

ПІДХОДИ ДО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТІЙКОСТІ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ
В ПРОЦЕСІ ІНТЕГРАЦІЇ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ

Ялова А.М.

канд. техн. наук, доцент, Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0926-542X>, e-mail: al.yalovaya@knu.edu.ua;

Бондар Н.В.

ст. викладач, Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8713-265X>, e-mail: bondar_nv@knu.edu.ua;

Яловий О.О.

аспірант, Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-1356-2987>, e-mail: yalovoy2001@gmail.com

Мета дослідження. Дослідження різних підходів до зменшення впливу відновлюваних джерел енергії на стійкість енергетичної системи та визначення оптимальної комбінації традиційних та відновлюваних джерел для забезпечення стабільного та надійного енергопостачання. Оцінка ефективності різних підходів до мінімізації впливу відновлюваних джерел енергії на стабільність енергомережі. **Матеріали і методи.** Методи аналізу власних значень та моделювання перехідних процесів. Використовувалися дані системного оператора «Укренерго»: графіки навантаження енергосистеми (погодинні, добові, сезонні). Використовувалися дані Українського гідрометцентру за 2023-2024 роки для моделювання вироблення ВДЕ: дані про сонячну радіацію (погодинні, добові); дані про швидкість вітру (погодинні, добові). Використовувалися технічні паспорти сонячних панелей та вітрових турбін, що встановлені в Україні. Для геоінформаційного аналізу використовувалась програма QGIS. У дослідженні використано теорію штучних нейронних мереж, методи оптимізації на базі лінійного програмування й логічних продукційних правил, а також методи оцінки й регулювання усталених режимів роботи системи з врахуванням енергетичного накопичувача. **Результати.** Наукова новизна полягає у розробці інноваційного методу оцінки зниження впливу відновлюваних джерел енергії на стійкість енергосистеми. Доведено доцільність використання штучних нейронних мереж для прогнозування виробітку вітрової та сонячної енергії, а також оптимізації структури та параметрів моделі задля підвищення точності прогнозу. Визначено оптимальне поєднання традиційних та відновлюваних джерел енергії для забезпечення стійкої та надійної роботи енергосистеми. **Практичне значення.** На основі експериментальних та теоретичних досліджень надано конкретні рекомендації та рішення, спрямовані на забезпечення стійкості енергосистеми при інтеграції відновлюваних джерел енергії, включаючи оптимізацію управління, використання нових технологій та розвиток інфраструктури.

Ключові слова: відновлювані джерела енергії, генерація, прогноз, сонячна енергія, вітроенергетика.

Постановка проблеми

Згідно з дослідженнями Міжнародного агентства з відновлюваних джерел енергії (IRENA), Україна має найбільший технічний потенціал для розвитку відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) серед країн Південно-Східної Європи. Це означає, що Україна має значні природні ресурси, які можна використовувати для виробництва енергії з відновлюваних джерел. На сьогоднішній день існує значний обсяг наукових досліджень, присвячених проблемам інтеграції відновлюваних джерел енергії та їхньому впливу на стійкість енергосистем. Ключовим напрямком є розробка оптимальних режимів роботи змішаних енергетичних систем, що поєднують відновлювані та класичні джерела енергії, з урахуванням економічної ефективності, екологічної безпеки та геополітичних ризиків. Дослідження також охоплюють широкий спектр економічних та соціальних наслідків, пов'язаних з переходом на відновлювані джерела енергії. Зокрема, проводяться детальні аналізи витрат на інвестування в ВДЕ, оцінка ефективності їхнього використання, а також досліджуються питання впливу цього переходу на ринок праці, якість життя населення, регіональний розвиток та енергетичну безпеку країни. Згідно з «Національним планом дій з відновлюваної енергетики на період до 2030 року» до

війни Україна мала потужну галузь відновлюваної енергетики, з мільярдними інвестиціями. Однак окупація значної частини територій призвела до втрати чверті потужностей ВДЕ. Попри це, галузь продовжує працювати, забезпечуючи значну частку електроенергії, а також активно розвивається, особливо в сегменті сонячних електростанцій. Загалом протягом 2022-2023 років в Україні введено понад 650 МВт нових потужностей відновлюваної енергетики, з яких: 371 МВт – сонячні електростанції (з яких 287 МВт приватними домогосподарствами); 227 МВт – вітрові електростанції; 50 МВт – об'єкти біоенергетики (біомаса та біогаз); 1 МВт – малі гідроелектростанції [1]. Енергетична компанія ДТЕК «Дніпровські електромережі» за 2024 рік підключила до своїх мереж сім об'єктів «зеленої» генерації. Їхня загальна потужність здатна забезпечити електроенергією приблизно десять тисяч будинків. Європейський банк реконструкції та розвитку (ЄБРР) створює спільне підприємство з відновлюваної енергетики з GOLDBECK SOLAR Group для України, яке має на меті розвиток до 500 МВт сонячних фотоелектричних проєктів протягом наступних 3-5 років. ЄБРР надає кредит у розмірі 62 мільйони євро для посилення енергетичної стійкості України шляхом підтримки української енергетичної групи GNG (ГалНафтоГаз) у

будівництві та експлуатації двох вітряних електростанцій в Україні загальною потужністю 147 МВт. Під час Конференції з відновлення України 2024 року в Берліні було підписано понад 100 міжнародних угод, серед яких важливе місце займають домовленості щодо енергетичного сектору. Зокрема, було укладено меморандуми з провідними компаніями, які передбачають розвиток децентралізованого виробництва електроенергії, збільшення використання ВДЕ, впровадження енергоефективних технологій, будівництво «розумних» мереж та відновлення гідроелектростанцій. Завдяки співпраці міжнародних донорів з Міністерством відновлення, Комітетом Верховної Ради України з енергетики та ЖКП, а також НКРЕКП, у 32 містах України встановлюються когенераційні установки для одночасного виробництва електро- та теплової енергії. У 2024 році вже було підключено 25 з 91 доставлених установок. Загалом, на той самий період, в Україні налічувалося близько 150 газопоршневих та газотурбінних установок. Також, «Укрзалізниця» створює компанію «УЗ Енерго» для будівництва нових енергетичних потужностей, здатних забезпечити як власні потреби, так і потреби споживачів. Компанія планує звести десятки газогенераторних установок загальною потужністю до 250 МВт, з яких перші 10 МВт мають бути введені в експлуатацію до початку зими. У зв'язку з цим проблема забезпечення стійкості енергосистеми при інтеграції відновлюваних джерел енергії залишається актуальним.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Питаннями щодо загальних вимог до роботи вітрових та сонячних електростанцій в ЕЕС, дослідженням потенціалу та прогнозуванням розвитку ВДЕ займалися ряд українських науковців: Сінчук О.М., Яценко Л.В., Кириленко О.В., Кулик М.М., Мхітарян Н.М., Кудря С.О., Кузнецов М.П., Денисюк С.П., Лежнюк П.Д., Кулик В.В., Павловський В.В., Василько П.Ф., Яндульський О.С., Дубовський С.В., Приймак М.В., Сегеда М.С., Дудурич О.Б. та інші. Більшість сучасних методів оцінки надійності енергосистем обмежується аналізом окремих періодів (пікові навантаження, мінімальні потреби, паводки) або використанням стандартних графіків. Це не дозволяє повноцінно оцінити роботу енергосистеми з урахуванням мінливої генерації від вітрових та сонячних електростанцій.

У монографії [2] представлено дослідження, що охоплюють широкий спектр питань, пов'язаних з перетворенням енергії з відновлюваних джерел (ВДЕ) на електричну та теплову енергію. Розглянуто такі джерела, як вітер, сонце, геотермальні води, малі річки та біомаса. Детально проаналізовано ефективні методи та засоби їхнього використання, типи енергетичного обладнання та принципи їхньої роботи. Окрім того, представлено особливості застосування ВДЕ в різних галузях економіки України та результати наукових

досліджень, проведених фахівцями Інституту відновлюваної енергетики НАН України.

Підручник [3] є комплексним посібником з відновлюваних джерел енергії, що охоплює основні принципи використання ВДЕ, конструкції та режими роботи відповідних енергетичних установок. У ньому представлено практичні приклади та міжнародний досвід експлуатації відновлюваних електростанцій, а також наведено методи розрахунку автономних систем ВДЕ. Підручник є результатом наукових досліджень авторів та доповнює їхні попередні публікації.

У роботі [4] розглянуто технології перетворення енергії з різних типів відновлюваних джерел, а саме: сонячної, вітрової, геотермальної, водної та біомаси, на електричну та теплову енергію. Представлено аналіз конструкцій, принципів роботи, параметрів та методів розрахунку установок, що працюють на ВДЕ. Окремо розглянуто питання ефективності та перспектив використання ВДЕ в контексті української енергетики.

Враховуючи постійно зростаючу потребу у тепловій та електричній енергії, дана робота зосереджена на поглибленому аналізі відновлюваних джерел енергії та їхнього впливу на стійкість енергосистеми, на розробці оптимальних стратегій для переходу до ВДЕ, що гарантують стійкість та надійність енергетичної галузі.

Мета статті

Метою даної роботи є дослідження різних підходів до зменшення впливу відновлюваних джерел енергії на стійкість енергетичної системи та визначення оптимальної комбінації традиційних та відновлюваних джерел для забезпечення стабільного та надійного енергопостачання. Оцінка ефективності різних підходів до мінімізації впливу відновлюваних джерел енергії на стабільність енергомережі.

Виклад основного матеріалу

Згідно з оцінкою KSE Institute, станом на травень 2024 року, російська агресія призвела до повної руйнації ключових енергетичних об'єктів України, таких як Каховська та Дніпровська ГЕС, Зміївська та Трипільська ТЕС. Крім того, критичних пошкоджень зазнали понад 80% приватних теплових електростанцій, близько половини високовольтних підстанцій, практично всі нафтопереробні заводи та значна частина інфраструктури зберігання нафти та нафтопродуктів. Загальні прямі збитки енергетичного сектору України оцінюються в \$16,1 млрд. Також Україна втратила понад 9 ГВт потужностей генерації. Ці дані свідчать про масштабні руйнування енергетичної інфраструктури України внаслідок російської агресії, що створює серйозні виклики для енергетичної безпеки країни.

Світова енергетика переживає період значних змін: традиційні великі електростанції поступово замінюються розподіленою генерацією. У перспективі, з впровадженням Smart Grid та збільшенням частки розподіленої генерації, локальні енергомережі зможуть

працювати як самостійно, так і в складі загальної енергосистеми. На тлі стрімкого розвитку технологій та змін клімату енергетичний ринок зазнає суттєвої трансформації: енергія з товару перетворюється на послугу. Глобальні тенденції спрямовують енергетику від централізованого виробництва до розподілених систем та децентралізації. Споживачі стають активними учасниками ринку, перетворюючись на просьюмерів, що одночасно виробляють і споживають енергію та беруть участь у нових бізнес-моделях. Ці зміни, в свою чергу, породжують нові соціальні виклики. За даними Міжнародного енергетичного агентства, очікується, що до 2050 року глобальне енергоспоживання подвоїться порівняно з показниками 2015 року, досягнувши 41,3 трлн. кВт·год. Це ставить завдання збільшення виробництва енергії при одночасному зниженні її вартості. У структурі енергоспоживання все більшу роль відіграють альтернативні джерела енергії, які мають

значний вплив на розподіл енергетичних ресурсів (рис. 1) [5]. Одна з ключових відмінностей відновлюваних джерел енергії від викопного палива полягає в кількості викидів парникових газів, особливо вуглекислого газу.

Альтернативні джерела енергії мають свої можливості та обмеження. Доступність є важливим фактором в оцінці використання поновлюваних джерел виробництва електроенергії. Однак вони також схильні до певних обмежень. Наприклад, сонячну енергію можна отримувати лише вдень, за винятком періодів хмарної погоди. Щоб запобігти пошкодженням, вітрові турбіни зазвичай автоматично зупиняються, коли швидкість вітру перевищує 25 м/с. Також для ефективної генерації електроенергії потрібна швидкість вітру не менше 3 метрів за секунду. Геотермальна енергія здатна безперервно виробляти електроенергію впротягом 24 годин, проте вона обмежена географічно.

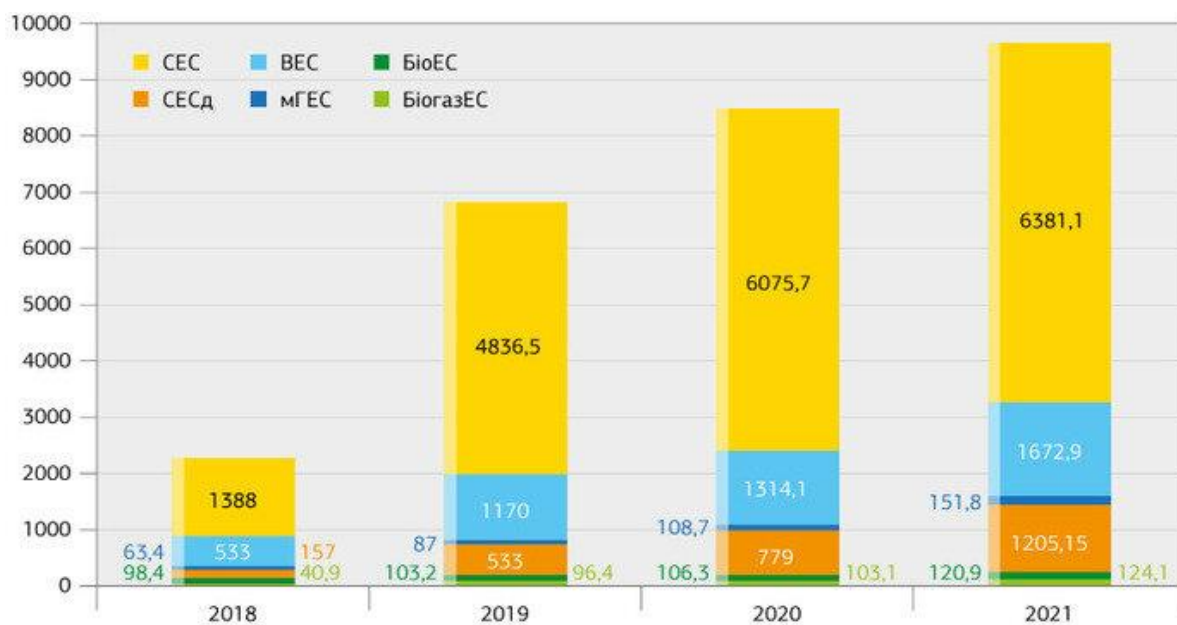


Рис. 1 – Динаміка росту встановленої потужності об'єктів ВДЕ, які працюють за «зеленим» тарифом, МВт [6]

Інтеграція відновлюваних джерел енергії в енергосистему стикається з низкою проблем, які необхідно подолати для успішного переходу до стійкої енергетики. Ці проблеми можна класифікувати за такими напрямками: нерівномірність виробництва ВДЕ, модернізація інфраструктури, політико-регуляторні питання, фінансові аспекти, високі початкові інвестиції, доступ до фінансування, залучення приватного капіталу. Ключовою проблемою є нестабільність виробництва ВДЕ, що ускладнює балансування енергосистеми. Також необхідна масштабна модернізація мереж для інтеграції ВДЕ.

Розподільчі мережі електроенергії чутливі до різних видів перешкод, які можуть виникати як з боку генераторів, так і з боку споживачів. Ці перешкоди впливають на параметри якості електроенергії, що

призводить до змін у характеристиках електропостачання. Тому критично важливо постійно контролювати основні параметри, такі як напруга, частота та рівень шуму, щоб запобігти погіршенню якості електроенергії. Зважаючи на властиву відновлюваним джерелам енергії волатильність, зумовлену їх залежністю від метеорологічних факторів, актуальним є впровадження гібридних енергетичних систем, що включають засоби оперативного регулювання потужності. Однак оптимізація конфігурації таких систем, враховуючи особливості перетворення енергії ВДЕ, є складним завданням. Існуючі методології моделювання та оптимізації енергетичної інфраструктури часто не повною мірою враховують комплексну взаємодію вітрових, сонячних електростанцій, традиційних генеруючих потужностей, біогазових установок, двигунів

внутрішнього згоряння, мікротурбіни, паливних елементів, дизель-генераторів та накопичувачів енергії. Незважаючи на достатню вивченість економічних та фізичних характеристик окремих компонентів, необхідне поглиблене дослідження стохастичних аспектів функціонування інтегрованих систем. Стратегія енергетичного переходу до 2050 року передбачає повну заміну вугільних ТЕС на електростанції, що використовують відновлювані джерела енергії (сонце, вітер, біомаса), а також на газові електростанції з високою маневреністю (з можливим переходом на синтетичний газ з ВДЕ). Для забезпечення стабільності енергосистеми планується впровадження технологій накопичення та зберігання енергії, а також, можливо, нових ядерних технологій. Для ефективного контролю, моніторингу та оптимізації роботи енергетичної системи використовуються технології управління енергосистемою, а саме системи управління енергомережами (EMS), що базуються на комп'ютерних та інформаційних технологіях. Ключовим завданням систем управління енергомережами (EMS) є ефективне управління навантаженням. Це дозволяє операторам контролювати та регулювати енергоспоживання в мережі, щоб уникнути перевантажень та збалансувати попит і пропозицію. Крім того, важливими функціями EMS є прогнозування та планування. Використовуючи дані про виробництво та споживання енергії, системи прогнозують майбутній попит і планують роботу мережі. Це дозволяє операторам ефективно розподіляти ресурси та заздалегідь вживати заходів для управління змінами в навантаженні та генерації. Енергетичні системи з високим рівнем використання ВДЕ становлять особливу складність в управлінні енергетикою. Вони вимагають наявності пристроїв для зберігання енергії та забезпечення споживання в моменти відсутності зовнішньої генерації. Безсумнівно, технології накопичення енергії допомагають згладити коливання, спричинені переривчастим характером сонячної та вітрової генерації. Проте, з огляду на мінливість як самих джерел, так і споживчого попиту, лише акумуляторів недостатньо для повної реалізації енергетичного потенціалу. Складність ситуації виключає можливість універсального рішення або єдиної технології. Для ефективного використання енергії необхідне інтелектуальне управління системами накопичення, що базується на прогресивному програмному забезпеченні. Штучний інтелект (ШІ) дозволяє не просто керувати, а оптимізувати роботу системи в динамічно мінливих умовах. Поєднання відновлюваної енергії з інтелектуальними системами зберігання на базі ШІ може стати революційним підходом, що визначає розвиток енергетики. Цю концепцію можна позначити як «Інтелектуальний накопичувач енергії» (ІНЕ) [7].

Оператор енергосистеми України, НЕК «Укренерго», вже розпочав автоматизацію виробничих процесів, щоб повноцінно брати участь у торгівлі електроенергією на ринку ЄС як член ENTSO-E, включаючи участь у європейських аукціонах. Для системних

операторів, які є членами ENTSO-E, наявність автоматизованих систем управління є обов'язковою вимогою, що забезпечує прозорість для партнерів. Очевидно, що ці ж вимоги будуть застосовуватися до всіх енергетичних компаній України, які планують брати участь у торгах в країнах ЄС, що сприятиме розвитку можливостей енергетичних компаній у застосуванні технологій штучного інтелекту. Інтелектуальні системи накопичення енергії, що базуються на штучному інтелекті, відкривають шлях до створення інтелектуальних енергосистем. Комбінація ШІ, традиційних джерел енергії, таких як ТЕС, відновлюваних джерел та накопичувачів, дозволяє повністю реалізувати потенціал відновлюваної енергетики, приносячи користь як галузі, так і споживачам. В умовах декарбонізації, децентралізації та впровадження нових технологій, енергокомпанії використовують ШІ для балансування попиту та пропозиції, спричиненого зростанням частки відновлюваних джерел енергії. Жодна технологія сама по собі не є універсальним рішенням, але штучний інтелект, як елемент комплексних систем, забезпечує технологічний прогрес, необхідний для управління все більш складними енергетичними системами. В Україні процес впровадження ШІ тільки починається, і на даний момент існують лише загальні концептуальні підходи та попередній план розвитку. Концепція розвитку ШІ в Україні хоч і визначає основні напрямки, більше орієнтована на науково-дослідницьку сферу.

Міністерство енергетики України заявило про готовність до співпраці з метою використання досвіду Південної Кореї, яка є лідером у розвитку та впровадженні сучасних технологій в електроенергетиці, зокрема «розумних» мереж. ДТЕК Енерго впроваджує технології штучного інтелекту для підвищення ефективності управління технологічним процесом на теплових електростанціях. Застосовані технології ШІ в режимі реального часу аналізують сотні параметрів і визначають оптимальний режим роботи обладнання на основі історичних та поточних даних. ШІ надає машиністам котлів рекомендації щодо можливостей економії палива. За період реалізації проекту з 2019 по 2020 рік загальний економічний ефект склав 480 мільйонів гривень, що відображає вартість зекономленого палива порівняно з періодом, коли машиністи не використовували рекомендації ШІ.

Отже для прогнозування роботи гібридної станції ТЕС+ВДЕ було досліджено активаційні функції у нейронних мережах ReLU та Сігмоїд. Для кожної функції активації прихованого шару було проведено порівняльний аналіз двох методів навчання: традиційний стохастичний градієнтний спуск та адаптивний алгоритм навчання (Adam). Штучні нейронні мережі являють собою математичні моделі, втілені у програмних та апаратних системах, які функціонують за аналогією з біологічними нейронними мережами. Штучний нейрон функціонує так: на його вхід надходить безліч сигналів, кожен з яких є виходом іншого нейрона (рис. 2).

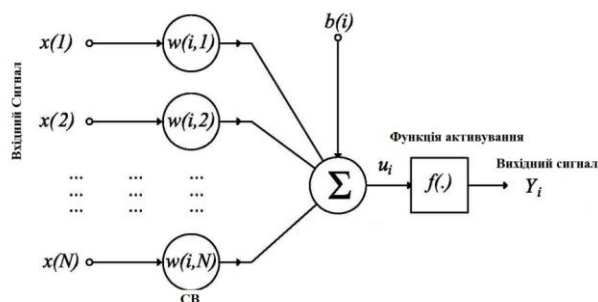


Рис. 2 – Модель активації нейрона

Ці вхідні сигнали множаться на відповідні вагові коефіцієнти, а отримані добутки сумуються, визначаючи рівень активації нейрона. У штучних нейронних мережах синаптичні ваги (СВ) – це числові значення, які визначають силу зв'язку між штучними нейронами. Було вирішено завдання прогнозування значень на основі погодинних вибірок швидкості вітрового потоку та погодинних вибірок сонячної інсоляції. Оскільки

диспетчерське управління в енергосистемі здійснюється погодинно, баланс електроенергії повинен підтримуватися для кожної години доби.

Нейрони, що використовують функцію активації, називаються ReLU (rectified linear unit). ReLU описується наступним виразом

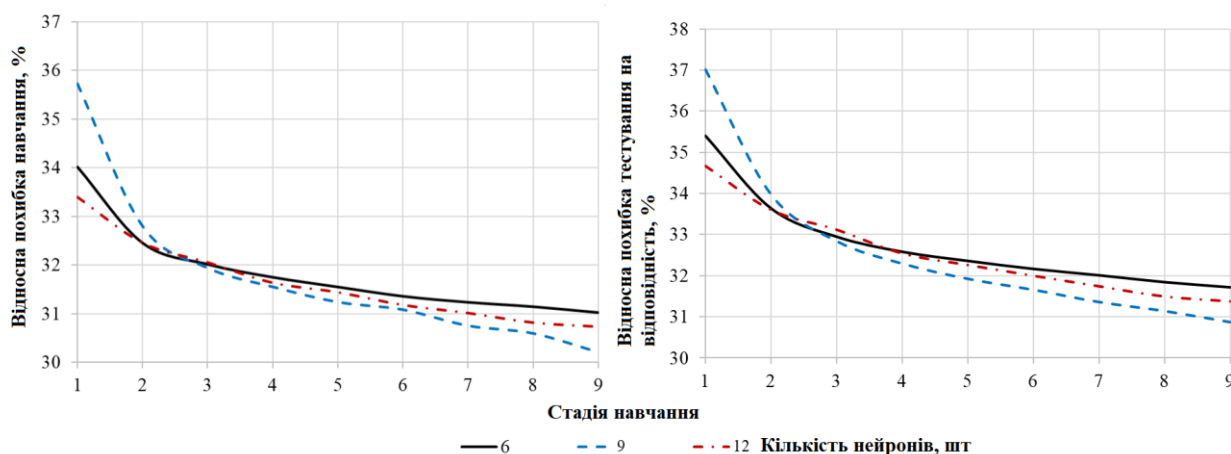
$$f(s) = \max(0, x).$$

Згідно отриманих даних відносної похибки прогнозу швидкості вітрового потоку взимку при кількості нейронів, 12,9,6, було обрано експериментальним шляхом значення кроку навчання 10^{-3} серед інших як оптимальне (рис. 3).

Сигмоїдна функція, на відміну від порогової, має неперервний характер і може набувати будь-яких значень у межах від 0 до 1. Вона визначається наступною формулою

$$f(s) = \frac{1}{1 + e^{-ax}},$$

а – це параметр, що керує крутизною сигмоїдної кривої: чим більше значення а, тим різкіший перехід функції

Рис. 3 – Відносна похибка навчання прогнозу швидкості вітру взимку (Relu+Adam) із кроком $n=10^{-3}$

Для найбільш точного прогнозування швидкості вітру, як показали дослідження, оптимально використовувати функцію активації ReLU, навчаючи модель за допомогою алгоритму та встановлюючи крок навчання на рівні 10^{-3} . Згідно з результатами досліджень, для оптимального прогнозування сонячної інсоляції, найкраще використовувати функцію активації Sigmoid, застосовуючи адаптивний метод навчання Adam та крок навчання 10^{-3} .

Для прогнозування використовувалися погодинні дані, що дозволило отримати прогнозні значення швидкості вітру та сонячної інсоляції на добу для кожного з чотирьох сезонів: зими, весни, літа та осені. Було встановлено, що не тільки через принципові відмінності прогнозування сонячної та вітрової енергії, але й через відмінності між порами року, створення єдиної

універсальної моделі дасть меншу точність, ніж адаптація моделі до конкретного завдання.

Для прогнозування сонячної інсоляції середня помилка короткострокового прогнозу на годину вперед на тестуванні на відповідність вибірці склала від 0,8% влітку до 1,9% взимку, що, згідно зі світовим досвідом досліджень з цієї проблеми, свідчить про високу точність прогнозу. Зниження точності в зимовий період пояснюється великою кількістю днів з хмарністю та меншим рівнем сонячної інсоляції.

Середня помилка прогнозування швидкості вітру на тестуванні на відповідність вибірці склала від 26-34%. Для підвищення точності необхідно використовувати додаткові метеорологічні дані або дані дистанційного зондування Землі, що не входить до завдань цієї роботи. Проте, цей рівень прогнозування забезпечує з певною мірою ймовірності видачу гарантованої

потужності від вітроелектростанції. Причому, чим менша гарантована потужність окремої ВЕС, тим вища її ймовірність. Це зумовлено тим, що при будь-якій швидкості понад 12 м/с ВЕС може розвивати повну потужність, а в період з 3-12 м/с буде гарантована видача потужності на 5-8%.

Отримані результати дозволяють підвищити ефективність планування та оперативне управління сонячними та вітровими електростанціями для території України за рахунок більш точного прогнозування їх генерації.

Для балансування режимів в досліджуваній автономній енергосистемі на промисловій частоті, особливо в зимовий період, доцільно та необхідно залучення додаткових джерел генерації електроенергії на основі альтернативних джерел енергії, а саме вітрового потоку та сонячної інсоляції.

Ставиться завдання дати потенційну оцінку максимальної активної потужності, яку можна отримати на основі альтернативних джерел енергії. Враховуємо, що середньорічна температура повітря 9,0°C, середня місячна температура найбільш холодного місяця (січень) – мінус 3,7°C, найбільш жаркого – 22,1°C. Абсолютний максимум температури повітря за даними метеостанції м. Кривий Ріг +40°C, абсолютний мінімум – -35°C.

Щоб узгодити параметри сонячних панелей з параметрами інверторів, необхідно розрахувати оптимальну кількість послідовних та паралельних з'єднань. При цьому важливо, щоб сумарні значення напруги та струму не перевищували максимально допустимі параметри інверторів.

Таблиця 1

Схема з'єднань сонячних панелей

Тип з'єднання	Кількість сонячних панелей, шт.	Вхідні параметри	
		U, В	I, А
Послідовно	20	726,80	94,72
Паралельно	10		

Для оцінки максимальної продуктивності сонячної електростанції (СЕС) протягом дня, коли сонячне випромінювання завжди перпендикулярне до панелей, використовуються прогнози сонячної інсоляції, які були отримані в результаті попередніх досліджень. Для точного проектування сонячної електростанції необхідно враховувати реальну орієнтацію панелей у просторі при розрахунку інсоляції. Оскільки сонячні модулі, розташовані в різних частинах станції, мають різну орієнтацію, їх кут нахилу до горизонту та азимут відрізнятимуться, що суттєво впливає на кількість отриманої інсоляції для кожного модуля. Для забезпечення максимальної ефективності сонячних панелей кут їх нахилу регулюється залежно від сезону. Навесні та восени оптимальним вважається кут, що дорівнює широті місцевості, взимку він збільшується, а влітку зменшується на 10-15 градусів (рис. 4).

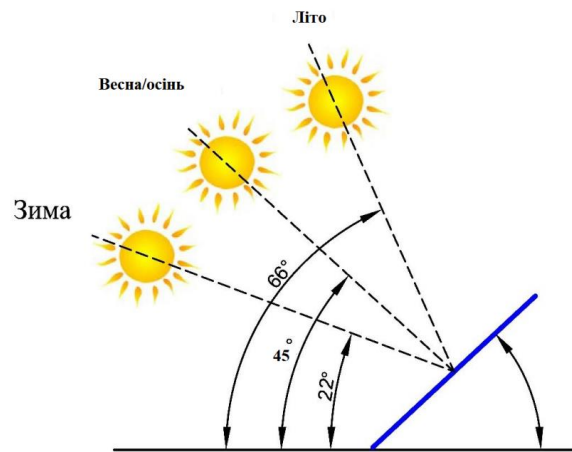


Рис. 4 – Положення сонця щодо сонячного модуля протягом року

Якщо зміна кута нахилу неможлива, його встановлюють на рівні широти місцевості. За даними багаторічних спостережень у м. Кривий Ріг максимальна величина сонячної радіації 591 МДж/м² за умов середньої хмарності припадає на липень, мінімальна – 75 МДж/м² на грудень. Протягом року характерно збільшення місячних сум сонячної радіації від лютого до березня і різке зниження від серпня до вересня (рис. 5).

Згідно ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 – «Будівельна кліматологія» розглянута територія відноситься до III вітрового району. Нормативне значення вітрового явища 0,38кПа. Навесні, восени і взимку переважають вітри північно-східного і східного напрямів, влітку – західного і північно-західного. Максимальна швидкість вітру за даними ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 з середніх швидкостей по румбах за січень – 5,6 м/с, повторюваність штилів за січень – 9,2%. Мінімальна швидкість вітру з середніх швидкостей по румбах за липень – 4,5 м/с, повторюваність штилів – 15,4%, середньорічна швидкість вітру в районі міста за багаторічний період спостережень за даними метеостанцій м. Кривий Ріг та Лоскарівка – 4,6-5,0 м/с, максимальна – 28 м/с.

Територія міста Кривий Ріг, згідно ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 – «Теплова ізоляція та енергоефективність будівель», розташована в 2-ій зоні вологості – «степ». Середня за рік відносна вологість повітря – 74%. Середня швидкість вітру у січні становить від 4,0 до 6,0 м/сек. Сильні вітри (зі швидкістю понад 15 м/сек) відмічаються в середньому 29 днів на рік. В теплий період часто спостерігаються суховії – вітри східних румбів, які характеризуються швидкістю більше 5,7 м/сек. При дуже низькій відносній вологості повітря – 25-30%. Вони формуються навесні – початку літа [8].

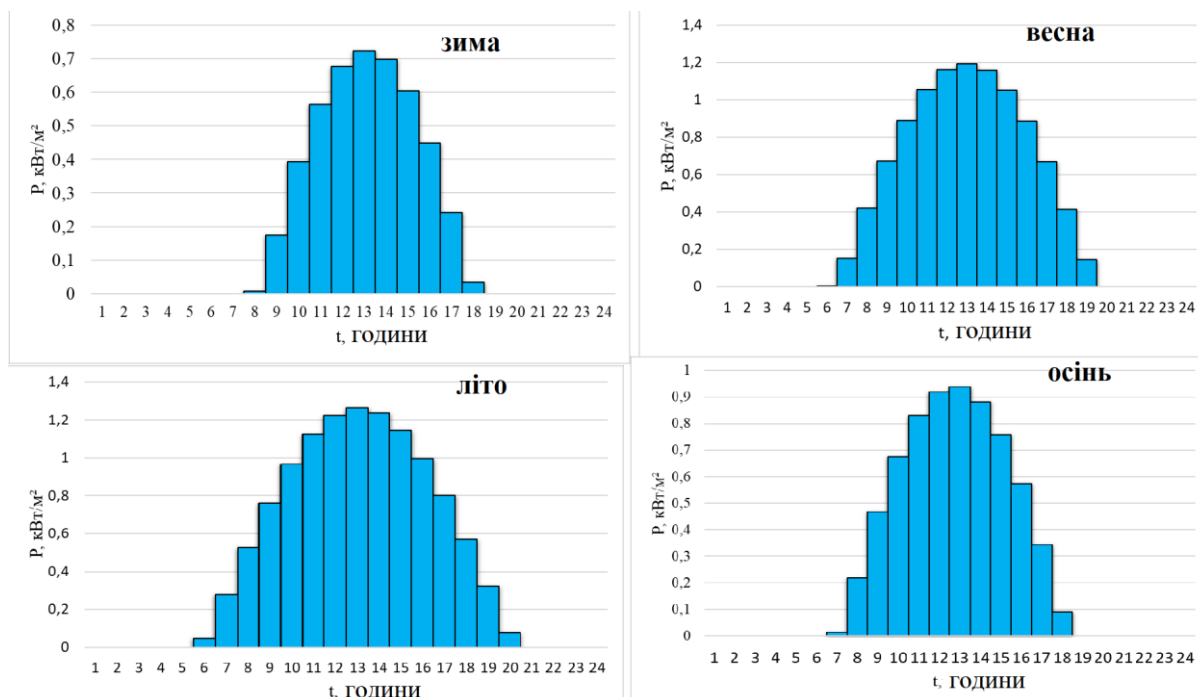


Рис. 5 – Сонячна інсоляція для характерного сезону

Після вивчення вітрових ресурсів Криворізького району було зроблено припущення по встановленню вітроелектростанції (ВЕС) з потужністю 10 МВт. Регіон відрізняється середнім вітровим потенціалом, з середньою річною швидкістю вітру 8,24 м/с на висоті 50 метрів, що є наближеним до оптимального для

виробництва вітрової енергії. Для розрахунку потужності ВЕС використано прогностні дані про швидкість вітру з попередніх досліджень. Графічне відображення результатів оцінки вироблення потужності вітроелектростанції в характерні дні кожного сезону представлено на рисунку 6.

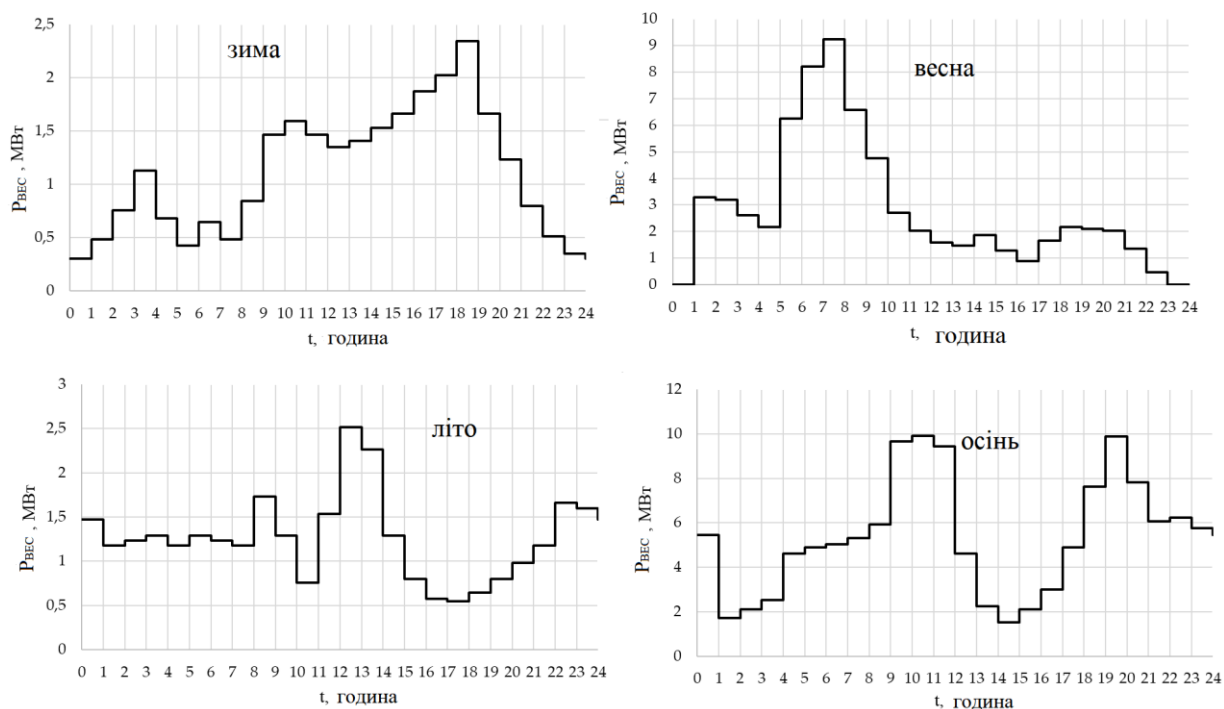


Рис. 6 – Вироблення потужності ВЕС для характерного сезону

Видно, що найбільшу потужність ВЕУ розвиває навесні та восени.

Одним з ключових елементів будь-якої автономної електростанції є система накопичення енергії в акумуляторних батареях, що забезпечує необхідну мобільність станцій. Це обладнання дозволяє оптимізувати роботу вітрової електростанції в періоди відсутності або недостатності вітру, а також під час планових або аварійних ремонтів, використовуючи накопичену енергію при надлишку генерації. Ці батареї повинні мати високу ємність та витримувати велику кількість циклів заряду-розряду. Враховуючи широке застосування літій-іонних акумуляторів, у цій роботі розглядається можливість використання надпровідних індукційних накопичувачів (НІН).

У рамках дослідження було розроблено програмне забезпечення для оптимального планування вибору складу генерувальних джерел в межах добового інтервалу часу. Алгоритм роботи програми ґрунтується на методі лінійного програмування з використанням системи умов, поданих у вигляді продукційних правил.

Наприклад, якщо сумарна потужність ТЕС повністю задовольняє потребу автономної системи в електроенергії, інші джерела генерації не залучаються. Якщо ж потужність ТЕС недостатня для покриття навантаження, тоді залучається наступне джерело з нижчою собівартістю виробництва електроенергії – у цьому випадку ВЕС.

Розглянута автономна енергосистема, основним джерелом генерації якої є ТЕС, визначена як основне джерело енергії, а вітроенергетичні установки та сонячні електростанції – як альтернативні. Накопичувач енергії розглядається як балансуєчий елемент. Відповідно до запропонованого алгоритму, можуть бути виконані розрахунки для кожної доби на відповідному сезонному інтервалі року.

Алгоритм передбачає використання джерела з найнижчою собівартістю електроенергії для базового навантаження: взимку – теплоелектростанцій, влітку – сонячних станцій. Пікове навантаження покривається за допомогою накопичувача енергії або альтернативних джерел за наявності достатньої потужності.

Дослідження показало, що ВДЕ можуть забезпечити більшість добового споживання, крім ранкових і вечірніх піків, коли виникає дефіцит потужності. Для його покриття необхідне використання накопичувача, який повинен працювати з 17:00 до 23:00. У ранкові години (6:00–12:00) висока швидкість вітру дозволяє заряджати накопичувач. Для покриття ранкових пікових навантажень, коли споживання електроенергії та тепла різко зростає, Криворізька ТЕС використовує наступні заходи: маневрування енергоблоками, використання резервного палива, автоматизовані системи управління.

Висновки

У ході проведеного дослідження визначено потенційно ефективний спосіб спільної роботи традиційних та альтернативних джерел енергії у складі гібридної електростанції, спрямований на зниження фінансових витрат і підвищення енергоефективності під час експлуатації. Запропонований метод та алгоритм оптимізації енергоспоживання дозволяють мінімізувати фінансові витрати груп споживачів електроенергії, які мають можливість вибору джерела живлення з традиційних (енергія ТЕС) та альтернативних (енергія ВЕС та СЕС) джерел. Розглянута модель включає накопичувач енергії, який відіграє основну балансуєчу роль в електростанції та тим самим дозволяє мінімізувати ризики недовиробництва енергії ВЕС, зумовлені непередбачуваним характером генерації останніх. Оцінка надійності гібридних систем виробництва електроенергії з використанням ВДЕ, що мають суттєві відмінності в структурі, системах управління, типах використовуваних перетворювачів тощо, має велике значення з точки зору оптимізації розподілу енергії. Проведене дослідження було мотивоване необхідністю підвищення економічної життєздатності інтегрованих систем відновлюваної енергетики і, зокрема автономних, що не тільки відіграє центральну роль в інтеграції змінних ВДЕ в рамках глобальних зусиль з вирішення проблеми зміни клімату та децентралізації енергетики, але також має важливе значення для забезпечення загального надійного доступу до недорогих, надійних, стійких та сучасних джерел енергії.

Перелік використаних джерел

- [1] Національний план дій з відновлюваної енергетики на період до 2030 року. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/761-2024-%D1%80#Text> (дата звернення: 10.12.2024).
- [2] Кудря С.О. Відновлювані джерела енергії. Київ : Інститут відновлюваної енергетики НАНУ, 2020. 492 с. URL: https://www.ive.org.ua/wp-content/uploads/Monografia_final_21.12.2020.pdf (дата звернення: 10.12.2024).
- [3] Спеціальні розділи енергетики. Нетрадиційна та відновлювальна енергетика : підручник / Сінчук О.М., Бойко С.М., Сінчук І.О., Ялова А.М. Кременчук, 2017. 218 с. URL: <http://aespt.knu.edu.ua/student/educational-materials/> (дата звернення: 15.10.2024).
- [4] Сегеда М.С., Олійник М.Й., Дудурич О.Б. Нетрадиційні та відновлювані джерела електроенергії : навч. посіб. Львів : вид-во Львів. Політехніки, 2019. 203 с. URL: https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2021/Segeda_2019_204.pdf (дата звернення: 30.10.2024).
- [5] International Renewable Energy Agency (IRENA). URL: <https://www.irena.org/> (дата звернення: 17.12.2024).

- [6] Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг. URL: <https://www.nerc.gov.ua/> (дата звернення: 15.12.2024).
- [7] Meena M., Reddy R. Smart energy storage systems review on determining efficient battery management systems. *International Journal of Science and Research Archive*. 2023. Vol. 08(02). Pp. 662-668. DOI: <https://doi.org/10.30574/ijrsra.2023.8.2.0334>.
- [8] ЗВІТ з оцінки впливу на довкілля планованої діяльності по об'єкту РЕКОНСТРУКЦІЯ ПЛ 150 КВ Л-161/162 ПС «КРИВ.ТЕС-2» - ПС «ГПП-4 ІНГОКА», ДІЛЯНКА ОПОР № 8-19. Дніпро, 2020. URL: <https://adm.dp.gov.ua/storage/app/uploads/public/602/f79/08a/602f7908a5b4c825189541.pdf> (дата звернення: 05.09.2024).

APPROACHES TO ENSURING THE STABILITY OF THE ENERGY SYSTEM IN THE PROCESS OF INTEGRATION OF RENEWABLE ENERGY SOURCES

- Yalova A.** PhD (Engineering), associate professor, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0926-542X>, e-mail: al.yalovaya@knu.edu.ua;
- Bondar N.** senior lecturer, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8713-265X>, e-mail: bondar_nv@knu.edu.ua;
- Yalovoy O.** postgraduate student, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-1356-2987>, e-mail: yalovoy2001@gmail.com

Purpose of the Study. The study aims to investigate various approaches to mitigating the impact of renewable energy sources on the stability of the power system and to determine the optimal combination of conventional and renewable energy sources to ensure stable and reliable energy supply. The effectiveness of different approaches to minimizing the impact of renewable energy on grid stability is evaluated. **Materials and Methods.** Methods of eigenvalue analysis and transient process modeling were used. Correlation and regression analysis methods were used to assess the impact of renewable energy sources (RES) on the stability of the energy system. Data from the system operator «Ukrenergo» were used, including power system load schedules (hourly, daily, seasonal). Data from the Ukrainian Hydrometeorological Center for the years 2023–2024 were used to model RES generation: data on solar radiation (hourly, daily) and wind speed (hourly, daily). Technical specifications of solar panels and wind turbines installed in Ukraine were also used. The QGIS software was utilized for geoinformation analysis. The study employed artificial neural network theory, optimization methods based on linear programming and logical production rules, as well as methods for assessing and regulating steady-state operating conditions of the system, taking into account energy storage devices. **Results.** The scientific novelty lies in the development of an innovative method for assessing the reduction of the impact of renewable energy sources on power system stability. The feasibility of using artificial neural networks to forecast wind and solar power generation was demonstrated, as well as the optimization of the model structure and parameters to improve forecasting accuracy. The optimal combination of conventional and renewable energy sources was determined to ensure stable and reliable operation of the power system. **Practical Significance.** Based on experimental and theoretical research, specific recommendations and solutions are provided aimed at ensuring the stability of the power system during the integration of renewable energy sources, including optimization of management, use of new technologies, and infrastructure development.

Keywords: renewable energy sources, generation, forecast, solar energy, thermal power plants, wind power.

References

- [1] Natsionalnyi plan dii z vidnovliuvanoi enerhe-tyky na period do 2030 roku (National Renewable Energy Action Plan for the period up to 2030). [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/761-2024-%D1%80#Text>. Accessed on: December 10, 2024. (Ukr.)
- [2] S. Kudria, *Vidnovliuvani dzherela enerhii* [Renewable energy sources]. Kyiv, Ukraine: Institute of Renewable Energy NAS of Ukraine Publ., 2020. [Online]. Available: https://www.ive.org.ua/wp-content/uploads/Monografia_final_21.12.2020.pdf. Accessed on: December 10, 2024. (Ukr.)
- [3] O. Sinchuk, S. Boyko, I. Sinchuk, and A. Yalova, *Spetsialni rozdily enerhetyky. Netradytsiina ta vidnovliuvalna enerhetyka : pidruchnyk* [Special sections of energy. Unconventional and renewable energy : textbook]. Kremenichuk, Ukraine, 2017. [Online]. Available: <http://aespt.knu.edu.ua/student/educational-materials/>. Accessed on: October 15, 2024. (Ukr.)
- [4] M. Sehed, M. Oliinyk, and O. Dudurych, *Netradytsiini ta vidnovliuvani dzherela elektroenerhii : navch. posib.* [Non-traditional and renewable electricity sources : textbook]. Lviv, Ukraine: Lviv Polytechnic Publ., 2019. [Online]. Available:

- https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2021/Segeda_2019_204.pdf. Accessed on: October 30, 2024. (Ukr.)
- [5] International Renewable Energy Agency (IRENA). [Online]. Available: <https://www.irena.org/>. Accessed on: December 17, 2024.
- [6] Natsionalna komisiia, shcho zdiisniuiie derzhavne rehuliuivannia u sferakh enerhetyky ta komunalnykh posluh (National Commission for State Regulation in Energy and Utilities). [Online]. Available: <https://www.nerc.gov.ua/>. Accessed on: December 15, 2024. (Ukr.)
- [7] M. Meena, and R. Reddy, «Smart energy storage systems review on determining efficient battery management systems», *International Journal of Science and Research Archive*, vol. 08(02), pp. 662–668, 2023. doi: 10.30574/ijrsra.2023.8.2.0334.
- [8] «Zvit z otsinky vplyvu na dovkillia planovanoi diialnosti po obiektu REKONSTRUKTSIIA PL 150 KV L-161/162 PS «KRYV.TES-2» - PS «HPP-4 INHOKA», DILLANKA OPOR № 8-19» [«Report on the environmental impact assessment of the planned activity on the object reconstruction of FL 150 kV L-161/162 PS «Kryv.TTES-2»-PS «GPP-4 Ingka», plot of supports № 8-19»], 2020. [Online]. Available: <https://adm.dp.gov.ua/storage/app/uploads/public/602/f79/08a/602f7908a5b4c825189541.pdf>. Accessed on: September 5, 2024. (Ukr.)
- Стаття надійшла 16.05.2025
Стаття прийнята 29.05.2025
Стаття опублікована 30.06.2025

Цитуйте цю статтю як: Ялова А.М., Бондар Н.В., Яловий О.О. Підходи до забезпечення стійкості енергетичної системи в процесі інтеграції відновлюваних джерел енергії. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 50. С. 154-163. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.50.2025.336326>.