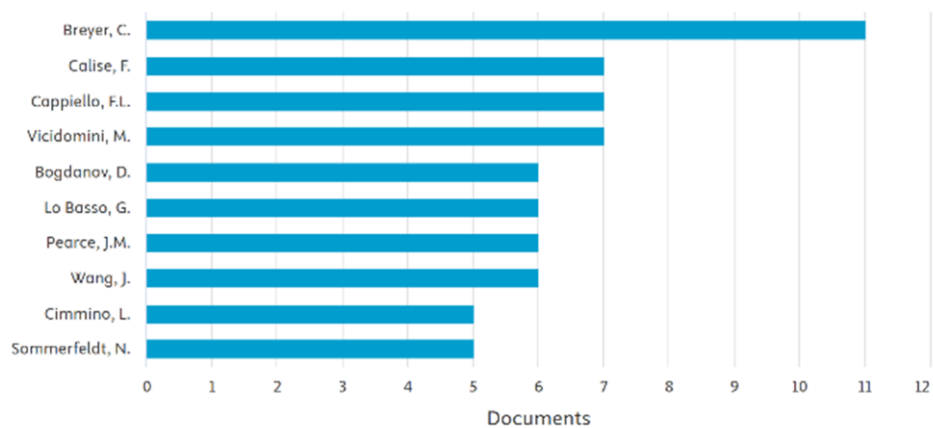
Compare the document counts for up to 15 authors.



напрямок 2

### Documents by author

Compare the document counts for up to 15 authors.



напрямок 3

Рисунок 3 – Діаграма ключових авторів за напрямками дослідження

На рисунках 2 подано розподіл публікацій за науковими установами. У першому напрямку лідирують North China Electric Power University, Islamic Azad University, University of Tehran, Xi'an Jiaotong University та Aalborg University. Це відображає домінування університетів, що спеціалізуються на енергетичному моделюванні, оптимізації та гібридних енергосистемах, із перевагою установ Китаю, Ірану та Данії.

У другому напрямку провідні позиції займають Saint Petersburg Mining University, Eduardo Mondlane University, Islamic Azad University, Southwest Petroleum University, King Fahd University of Petroleum and Minerals та North China Electric Power University. Тут більш виражена участь профільних нафтогазових і гірничих закладів, що свідчить про формування досліджень на перетині енергетики, електротехніки та галузевої інженерії.

Для третього напрямку характерна участь University of Tehran, North China Electric Power University, Islamic Azad University, University of California, National Renewable Energy Laboratory, University of Utah і KTH Royal Institute of Technology. На відміну від другого, тут переважають університети й дослідницькі центри, орієнтовані на техніко-економічний аналіз і системне моделювання.

Загалом North China Electric Power University та Islamic Azad University є активними в кількох напрямках, що підтверджує міждисциплінарний характер досліджень і взаємозв'язок технічних, економічних і системних аспектів впровадження ВДЕ у нафтогазовидобутку.

На рисунках 3 представлено ключових авторів за напрямками.

У першому напрямку вирізняються Bahram Ghorbani, Mehdi Mehrpooya, Behnam Mohammadi-Ivatloo, Kazem Zare та Ibrahim Dincer. Їхні дослідження зосереджені на оптимізації гібридних енергосистем, інтеграції ВДЕ з водневими технологіями та моделюванні мультиенергетичних систем. Зокрема, М. Mehrpooya є співавтором оглядової праці щодо поєднання електролізерів із ВДЕ [7], а спільно з В.

Ghorbani – дослідження термодинамічної та економічної оцінки сонячної енергосистеми [8]. Праця В. Mohammadi-Ivatloo присвячена оптимальному плануванню низьковуглецевих мікромереж [9]. У сукупності ці роботи формують методологічну основу для оптимізації гібридних систем у промисловості.

У другому напрямку спостерігається більш фрагментоване дослідницьке поле. Серед ключових авторів – Elisabetta Tedeschi, Christian Breyer, Guangya Yang, Pierluigi Siano. Їхні роботи охоплюють питання сумісності ВДЕ з обладнанням, якість електроенергії та режими роботи перетворювачів. Зокрема, Е. Tedeschi досліджує застосування накопичувачів енергії для морських платформ [10], J. Jia, G. Yang і А. Н. Nielsen – керування перетворювачами в аварійних режимах [11], а огляд М. Shafiullah та ін. узагальнює виклики інтеграції ФЕС у мережу [12]. Таким чином, напрямок орієнтований на забезпечення надійності та стійкості електроживлення.

У третьому напрямку домінують Christian Breyer, Francesco Calise, Jiangjiang Wang, Gianluigi Lo Basso, Maria Vicidomini та Dmitrii Bogdanov. Тут переважає економічний і системно-аналітичний підхід. Зокрема, С. Breyer досліджує потенціал «зеленого» аміаку на базі гібридних систем [13], J. Wang – оптимальне проектування комбінованих енергосистем [14], а G. Lo Basso – техніко-економічну оцінку водневих рішень [15]. Це підтверджує орієнтацію напрямку на оцінювання ефективності та доцільності впровадження ВДЕ.

Загалом перший напрямок формує методологічну базу, другий – технічну надійність, а третій – економічне обґрунтування впровадження фотоелектричних систем у нафтогазовидобутку.

Для всіх трьох напрямків виконано візуалізацію баз даних у програмі VOSviewer (рис. 4), що дозволило виділити ключові тематичні кластери.

У першому напрямку домінують групи *renewable energy* і *hydrogen production, economic analysis* і *energy efficiency, optimization* і *energy management*. Це свідчить про трансформацію досліджень від локальної



оптимізації до комплексного аналізу мультиенергетичних систем із урахуванням декарбонізації та енергоменеджменту.

У другому напрямку виявлено кластери *renewable energy, optimization* і *machine learning, power electric invertors* і *power quality, electric power transmission, decarbonization*. Особливо показовим є формування зв'язки *power electric invertors – power quality*, що підтверджує зміщення фокусу на вплив ФЕС на режими електроживлення, електромагнітну сумісність і гармонічні спотворення. Наявність кластерів *machine learning* та *optimization* вказує на активне використання інтелектуальних методів керування та діагностики, тоді як *electric power transmission* підкреслює інтеграцію з мережевою інфраструктурою.

У третьому напрямку визначено кластери *solar energy, power generation, hydrogen production, economics*. Це свідчить про поєднання економічного аналізу з генераційними та водневими аспектами, що дозволяє розглядати впровадження ФЕС як елемент системної трансформації енергетики. Водночас відсутність вираженого кластера *power quality* вказує на недостатню інтеграцію цієї проблематики у техніко-економічні дослідження.

Аналіз наукових джерел показав, що більшість досліджень зосереджена на питаннях енергетичної ефективності та економічної доцільності використання ФЕС. Водночас недостатньо уваги приділено впливу інверторних джерел генерації на якість електроенергії в умовах промислових об'єктів із вираженими нелінійними навантаженнями.

### **Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми**

Незважаючи на активний розвиток досліджень у сфері впровадження ФЕС та інших ВДЕ у нафтогазовидобувній галузі, низка важливих аспектів залишається недостатньо опрацьованою як у теоретичному, так і в прикладному вимірі. Передусім, у більшості наукових робіт домінує підхід, орієнтований на техніко-економічну доцільність інтеграції ВДЕ, тоді як параметри якості електроенергії розглядаються фраг-

ментарно або як другорядний фактор. Такий підхід не враховує складної динаміки взаємодії гібридних енергосистем із чутливим технологічним обладнанням нафтогазових об'єктів, що функціонує в умовах змінних навантажень і жорстких вимог до надійності.

Залишається недостатньо дослідженим питання комплексного впливу ФЕС на показники якості електроенергії, зокрема гармонічні спотворення, відхилення напруги та частоти, а також перехідні процеси при зміні режимів генерації. В існуючих роботах відсутній узагальнений підхід до їх кількісного оцінювання з урахуванням специфіки локальних електричних мереж нафтогазових підприємств.

Таким чином, актуальною науковою задачею залишається розроблення комплексного підходу до оцінювання та забезпечення якості електроенергії в умовах інтеграції ФЕС у нафтогазовидобувні енергосистеми, який би враховував взаємозв'язок між режимними параметрами, метрологічною достовірністю вимірювань і показниками надійності функціонування об'єктів.

### **Виклад основного матеріалу**

Концепція переходу від централізованої до децентралізованої моделі виробництва електроенергії базується на розміщенні генеруючих потужностей максимально близько до споживачів. Це зменшує втрати при передачі, підвищує стійкість енергосистеми і дозволяє активніше використовувати ВДЕ. В свою чергу, газовидобувна промисловість може стати одним із елементів такого підходу. По-перше, газові родовища розподілені по різних регіонах країни, причому значна частина видобутку зосереджена у Харківській, Полтавській, Львівській та Івано-Франківській областях. Це означає, що на цих територіях є багато споживачів з приблизно однаковим профілем навантаження, що може сприяти ефективному розміщенню малих і середніх ФЕС. По-друге, процес видобутку і підготовки газу є досить енергоємним. Зокрема технологічний процес передбачає використання газоперекачувальних компресорів, насосів, дегазаторів, установок осушки га-

зу, систем охолодження та інших механічних агрегатів, які потребують електричного приводу. При цьому часткове покриття цих навантажень за рахунок сонячної генерації може суттєво зменшити навантаження на Об'єднану енергетичну систему України, особливо у світлу частину доби, а також підвищити якість електроенергії, оскільки зменшується необхідність різних пусків електричних вузлів від централізованої мережі. Крім того, використання енергії сонця замість дизель-генераторів, які в наявних умовах дефіциту електроенергії досить часто використовуються, дозволить скоротити викиди CO<sub>2</sub> та інших забруднюючих речовин у екосистему.

Для оцінювання потенціалу використання ФЕС на об'єктах газовидобутку першочерговим є аналіз рівня сонячної інсоляції в регіонах їх розташування. За даними Інституту відновлюваної енергетики НАН України [16], середньорічна глобальна горизонтальна інсоляція в Україні становить 1050–1475 кВт·год/м<sup>2</sup>, причому в основних газовидобувних регіонах (Харківська та Полтавська області) – близько 1200–1300 кВт·год/м<sup>2</sup>. Це забезпечує річну генерацію на рівні 1,0–1,3 МВт·год на 1 кВт встановленої потужності ФЕС, що свідчить про доцільність їх застосування для покриття частини енергоспоживання виробничих об'єктів.

Важливим фактором є сезонна нерівномірність генерації: максимальні обсяги виробітку припадають на квітень–вересень, тоді як у зимовий період рівень інсоляції знижується, але залишається достатнім для часткової генерації. Це обґрунтовує ефективність використання ФЕС у складі гібридних систем із накопичувачами енергії або резервними джерелами.

Водночас, для комплексної оцінки доцільності впровадження ФЕС у газовидобувній галузі необхідним є аналіз технологічних процесів і структури електроспоживання на різних етапах виробництва, що дозволяє визначити найбільш ефективні точки інтеграції гібридних енергосистем.

*Буріння свердловин.* На початковій стадії будівництва нових свердловин задіяні потужні бурові установки. Такі устано-

вки мають енергоємні електродвигуни для роторів, насосів промивної рідини та компресори для нагнітання повітря. Енергоспоживання великого бурового майданчика може досягати кількох мегават у пікових режимах. Проте фазове споживання може корелювати з робочим циклом буріння. Максимальні витрати під час активного буріння та зниження в перервах (змінні роботи). У реальних умовах часто використовуються дизель-генератори для автономного живлення, але там де є доступ до мережі – підключаються до загальної електричної мережі. Гібридні ФЕС тут можуть забезпечувати живлення допоміжного навантаження, такого як освітлення, систем контролю буріння, телекомунікацій, невеликих приводів, що суттєво можуть зменшити витрати дизельного палива. Наприклад, 10–30 кВт фотоелектричної генерації разом з акумуляторами може повністю забезпечити нічне освітлення, системи керування, сигналізації та житити побутові житлові приміщення без навантаження генератора. Хоча основний рушійний привід – буровий двигун – вимагає значних потужностей, створення власної генерації для допоміжних систем може знизити загальну енерговитратність процесу буріння. При цьому варто відмітити, що важливою особливістю забезпечення живлення бурових майданчиків є компактність та легкість переміщення обладнання, оскільки дані роботи є тимчасовими та протягом року все обладнання може переміщатись декілька разів. Тому для описаних цілей доцільно використовувати компактні пересувні ФЕС. Перевагами таких систем є їхня мобільність. Протягом декількох годин такі ФЕС можна розмістити на будь якій місцевості. В свою чергу необхідну якість електроенергії в даних системах забезпечити дещо складніше. Це зумовлено тим, що гібридні ФЕС працюватимуть в автономному режимі, а підключене навантаження буде різноманітним від світлодіодних джерел світла (нелінійного навантаження) до невеликих електроприводів із відчутною індуктивно-реактивною складовою, яка із поширенням частотного регулювання додатково зростає. Тому в таких системах

необхідно ретельно слідкувати за рівнем навантаження не допускати пониження коефіцієнта потужності нижче встановленого виробником рівня (в більшості випадків не нижче 0,8).

*Підготовка (очищення та осушення) газу.* Після видобутку сирого газу його необхідно очистити і осушити перед транспортуванням. Для цього використовують прості установки підготовки газу або комплекси. В такі установки входять сепаратори для відділення рідини, адсорбери чи абсорбери для осушки, підігрівачі тощо. Обладнання установок підготовки газу працює зазвичай на електроприводах і споживає від 20-30 кВт до 100-200 кВт залежно від продуктивності установки та складності технологічного процесу. Наприклад, середнє енергоспоживання однієї типової УКПГ може бути декілька 100-200 МВт·год в рік. В свою чергу для забезпечення даних потреб можна використати гібридну ФЕС. Встановити ФЕС на цих об'єктах можна як на дахах адміністративних будівель, так і на вільному майданчику. При цьому не потрібно великих вільних ділянок, оскільки в середньому для забезпечення даної потреби достатньо 30-40 кВт встановленої потужності. Однак важливою в цьому випадку є система накопичення енергії, оскільки технологічний процес є безперервним, а ФЕС активно генерує електроенергію лише у світлу частину доби, то потужність системи накопичення енергії має забезпечувати безперервне живлення протягом 10-12 годин. Тобто для типової УКПГ ємність акумуляторів має бути не нижче 100-120 кВт·год.

У світовій практиці відомі приклади, коли установки підготовки газу в поєднанні з комплектом акумуляторів працюють у пікові години з мінімальною підтримкою центральної мережі (наприклад, частка відновлюваної генерації на таких об'єктах досягає 50–70%) [17]. Утім варто врахувати, що заходи з інтеграції ФЕС треба ретельно планувати. Необхідні інвертори та системи стабілізації, аби уникнути перенапруг і стрибків частоти при одночасному підключенні/відключенні великих приладів. Важливим моментом є розрахунок пу-

скових струмів, оскільки технологічне обладнання (електроприводи) в переважній більшості мають 2-3 кратні значення пускових струмів, порівняно з номінальними. Тому при проектуванні ФЕС необхідно забезпечити не лише номінальне навантаження, а й максимальні (пускові струми).

Враховуючи, що в Україні газотранспортна система спроектована за централізованою схемою. Тобто газ із свердловин транспортується до «кущових» локальних УПГ (УКПГ) після чого потрапляє у централізовані потужні компресорні станції де підвищується тиск та подається в Об'єднану газотранспортну мережу України. То зрозуміло, що найбільш поширеними є саме установки підготовки газу. Із відкритих джерел відомо, що в Україні в середньому функціонує від 150 до 200 таких об'єктів. При чому вони розміщені у в основному у 4 областях, з яких частина є енергодефіцитними. Відповідно якщо припустити, що на таких об'єктах можна забезпечити власну енергогенерацію, то загальне навантаження на об'єднану енергетичну мережу можна знизитись в середньому на 8,75 МВт. Дане значення є наближеним і базується на усереднених значеннях. Проте навіть при цьому дана цифра співрозмірна із генерацією 6 невеликих когенераційних установок, які можуть забезпечити 4000-4500 домогосподарств (невеличке містечко).

*Транспортування газу (в рамках газовидобутку до ОГТС-У).* Ключовим споживачем енергії на даному етапі технологічного процесу є компресорні станції газопроводів. Потужність однієї дотискної компресорної станції (ДКС) може сягати десятків мегават. Це забезпечує транспортування великого обсягу газу (від 5 до 100 млн м<sup>3</sup> на добу). Для забезпечення таких об'ємів потужності зазвичай використовують газовий привід, який є економічно доцільнішим для газовидобувних компаній. Зокрема великого поширення на ДКС мають газопоршневі та газотурбінні приводи, які приводять в рух компресорні установки. Проте також використовуються і електричні приводи, які особливо поширені за кордоном. В будь якому випадку спожив-

вання електричної енергії на таких об'єктах є значним, оскільки окрім компресорних установок виробничі об'єкти включають велику кількість електроприводів для систем підігріву та охолодження, вентиляції, управління та вимірювання. Таким чином реальне споживання за годину може сягати від сотень кіловат до декількох мегават.

В свою чергу на виробничих об'єктах такого типу переважно відсутні великі вільні площі, де можна встановити потужні ФЕС. Тому без відведення додаткових земельних ділянок, що може бути проблематичним забезпечити повну енергонезалежність складно. Проте покрити частину власного споживання своєю генерацією цілком реально встановленням масиву фотоелектричних модулів потужністю 100-200 кВт. Такі потужності можуть покрити потребу в електроенергії на 10-20%. А встановлення систем зберігання енергії забезпечить власною електроенергією і вночі. Відповідно запропонованими станціями можна заживити допоміжні систем ДКС: системи вентиляції компресорних станцій, циркуляційні насоси, системи керування, офісні приміщення та освітлення виробничого майданчика. Додатково гібридні ФЕС дозволяють знизити потребу у використанні бензинових (дизельних) генераторах, які споживають суттєві об'єми палива та є суттєво дорожчими. А для аварійних систем та систем керування дані установки дозволяють суттєво підвищити надійність, оскільки здійснюють плавний перехід між джерелами живлення без великих затримок. Таким чином використання ФЕС для часткового покриття потреби в електроенергії на таких об'єктах дозволить знизити навантаження на загальну мережу ще близько на 6 МВт. В свою чергу, для об'єктів із приводом від електродвигунів набагато доцільнішим є все ж встановлення поруч потужних ФЕС, які дозволять покрити всю потребу в електроенергії у денний період та за потреби частину у нічний період. В такому разі зниження потреби в електроенергії від одного об'єкта може скласти декілька мегават. Перевагою такого підходу є суттєве зниження навантаження на

розподільчі мережі, оскільки генерація розміщується безпосередньо у місці споживання. Також через те, що основна генерація електроенергії ФЕС здійснюється в день і вночі все ж необхідно використовувати енергію з ОЕС-У то вирівнюється добовий графік споживання.

Особливе значення інтеграція ФЕС має для компресорних станцій (КС) та дотискних компресорних станцій (ДКС). Основними споживачами тут є системи автоматизації, контрольно-вимірювальні прилади (КВПіА) та допоміжні насосні агрегати. Впровадження гібридних систем із накопичувачами енергії (BESS) ємністю понад 200 кВт·год дозволяє нівелювати короточасні просідання напруги, які є критичними для спрацювання систем аварійного захисту. Крім того, використання сонячної генерації для живлення власних потреб КС дозволяє зменшити обсяги спалювання паливного газу на приводних агрегатах, що покращує екологічні показники підприємства.

Окрім розглянутих трьох ключових потенційних місць встановлення ФЕС, дані системи також використовують і локально. До прикладу для керування системами вприскування метанолу та ПАР на свердловинах. Або для живлення віддалених об'єктів у гірській місцевості. Проте в розрізі децентралізації дані системи не мають суттєвого впливу.

Проведений аналіз показав, що інтеграція ФЕС у структуру електропостачання об'єктів газовидобутку призводить до суттєвої трансформації режимів роботи локальних енергосистем. Встановлено подвійний ефект їх впровадження: з одного боку, забезпечується підвищення енергетичної автономності, зниження навантаження на централізовані мережі та скорочення використання дизельної генерації; з іншого – інверторні джерела формують додаткові гармонічні спотворення, коливання напруги та ризики нестабільності режимів.

Доведено, що основними факторами негативного впливу є висока частка перетворювальної техніки, нерівномірність сонячної генерації та відсутність належних засобів фільтрації і регулювання. При цьо-

му різке зростання частки ФЕС без відповідної компенсації може призводити до перевищення допустимих рівнів гармонік і відхилень напруги. Водночас встановлено, що застосування гібридних мікромереж із системами накопичення енергії, програмованими інверторами та пристроями типу STATCOM/D-STATCOM дозволяє ефективно згладжувати динамічні коливання та забезпечувати нормативні показники якості електроенергії [9, 18].

Обґрунтовано, що максимальна ефективність ФЕС досягається за умов їх інтеграції з накопичувачами енергії та узгодження графіків генерації зі споживанням електроенергії. Для регіонів активного газовидобутку характерний рівень генерації 1–1,3 МВт·год/кВт на рік, що дозволяє покривати значну частку власних потреб об'єктів, особливо у денні періоди навантаження. Це сприяє зменшенню втрат у мережі, підвищенню стабільності ОЕС та реалізації принципів децентралізованої генерації.

Встановлено, що забезпечення надійності роботи технологічного обладнання (компресорного, насосного, перетворювального) потребує обов'язкового урахування показників якості електроенергії, зокрема гармонічного складу, відхилень напруги, частоти та перехідних процесів. У порівнянні з традиційними системами електроживлення, гібридні енергосистеми вимагають впровадження активних фільтрів гармонік, систем компенсації реактивної потужності та інтелектуальних алгоритмів керування.

Інтеграція гібридних ФЕС у локальні електричні мережі газовидобувних підприємств змінює характер електромагнітних процесів у вузлах навантаження [14, 17]. Основним елементом впливу є статичні перетворювачі (інвертори), які, з одного боку, забезпечують гнучке керування потоками енергії, а з іншого – є джерелами нелінійних спотворень.

1. *Стабілізація рівнів напруги в розподільній мережі.* Для віддалених об'єктів газовидобутку (наприклад, окремих свердловин), характерною проблемою є значне падіння напруги в кінці довгих ліній 0,4–

10 кВ. Впровадження ФЕС дозволяє локально компенсувати дефіцит потужності. Зміна напруги у вузлі підключення ФЕС визначається за наближеним виразом:

$$\Delta U \approx \frac{P_{PV} \cdot R + Q_{PV} \cdot X}{U_{nom}}, \quad (1)$$

де  $P_{PV}$  та  $Q_{PV}$  – активна та реактивна потужність, що генерується ФЕС;

$R$  та  $X$  – активний та реактивний опір лінії зв'язку з мережею;

$U_{nom}$  – номінальна напруга мережі.

Ця формула дозволяє на етапі проектування визначити необхідну потужність інвертора та його здатність компенсувати падіння напруги без заміни кабельних ліній.

Гібридні інвертори з функцією Volt-Var Control здатні регулювати  $Q_{PV}$ , підтримуючи відхилення напруги ( $\delta U_y$ ) для чутливої автоматики УКПГ у межах, встановлених ДСТУ EN 50160:2023 «Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності (EN 50160:2022, IDT)» ( $\pm 10\%$ ):

$$\delta U_y = \frac{U_y - U_{nom}}{U_{nom}} \cdot 100\%. \quad (2)$$

2. *Гармонійні спотворення струму та напруги.* Використання широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) в інверторах призводить до виникнення вищих гармонік. Основним показником оцінки є сумарний коефіцієнт гармонійних спотворень напруги:

$$THD_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} U_n^2}}{U_1} \cdot 100\%. \quad (3)$$

де  $U_n$  – діюче значення  $n$ -ї гармонійної складової напруги,

$U_1$  – діюче значення напруги основної частоти (50 Гц).

Для об'єктів газовидобутку, де експлуатуються чутливі системи телеметрії та КВПіА, критично важливо підтримувати  $THD_U < 5\%$ . Це досягається шляхом застосування LCL-фільтрів на виході інверторів. Резонансна частота такого фільтра розраховується як:

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1 \cdot L_2 \cdot C}}, \quad (4)$$

де  $L_1, L_2$  – індуктивності інверторного та мережевого боку,

$C$  – ємність фільтра. Правильний розрахунок  $f_{res}$  дозволяє відсікати високочастотні перешкоди, що виникають при комутації ключів інвертора (зазвичай 2–16 кГц), тим самим дає уникнути резонансних явищ у мережі підприємства, які можуть призвести до перегріву трансформаторів та виходу з ладу конденсаторних установок компенсації реактивної потужності.

3. *Корекція коефіцієнта потужності.* Газовидобувне обладнання (насоси, компресори) має індуктивний характер навантаження, що призводить до низького коефіцієнта потужності. Гібридна ФЕС може виступати як статичний компенсатор реактивної потужності. Повна потужність системи описується рівнянням:

$$S = \sqrt{(P_{load} - P_{PV})^2 + (Q_{load} \pm Q_{PV})^2}, \quad (5)$$

де  $P_{load}$  – сумарна активна потужність, що споживається обладнанням,

$P_{PV}$  – потужність, що генерується фотоелектричною системою,

$Q_{load}$  – реактивна потужність,

$Q_{PV}$  – генеруюча реактивну потужність.

Використання інтелектуальних систем керування дозволяє мінімізувати споживання реактивної потужності з мережі, що знижує втрати енергії в трансформаторах та кабельних лініях.

Коефіцієнт потужності є одним із ключових показників ефективності електроспоживання. Він визначає співвідношення між активною та повною потужністю в системі:

$$\cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}. \quad (6)$$

Зменшення  $\cos \varphi$  у сценаріях з високою часткою фотоелектричної генерації пояснюється зростанням реактивної складової, що виникає внаслідок роботи інверторів та нелінійних навантажень.

4. *Вплив на перехідні процеси.* Газовидобувні промисли характеризуються наявністю потужних асинхронних двигунів (насоси, компресори), пуск яких супроводжується кидками струму. Гібридна ФЕС із накопичувачем енергії (BESS) виступає як джерело «віртуальної інерції». Швидкість зміни частоти у локальній мережі при різкій зміні навантаження описується рівнянням коливань:

$$\frac{df}{dt} = \frac{f_0}{2H} \cdot \frac{P_{gen} - P_{load}}{S_n}, \quad (7)$$

де  $\frac{df}{dt}$  – швидкість зміни частоти,

$f_0$  – номінальна частота мережі (50 Гц),

$H$  – інерційна константа системи,

$P_{gen}$  – поточна сумарна генерація (мережа + ФЕС + акумулятор),

$P_{load}$  – потужність навантаження,

$S_n$  – номінальна повна потужність енергосистеми вузла.

Використання BESS із алгоритмом Virtual Inertia дозволяє мінімізувати показник Rate of Change of Frequency. Це запобігає хибному спрацюванню систем релейного захисту та автоматики при короткочасних перевантаженнях, що є критичним для безперервності видобутку. Висока швидкість реакції інвертора (мілісекунди) дозволяє підтримувати стабільність частоти значно ефективніше, ніж традиційні дизель-генератори.

Ключовим елементом запропонованого підходу є інтегральний показник якості електроенергії, який забезпечує комплексне оцінювання режимів функціонування електричної мережі з урахуванням відхилення напруги, гармонічних спотворень та коефіцієнта потужності:

$$K_{PQ} = k_1 \cdot \Delta U + k_2 \cdot THD_U + k_3 \cdot (1 - \cos \varphi), \quad (8)$$

де  $\Delta U$  – відхилення напруги;

$THD_U$  – коефіцієнт гармонічних спотворень;

$\cos \varphi$  – коефіцієнт потужності;

$k_i$  – вагові коефіцієнти (визначаються експертно або через оптимізацію).

Для оцінювання впливу ФЕС на параметри електричної мережі газовидобувного об'єкта було розроблено математичну модель, що базується на інтегральному показнику якості електроенергії  $K_{PQ}$ . Моделювання виконано для трьох сценаріїв функціонування системи: без використання ФЕС, із підключенням ФЕС без накопичувача енергії та із застосуванням гібридної системи (ФЕС + BESS).

Результати показали, що підключення ФЕС без додаткових засобів стабілізації призводить до погіршення якості електроенергії через зростання гармонічних спотворень та коливань напруги. Натомість застосування накопичувачів енергії та керування реактивною потужністю інвертора дозволяє забезпечити стабілізацію параметрів мережі та зменшити втрати електроенергії.

Отримані результати підтверджують доцільність використання гібридних енергетичних систем у газовидобувній галузі.

## Висновки

У роботі досліджено особливості інтеграції ФЕС у газовидобувній галузі. Встановлено, що використання ФЕС дозволяє суттєво підвищити енергетичну автономність об'єктів, однак супроводжується виникненням проблем якості електроенергії. Запропонована модель оцінювання дозволяє кількісно визначати вплив фотоелектричної генерації на параметри електричних мереж. Отримані результати можуть бути використані при розробленні систем керування та оптимізації режимів роботи гібридних енергетичних систем. Подальші дослідження доцільно спрямувати на розроблення інтелектуальних систем керування та інтеграцію накопичувачів енергії.

## Подяки

Відсутні.

## Конфлікт інтересів

Відсутній.

## Список використаних джерел

1. International Energy Agency. Empowering Ukraine through a decentralised electricity system: a roadmap for Ukraine's increased use of distributed energy resources towards 2030. Paris : IEA, 2024. 112 с.
2. Міністерство енергетики України. Децентралізація енергетики: Міненерго розробляє потрібні інструменти для швидкого переходу. URL: <https://mev.gov.ua/novyna/detsentralizatsiya-enerhetyky-minenerho-rozroblyaye-potribni-instrumenty-dlya-shvydkoho>
3. Міністерство економіки України. Проєкт плану відновлення та розвитку енергетичної системи України. URL: <https://me.gov.ua/download/ba5a318a-2e42-44ca-bc9e-0214bbd412f8/file.pdf>
4. Міністерство енергетики України. Мікромережі: технічні рішення, регуляторні аспекти та перспективи для України. Київ : Міненерго, 2025. 48 с. URL: [https://www.mev.gov.ua/sites/default/files/2025-10/mikromerezhi-ua\\_0.pdf](https://www.mev.gov.ua/sites/default/files/2025-10/mikromerezhi-ua_0.pdf)
5. АТ «Укргазвидобування». Видобуток природного газу в Україні. URL: <https://ugv.com.ua/uk/page/vidobutok>
6. Saxena V., Sharma A., Verma P. Navigating the complexities of distributed generation: integration, challenges, and solutions. *Energy Reports*. 2024. Vol. 12. P. 3302–3322. URL: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2024.09.017>
7. Mohammadi A., Mehrpooya M. A comprehensive review on coupling different types of electrolyzer to renewable energy sources. *Energy*. 2018. Vol. 158. P. 632–655. URL: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.06.073>
8. Mehrpooya M., Ghorbani B., Hosseini S. S. Thermodynamic and economic evaluation of a novel concentrated solar power system integrated with absorption refrigeration and desalination cycles. *Energy Conversion and Management*. 2018. Vol. 175. P. 337–356. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.08.109>

9. Mansour-Saatloo A., Ebadi R., Mirzaei M. A., Zare K., Mohammadi-Ivatloo B., Marzband M., Anvari-Moghaddam A. Multi-objective IGDT-based scheduling of low-carbon multi-energy microgrids integrated with hydrogen refueling stations and electric vehicle parking lots. *Sustainable Cities and Society*. 2021. Vol. 74. Art. 103197. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103197>
10. Adeyemo A. A., Alves E., Marra F., Brandao D., Tedeschi E. Suitability assessment of high-power energy storage technologies for offshore oil and gas platforms: a life cycle cost perspective. *Journal of Energy Storage*. 2023. Vol. 61. Art. 106643. URL: <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.106643>
11. Jia J., Yang G., Nielsen A. H. A review on grid-connected converter control for short-circuit power provision under grid unbalanced faults. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2018. Vol. 33, No. 2. P. 649–661. URL: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2017.2682164>
12. Shafiullah M., Ahmed S. D., Al-Sulaiman F. A. Grid integration challenges and solution strategies for solar PV systems. A review. *IEEE Access*. 2022. Vol. 10. P. 52233–52257. URL: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3174555>
13. Fasihi M., Weiss R., Savolainen J., Breyer C. Global potential of green ammonia based on hybrid PV-wind power plants. *Applied Energy*. 2021. Vol. 294. Art. 116170. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.125506>
14. Wang J., Qi X., Ren F., Zhang G., Wang J. Optimal design of hybrid combined cooling, heating and power systems considering the uncertainties of load demands and renewable energy sources. *Journal of Cleaner Production*. 2021. Vol. 281. Art. 125357. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125357>
15. De Santoli L., Lo Basso G., Bruschi D. A small scale H2NG production plant in Italy: techno-economic feasibility analysis and costs associated with carbon avoidance. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2014. Vol. 39, No. 12. P. 6497–6517. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.02.003>
16. ІВЕ НАН України. Атлас сонячної енергії України / за ред. В. В. Міщенко. Київ : Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 2020. 88 с. URL: <https://www.ive.org.ua/wp-content/uploads/atlas.pdf>
17. Liu J., Wang Y., Chen H. Application of the distributed photovoltaic systems towards oil-gas field and its power load coverage in China. *Cleaner Energy Systems*. 2025. Vol. 12. Art. 102678. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cles.2025.100198>
18. Balakishan P., Chidambaram I. A., Manikandan M. Improvement of power quality in grid-connected hybrid system with power monitoring and control based on internet of things approach. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2022. Vol. 4. P. 44–50. URL: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2022.4.06>

## References

1. International Energy Agency. (2024). *Empowering Ukraine through a decentralised electricity system: A roadmap for Ukraine's increased use of distributed energy resources towards 2030*. <https://www.iea.org>
2. Ministry of Energy of Ukraine. (2026). *Detsentralizatsiia enerhetyky: Minenerho rozroblyaiie potribni instrumenty dlia shvydkoho perekhodu* [Decentralization of energy: Ministry of Energy develops necessary tools for a rapid transition]. <https://mev.gov.ua/novyna/detsentralizatsiya-enerhetyky-minenerho-rozroblyaye-potribni-instrumenty-dlya-shvydkoho> (in Ukrainian)
3. Ministry of Economy of Ukraine. (2026). *Proiekt planu vidnovlennia ta rozvytku enerhetychnoi systemy Ukrainy* [Draft plan for the restoration and development of the energy system of Ukraine]. <https://me.gov.ua/download/ba5a318a-2e42-44ca-bc9e-0214bbd412f8/file.pdf> (in Ukrainian)

4. Ministry of Energy of Ukraine. (2025). *Mikromerezhi: tekhnichni rishennia, rehuliatorni aspekty ta perspektyvy dlia Ukrainy* [Microgrids: Technical solutions, regulatory aspects and prospects for Ukraine]. [https://www.mev.gov.ua/sites/default/files/2025-10/mikromerezhi-ua\\_0.pdf](https://www.mev.gov.ua/sites/default/files/2025-10/mikromerezhi-ua_0.pdf) (in Ukrainian)
5. JSC "Ukurgazvydobuvannya". (2026). *Vydobutok pryrodnoho hazu v Ukraini* [Natural gas production in Ukraine]. <https://ugv.com.ua/uk/page/vidobutok> (in Ukrainian)
6. Saxena, V., Sharma, A., & Verma, P. (2024). Navigating the complexities of distributed generation: Integration, challenges, and solutions. *Energy Reports*, 12, 3302–3322. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2024.09.017>
7. Mohammadi, A., & Mehrpooya, M. (2018). A comprehensive review on coupling different types of electrolyzer to renewable energy sources. *Energy*, 158, 632–655. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.06.073>
8. Mehrpooya, M., Ghorbani, B., & Hosseini, S. S. (2018). Thermodynamic and economic evaluation of a novel concentrated solar power system integrated with absorption refrigeration and desalination cycles. *Energy Conversion and Management*, 175, 337–356. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.08.109>
9. Mansour-Saatloo, A., Ebadi, R., Mirzaei, M. A., Zare, K., Mohammadi-Ivatloo, B., Marzband, M., & Anvari-Moghaddam, A. (2021). Multi-objective IGDT-based scheduling of low-carbon multi-energy microgrids integrated with hydrogen refueling stations and electric vehicle parking lots. *Sustainable Cities and Society*, 74, Article 103197. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103197>
10. Adeyemo, A. A., Alves, E., Marra, F., Brandao, D., & Tedeschi, E. (2023). Suitability assessment of high-power energy storage technologies for offshore oil and gas platforms: A life cycle cost perspective. *Journal of Energy Storage*, 61, Article 106643. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.106643>
11. Jia, J., Yang, G., & Nielsen, A. H. (2018). A review on grid-connected converter control for short-circuit power provision under grid unbalanced faults. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 33(2), 649–661. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2017.2682164>
12. Shafiullah, M., Ahmed, S. D., & Al-Sulaiman, F. A. (2022). Grid integration challenges and solution strategies for solar PV systems: A review. *IEEE Access*, 10, 52233–52257. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3174555>
13. Fasihi, M., Weiss, R., Savolainen, J., & Breyer, C. (2021). Global potential of green ammonia based on hybrid PV-wind power plants. *Applied Energy*, 294, Article 116170. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.125506>
14. Wang, J., Qi, X., Ren, F., Zhang, G., & Wang, J. (2021). Optimal design of hybrid combined cooling, heating and power systems considering the uncertainties of load demands and renewable energy sources. *Journal of Cleaner Production*, 281, Article 125357. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125357>
15. De Santoli, L., Lo Basso, G., & Bruschi, D. (2014). A small scale H2NG production plant in Italy: Techno-economic feasibility analysis and costs associated with carbon avoidance. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(12), 6497–6517. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.02.003>
16. Institute of Renewable Energy of the NAS of Ukraine. (2020). *Atlas soniachnoi enerhii Ukrainy* [Solar energy atlas of Ukraine] (V. V. Mishchenko, Ed.). <https://www.ive.org.ua/wp-content/uploads/atlas.pdf> (in Ukrainian)
17. Liu, J., Wang, Y., & Chen, H. (2025). Application of the distributed photovoltaic systems towards oil-gas field and its power load coverage in China. *Cleaner Energy Systems*, 12, Article 100198. <https://doi.org/10.1016/j.cles.2025.100198>
18. Balakishan, P., Chidambaram, I. A., & Manikandan, M. (2022). Improvement of power quality in grid-connected hybrid system with power monitoring and control based on internet of things approach. *Electrical Engineering & Electromechanics*, (4), 44–50. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2022.4.06>

## **INTEGRATION OF HYBRID PHOTOVOLTAIC SYSTEMS IN THE GAS PRODUCTION INDUSTRY AND ASSESSMENT OF THEIR IMPACT ON POWER QUALITY**

### **Vashchyshak I. R.**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor  
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas  
76019, Karpatska St., 15, Ivano-Frankivsk, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0002-9078-6726>  
e-mail: iryna.vashchyshak@nung.edu.ua

### **Krynytskyi O. S.**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor  
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas  
76019, Karpatska St., 15, Ivano-Frankivsk, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0003-2338-8661>  
e-mail: oleksandr.krynytskyi@nung.edu.ua

### **Raiter P. M.**

Doctor of Technical Sciences, Professor  
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas  
76019, Karpatska St., 15, Ivano-Frankivsk, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0002-3437-2844>  
e-mail: petro.raiter@nung.edu.ua

### **Serediuk O. Ye.**

Doctor of Technical Sciences, Professor  
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas  
76019, Karpatska St., 15, Ivano-Frankivsk, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0002-8539-2693>  
e-mail: orest.serediuk@nung.edu.ua

**Abstract.** This article examines the specifics of integrating photovoltaic systems (PV systems) into the energy infrastructure of facilities in the gas production industry, taking into account their impact on power quality indicators. The relevance of this work stems from the need to improve energy efficiency, ensure the reliability of electricity supply, and reduce dependence on centralized energy sources amid the growing share of renewable energy sources (RES). It has been established that the current stage of PPS development in industry is characterized by a transition from local use to the implementation of hybrid energy systems operating in autonomous or weakly grid-connected modes. Particular attention is paid to the analysis of power quality parameters, specifically harmonic distortions, voltage and frequency deviations, as well as the impact of nonlinear and reactive loads characteristic of the technological equipment at gas production facilities. It is demonstrated that ignoring these factors leads to a decrease in the stability of electrical grid operating modes, increased power losses, and a higher risk of equipment failures. It has been established that mobile and stationary solar power plants used in field conditions are characterized by increased requirements for controlling the power factor and the harmonic composition of currents and voltages. Based on an analysis of Ukraine's climatic conditions, the potential for solar energy utilization has been determined in gas-producing regions, specifically in the Kharkiv and Poltava regions, where the average annual global horizontal insolation is 1,200–1,300 kWh/m<sup>2</sup>. It has been shown that even relatively small-scale solar power plants are capable of meeting a significant portion of the energy consumption of individual industrial facilities. The practical significance of this work lies in the development of a comprehensive approach to the integration of solar power plants, which involves a combination of technical and economic analysis, optimization of operating modes, and mandatory metrological assessment of power quality. The proposed approach allows for improving the reliability of power systems, minimizing the negative impact of RES on grid parameters, and ensuring the effective use of renewable energy sources in industrial operations.

**Keywords:** renewable energy sources, decentralized generation, photovoltaics, harmonic distortion, parameters of electrical networks, quality indicator.