

УДК 330.35:620.91(477)

DOI: <https://doi.org/10.37734/2409-6873-2025-3-6>

МОДЕЛЮВАННЯ БІЗНЕС-ЦИКЛІВ У СФЕРІ ВІДНОВЛЮВАНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ УКРАЇНИ: ПІДХОДИ ФІЛЬТРАЦІЇ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ

В. О. ЛЮБЧАКкандидат фізико-математичних наук, доцент, завідувач кафедри кібербезпеки;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7335-6716>**О. В. КУБАТКО**доктор економічних наук, професор,
професор кафедри економіки, підприємництва та бізнес-адміністрування;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6396-5772>**Н. Л. БАРЧЕНКО**кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних наук,
Сумський державний університет
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5439-8750>**Л. Л. КАЛІНІЧЕНКО**доктор економічних наук, професор,
професор кафедри економіки та менеджменту,
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9847-8448>**Н. С. МАРТИНОВА**доцент кафедри математичного аналізу і методів оптимізації,
Сумський державний університет
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5747-0375>

Анотація. У статті проаналізовано циклічні характеристики розвитку відновлюваної енергетики в Україні в умовах макроекономічної нестабільності, регуляторних трансформацій і зовнішніх шоків. На основі використання фільтрів Ходріка-Прескотта, Баттерворта та Крістіано-Фіцджеральда проведено декомпозицію показників ВВП та виробництва електроенергії з ВДЕ на трендові і циклічні компоненти. Результати дослідження підтверджують наявність чітких фаз бізнес-циклів, що збігаються з періодами фінансових, політичних та воєнних криз. Зокрема, відповідно до НР-фільтру зниження ВВП у кризові періоди корелює з глобальними економічними потрясіннями, зокрема світовою фінансовою кризою та пандемією COVID-19. Відповідно до фільтру Баттерворта, циклічна компонента виробництва електроенергії з ВДЕ демонструє більш виражену хвилюподібну структуру з вищою амплітудою циклічних коливань у порівнянні з результатами, отриманими на основі НР-фільтра. Найглибший спад фіксується у 2006, 2011, та 2015 роках. Встановлено значущу позитивну кореляцію між розвитком ВДЕ та підвищенням енергоефективності економіки. Автори обґрунтовують необхідність впровадження адаптивної моделі управління сектором ВДЕ, яка враховує фазову динаміку та базується на кількісному прогнозуванні. Запропоновано практичні заходи щодо антикризової підтримки, цифрового моніторингу, інтеграції політики ВДЕ з енергоефективністю та розвитку фінансових інструментів, стійких до фазових коливань.

Ключові слова: відновлювана енергетика; енергетична ефективність; фільтр Ходріка-Прескотта; фільтр Баттерворта; фільтр Крістіано-Фіцджеральда; адаптивне управління; стратегія сталого розвитку.

Постановка проблеми в загальному вигляді та зв'язок із найважливішими науковими чи практичними завданнями. У сучасних умовах повномасштабної війни, реконструкції критичної інфраструктури та поступової інтеграції України до європейського енергетичного ринку, розвиток від-

новлюваної енергетики (ВДЕ) набуває стратегічного значення. Цей сектор демонструє високу стійкість до зовнішніх деструктивних впливів, зокрема під час масованих атак на енергетичну інфраструктуру. У 2023–2024 роках саме об'єкти сонячної та вітрової генерації виявилися менш вразливими, швидше

¹ Робота виконана в рамках НДР «Реструктуризація національної економіки в напрямі цифрових трансформацій для сталого розвитку» (№0122U001232).

відновлювали роботу й забезпечували критичне енергопостачання в регіонах, що постраждали від руйнувань [1].

На тлі формування нової архітектури енергетичної безпеки України, Національний енергетичний та кліматичний план до 2030 року передбачає суттєве збільшення частки ВДЕ у структурі кінцевого енергоспоживання [2]. Додатковим імпульсом до розвитку сектору стає активізація інструментів регулювання – аукціонних механізмів, зелених тарифів і сертифікатів, а також залучення масштабних інвестицій як з боку міжнародних фінансових організацій, так і з боку національного бізнесу [3].

За цих обставин особливої актуальності набуває проблема дослідження економічної динаміки розвитку відновлюваної енергетики, зокрема її циклічних характеристик. Сектор ВДЕ в Україні виявляє ознаки фазності – періодів зростання, спаду та стабілізації, які зумовлені як внутрішніми структурними факторами, так і зовнішніми макроекономічними шоками. Ідентифікація таких фаз і вивчення їх закономірностей є необхідною умовою для формування адаптивної економічної політики в енергетичній сфері.

У зв'язку з цим актуальним є застосування математичних методів аналізу часових рядів для моделювання бізнес-циклів у відновлюваній енергетиці. Зокрема, використання фільтрів Ходріка-Прескотта (НР), Бакстера-Вестермана (BW) та Крістіано та Фіцджеральда (CF) дає змогу виявити структурні коливання та оцінити вплив ключових інституційних та економічних змін на поведінку сектору. Такий підхід сприяє підвищенню точності прогнозування та забезпечує науково обґрунтовану базу для прийняття стратегічних рішень щодо розвитку відновлюваної енергетики в Україні.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

У процесі моделювання бізнес-циклів у сфері відновлюваної енергетики України, зокрема з метою виявлення фаз економічної динаміки та їхньої узгодженості з еколого-економічними процесами, доцільним є застосування методів фільтрації часових рядів. Використання фільтрів Ходріка-Прескотта (НР), Баттерворта (BW) та Крістіано та Фіцджеральда (CF), дозволяють здійснювати декомпозицію рядів на трендову та циклічну компоненти, що є ключовим для аналізу структурних змін та динаміки економіки в контексті переходу до сталої енергетики.

Фільтр Ходріка-Прескотта (НР), запропонований Робертом Годріком і Едвардом Прескоттом [4; 5], широко використовується в економічному аналізі для відокремлення довгострокового тренду від короткострокових коливань у часових рядах. У межах даного дослідження НР-фільтр застосовано для оцінки динаміки таких показників, як

валовий внутрішній продукт (ВВП), виробництво електроенергії з відновлюваних джерел, викиди вуглецевих сполук тощо. Застосування цього методу дозволяє визначити основні тенденції сталого розвитку, а також встановити фази зростання і спаду ділової активності у галузі відновлюваної енергетики. Для річних даних використано параметр згладжування $\lambda = 100$, що забезпечує баланс між точністю відображення циклічних коливань і плавністю трендової складової.

Фільтр Баттерворта (BW) застосовується переважно для виявлення високочастотних змін у часових рядах, що пов'язані з короткостроковими коливаннями або сезонними факторами. Його основною перевагою є можливість тонкого налаштування частоти зрізу та порядку фільтра, що забезпечує гнучкість аналізу [6; 7]. У контексті аналізу розвитку відновлюваної енергетики фільтр BW дозволяє виявляти специфічні коливання у виробництві електроенергії з ВДЕ, зокрема ті, що можуть бути спричинені кліматичними умовами, змінами попиту або технологічними оновленнями.

Фільтр Крістіано-Фіцджеральда (CF), запропонований К. Крістіано та Дж. Фіцджеральдом [8], є сучасним інструментом для фільтрації часових рядів, який поєднує переваги класичних методів і дозволяє отримувати більш точну оцінку циклічних компонент навіть на коротких вибірках. Особливістю CF-фільтра є його адаптивність до різних довжин циклів та здатність зменшувати викривлення на початку і в кінці ряду, що є важливим при аналізі економічних даних із нерівномірною динамікою. У контексті дослідження відновлюваної енергетики України застосування CF-фільтра сприяє глибшому розумінню фазових зсувів у взаємозв'язку економічних та екологічних показників, що робить його незамінним інструментом для підтримки стратегічного планування та оцінки ефективності політик у сфері сталої енергетики.

Таким чином, застосування згаданих методів фільтрації забезпечує багатовимірний аналіз часових рядів, що є необхідною передумовою для якісного прогнозування бізнес-циклів та формування стратегічних рішень у сфері сталого енергетичного розвитку.

Формування цілей статті (постановка завдання). Метою дослідження є ідентифікація характеру динаміки енергетичних показників, встановити потенційні бізнес-цикли у сфері відновлюваної енергетики та здійснити короткострокове прогнозування на основі трендових компонент.

Виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів. У дослідженні бізнес-циклів у сфері відновлюваної енергетики України було застосовано комплекс фільтраційних підходів до аналізу

часових рядів, зокрема методи Ходріка–Прескотта (НР), Баттерворта (BW), Крістіано–Фіцджеральда (CF), що дозволяють декомпозувати економічні показники на трендову та циклічну компоненти. Метою дослідження стало виявлення характеру коливань у розвитку сектору відновлюваної енергетики та оцінка його потенціалу зростання на основі моделей прогнозування.

Дані для дослідження були зібрані зі Світового банку за період 2000–2022 рр. До аналізу включено такі показники: обсяги виробництва електроенергії з відновлюваних джерел (без урахування гідроенергії), відновлювана електроенергія у % від загального виробництва, альтернативна та атомна енергія у структурі споживання, викиди CO₂, а також індикатори цифрового розвитку.

На попередньому етапі всі ряди було логарифмовано, що забезпечує стабілізацію варіацій та дозволяє трактувати зміни як темпи зростання.

У межах фільтраційного аналізу динаміки виробництва електроенергії з відновлюваних джерел в Україні було застосовано фільтр Ходріка–Прескотта (НР-фільтр), який дозволяє розділити часовий ряд на дві основні компоненти – довгостроковий тренд та короткостроковий цикл [4; 5]. Такий підхід є ефективним інструментом моделювання бізнес-циклів у галузі енергетики, оскільки дає змогу ідентифікувати як сталі структурні тенденції, так і тимчасові флуктуації, зумовлені зовнішніми шоками або внутрішніми коливаннями попиту та пропозиції. Результати моделювання наведено на рисунку 1.

На графіку чітко простежується хвилюподібна динаміка обсягів ВВП та виробництва електроенергії з відновлюваних джерел (без урахування гідроенергетики), що свідчить про наявність циклічних коливань [9]. Зниження виробництва в кризові періоди корелює з глобальними економічними потрясіннями, зокрема світовою фінансовою кризою та пандемією COVID-19. Навпаки, періоди підйому пов'язані із запровадженням сприятливих механізмів державної підтримки, зокрема системи «зелених» тарифів, що активізували інвестиції у ВДЕ [10; 11]. Крім того, встановлено помірний прямий зв'язок між довгостроковим трендом розвитку ВДЕ та показником енергетичної ефективності економіки (GDP per unit of energy use), що відображено у коефіцієнті кореляції $K = 0.556$. Це підтверджує гіпотезу про позитивну взаємодію між розвитком відновлюваної генерації та підвищенням продуктивності енергетичного використання [12].

З метою глибшого аналізу короткострокових флуктуацій у динаміці виробництва електроенергії з відновлюваних джерел було застосовано цифровий фільтр Баттерворта (BW). На рисунку 2 представлено циклічну компоненту, очищену від тренду, що дає змогу виокремити високочастотні коливання.

Отриманий графік демонструє більш виражену хвилюподібну структуру з вищою амплітудою циклічних коливань у порівнянні з результатами, отриманими на основі НР-фільтра. Найглибший спад ВВП фіксується

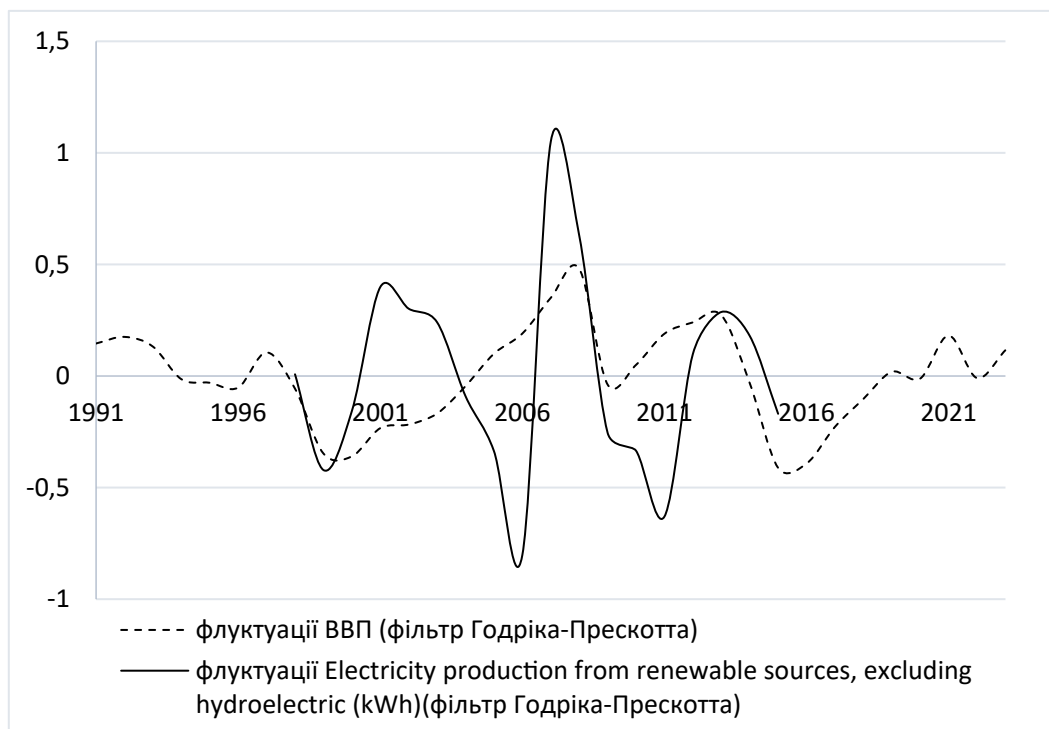


Рис. 1. НР-фільтр: Циклічні складові ВВП та виробництва електроенергії з відновлюваних джерел

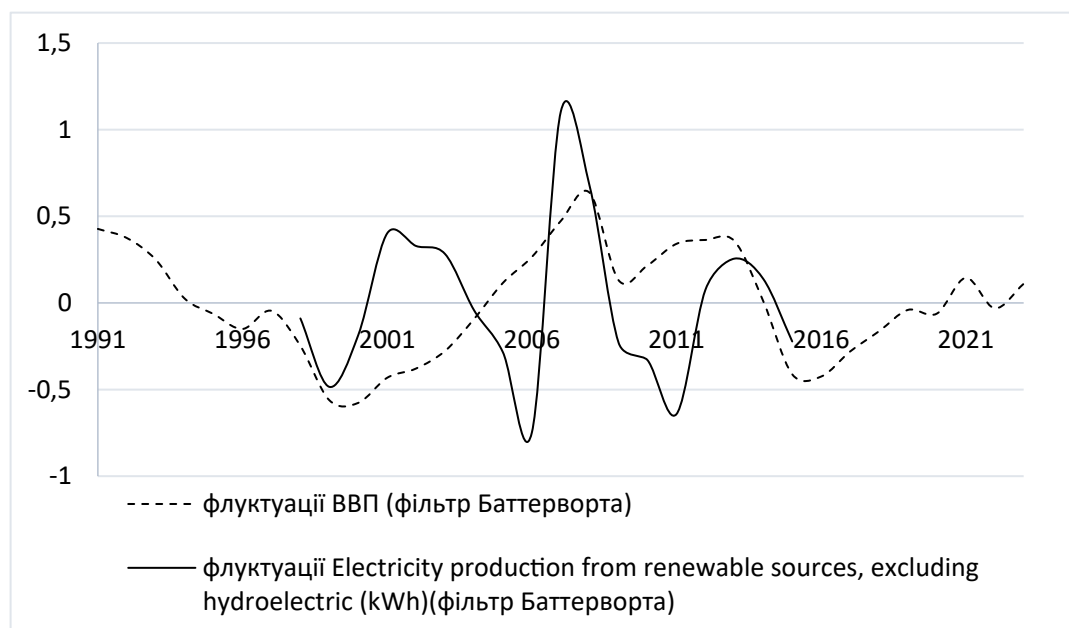


Рис. 2. Фільтр Баттерворта: Циклічна компонента виробництва електроенергії з ВДЕ

у 1998–1999 та 2013–2014 роках, що співвідноситься піком падіння ВВП в 1990-х та з початком збройного конфлікту на сході України, валютною девальвацією, різким скороченням інвестицій у сектор та загальною геополітичною нестабільністю [13; 14].

Крім того, відзначаються циклічні спади по ВВП та генерації відновної енергетики у 2008–2009 рр., що узгоджуються з впливом глобальної фінансової кризи [15], та у 2020 і 2022 роках по ВВП, що відповідають періоду пандемії COVID-19 та російського вторгнення і супровідного уповільнення економічної активності [16].

У порівнянні з НР-фільтром, BW-фільтр виявляє вищу чутливість до короткострокових збурень, що дозволяє його вважати ефективним інструментом для оперативного моніторингу поточних ризиків у сфері ВДЕ. Такий підхід є доцільним при формуванні антикризових та адаптивних стратегій, спрямованих на підтримку сектору відновлюваної енергетики.

Обчислений коефіцієнт кореляції між циклічною компонентою ВДЕ та показником енергетичної ефективності (GDP per unit of energy use) становить $K = 0.763$, що свідчить про високий ступінь зв'язку між динамікою ВДЕ та загальним рівнем ефективності енергоспоживання в Україні. Такий результат підтверджує гіпотезу про системний вплив циклічності у сфері ВДЕ на макроекономічні показники, що потребує врахування в енергетичному плануванні.

Також, у межах емпіричного дослідження було застосовано асимптотично оптимальний фільтр Крістіано–Фіцджеральда (CF) для обробки показ-

ника частки електроенергії з відновлюваних джерел у загальному виробництві електроенергії в Україні. Цей підхід виявився особливо ефективним при роботі з короткими часовими рядами, дозволяючи водночас оцінити довгострокові та короткострокові зміни у структурі електрогенерації [17]. Результати фільтрації наведено на рисунку 3.

Трендова компонента (суцільна лінія) демонструє стійке зростання частки ВДЕ, що свідчить про поступову інтеграцію відновлюваних джерел у національну енергосистему та активне розширення потужностей у цій сфері. Така динаміка є підтвердженням стратегічної спрямованості енергетичної політики України на декарбонізацію та диверсифікацію джерел енергії [18; 19].

Циклічна компонента ВВП (пунктирна лінія) ілюструє два основні періоди спаду: перший – до 2010 року, що відображає наслідки глобальної фінансової кризи 2008–2009 років; другий – у 2020 році, пов'язаний із впливом пандемії COVID-19 на інвестиції, логістику та стабільність енергетичних проєктів. У період 2011–2014 років простежується фаза активного зростання, що збігається із запуском низки масштабних проєктів у сфері сонячної та вітрової енергетики, а також впровадженням стимулюючих механізмів, зокрема «зелених» тарифів [20].

Особливу увагу заслуговує значення коефіцієнта кореляції між трендом частки ВДЕ та показником енергоефективності (GDP per unit of energy use), яке становить $K = 0.83783$. Це найвище значення серед усіх розглянутих моделей, що вказує на сильний позитивний взаємозв'язок між розвитком відновлюваної енергетики та підвищенням

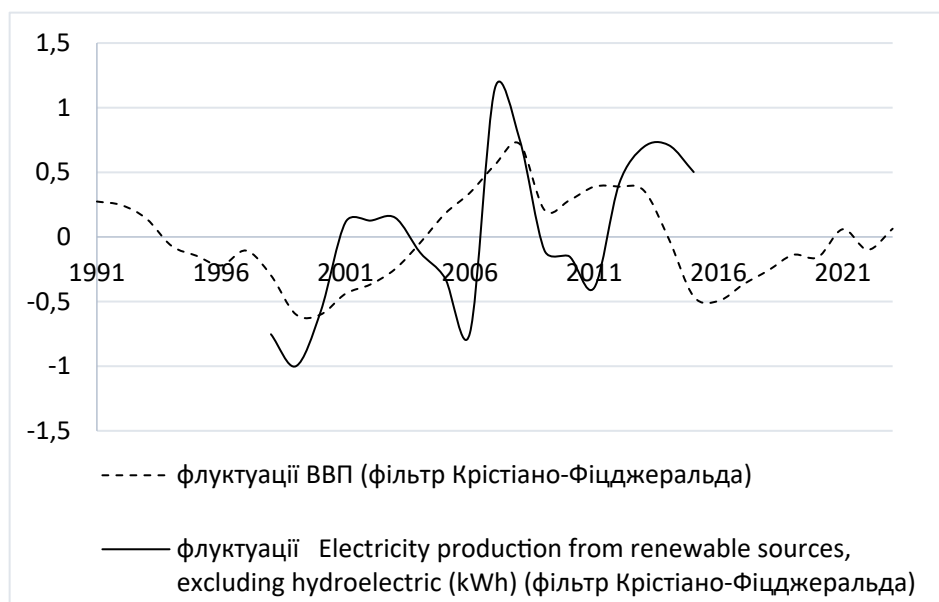


Рис. 3. CF-фільтр: тренд і цикл у динаміці частки відновлюваної електроенергії

ефективності використання енергії на макроекономічному рівні. Отримані результати узгоджуються з висновками попередніх досліджень щодо впливу ВДЕ на економічну стабільність, екологічну безпеку та інноваційну динаміку [21; 22].

Таким чином, результати, отримані з використанням трьох фільтраційних методів, дозволяють зробити низку висновків:

Сектор ВДЕ демонструє як довготривале зростання, так і виражені фази циклічності, що зумовлені як зовнішніми кризами (фінансова криза, пандемія, воєнний конфлікт), так і внутрішніми інституційними змінами.

Фільтр Годріка–Прескотта забезпечує загальну картину тренду та основних циклічних відхилень, проте менш чутливий до короткострокових коливань.

Фільтр Баттерворта показує більш детальну структуру короткотермінових збурень, що є корисним для тактичного реагування на динаміку галузі.

Фільтр Крістіано–Фіцджеральда дозволяє найточніше оцінити структурні зрушення в частці ВДЕ у загальному виробництві та виявляє найвищий рівень кореляції з енергетичною ефективністю.

Усі моделі підтверджують, що розвиток ВДЕ є не лише екологічно, а й економічно обґрунтованим напрямом, що сприяє зростанню енергоефективності країни.

Таким чином, багатофільтраційний підхід дозволяє комплексно оцінити циклічну динаміку сектору ВДЕ, виявити критичні періоди для регуляторного втручання та сформулювати більш точні прогнози для енергетичного планування в умовах посткризової реконструкції України.

Пропозиції. Результати емпіричного аналізу із застосуванням фільтраційних методів Ходріка–

Прескотта, Баттерворта та Крістіано–Фіцджеральда засвідчили наявність вираженої фазової динаміки розвитку відновлюваної енергетики в Україні. Виявлені циклічні коливання в динаміці виробництва електроенергії з ВДЕ, які збігаються з періодами фінансових криз (2009), політичної нестабільності (2014), пандемії COVID-19 (2020) та повномасштабної війни (2022), вимагають переходу до адаптивної моделі управління сектором. Така модель має бути чутливою до фаз циклу, базуватися на кількісному прогнозуванні і враховувати макроекономічні ризики.

1. Адаптивна політика підтримки сектору ВДЕ. Варто запровадити антициклічну модель стимулювання, яка активується у фазах спаду. Зокрема, в Україні 2022 року було ухвалено механізми компенсації нерозрахунків перед виробниками за «зеленим тарифом», що частково виконувало функцію антикризової підтримки. У подальшому такі механізми можуть бути закріплені як частина автоматизованої моделі підтримки, подібної до контрактів CfD (Contracts for Difference), які широко застосовуються у Великій Британії для мінімізації ринкових ризиків [23].

Місцеві проекти ВДЕ, наприклад, сонячні кооперативи у Вінницькій і Чернівецькій областях, демонструють вищу стійкість до воєнних загроз та логістичних збоїв. Це підтверджує доцільність масштабування децентралізованих джерел енергії, які потребують цільового регулювання й окремих програм підтримки [24; 25].

2. Інтеграція фазового прогнозування в управлінські рішення

Аналіз динаміки 2010–2022 рр. показав, що фази спаду виробництва з ВДЕ часто передували або збігалися з макроекономічними спадами.

Проте на державному рівні такі зміни не враховувалися у прогнозуванні або регуляторних рішеннях. Впровадження цифрових інструментів прогнозування на основі фільтраційних методів дасть змогу реагувати на фазові коливання, а не лише на ретроспективні дані.

Прикладом такої практики є платформа REN21 (Франція), яка об'єднує прогнозні дані та політичні сценарії для формування рекомендацій щодо політики у сфері ВДЕ. Її функціонал може бути частково адаптований для створення української платформи циклічного аналізу ВДЕ [26].

3. Розвиток фінансових інструментів, стійких до фазових збурень

У періоди ринкової нестабільності вітчизняні інвестори стикаються з обмеженим доступом до фінансування. У 2020–2022 рр. кількість кредитних ліній під проекти ВДЕ значно скоротилася. У цьому контексті перспективним є запровадження «зелених» облігацій, як це реалізовано в Польщі, Литві та Чехії. У 2021 р. компанія Elementum Energy в Україні анонсувала перший приватний випуск таких облігацій, що стало важливим кроком до створення внутрішнього ринку сталого фінансування [27].

Також прикладом є участь ЄБРР у фінансуванні приватного вітроенергетичного проекту із компонентом страхування воєнних ризиків – механізм, який варто масштабувати в умовах війни [28].

4. Інтеграція відновлюваної енергетики з політикою енергоефективності.

За результатами аналізу методом CF-фільтра встановлено сильну кореляцію між розвитком ВДЕ та покращенням енергоефективності. У цьому контексті доцільно поєднувати політики «зеленого переходу» та декарбонізації, зокрема через проекти, які водночас зменшують попит на енергію та стимулюють її чисте виробництво.

Прикладом є пілотний проект реконструкції дитячих садків та шкіл у Житомирській області з використанням СЕС, теплоізоляції та інтелектуальних систем освітлення, реалізований у співпраці з GIZ. Подібні рішення є зразком інтегрованого підходу, який варто закріпити на нормативному рівні [29].

5. Цифровізація процесів моніторингу та управління

В умовах воєнного часу актуальним є створення цифрової системи аналітики для регуляторів, яка б дозволяла в реальному часі відслідковувати фазові зміни в розвитку ВДЕ, зміни в ринковому попиті, інвестиційних потоках та ризиках. Прототипом такої системи може слугувати інформаційна платформа IRENASTAT, яка поєднує статистику, прогнозні моделі та відображення циклічних індикаторів [30].

На національному рівні доцільно створити мультиагентну платформу, яка б інтегрувала

Міненерго, НКРЕКП, Держенергоефективності, банки розвитку, міжнародні агенції та місцевих розробників.

Таким чином, запропоновані заходи є не лише теоретично обґрунтованими, а й підтвердженими прикладами успішної реалізації як в Україні, так і в країнах ЄС. Їх реалізація дозволить трансформувати розвиток ВДЕ в Україні в більш стійку, циклічно стабільну та економічно ефективну модель, здатну витримувати екзогенні шоки та сприяти післявоєнному відновленню держави.

Висновки із зазначених проблем і перспективи подальших досліджень у поданому напрямі. Результати дослідження підтвердили наявність вираженої циклічної природи розвитку відновлюваної енергетики в Україні, що проявляється у фазовій змінності показників виробництва та частки ВДЕ в загальному енергобалансі. Такі коливання тісно корелюють з етапами макроекономічної нестабільності, трансформаціями регуляторного середовища, зовнішньополітичними ризиками та шокowymi подіями глобального або національного масштабу.

Це свідчить про те, що розвиток ВДЕ не є суто лінійним процесом, який можна стимулювати виключно постійним збільшенням інвестицій чи прямим регулюванням. Навпаки, він вимагає системного, адаптивного управління, що враховує фазову структуру енергетичних бізнес-циклів. Таке управління має ґрунтуватися на вчасному виявленні фаз спаду чи підйому, їх прогнозуванні за допомогою кількісних інструментів (НР, BW, CF-фільтри), а також гнучкому коригуванні політики підтримки залежно від кон'юнктури.

Особливу увагу слід приділити інерційності трендової динаміки: навіть у періоди економічного спаду зберігається позитивний вектор розвитку, що демонструє потенціал ВДЕ до швидкої адаптації та відновлення. Це є свідченням стратегічної доцільності переорієнтації енергосистеми на децентралізовані, стійкі до ризиків джерела генерації.

Установлений високий рівень кореляції між розвитком ВДЕ та енергетичною ефективністю (зокрема, за CF-фільтром) підтверджує, що зростання частки «зеленої» генерації не лише екологічно виправдане, а й економічно ефективне, оскільки супроводжується зниженням енергоємності економіки та підвищенням макропродуктивності.

Запропоновані у дослідженні інституційні, фінансові та прогнозні механізми (антициклічне регулювання, сценарне моделювання, інтеграція з політикою енергоефективності, цифровий моніторинг) мають стати основою для нової моделі енергетичного управління в Україні – більш стійкої, адаптивної та інноваційної. Така модель дозволить не лише згладжувати негативні ефекти циклічних спадів, а й ефективно

використовувати фази підйому для стратегічного прориву у сфері ВДЕ.

У контексті післявоєнної відбудови енергетичної системи України це дослідження має практичну значущість. В умовах зруйнованої централізованої інфраструктури, посилення енергетичної автономії громад і регіонів, загострення викликів енергетичної безпеки та кліматичних зобов'язань перед ЄС, адаптивне управління бізнес-циклами у сфері ВДЕ

має стати одним з фундаментальних напрямів державної політики. Лише така стратегія забезпечить довгострокову енергетичну трансформацію України, що базується на принципах стійкості, інклюзивності та технологічного прогресу.

Отримані висновки мають прикладне значення для розроблення політик енергетичного переходу, підтримки зеленої економіки та довгострокового планування у сфері екологічно орієнтованої економіки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. BDO в Україні: День енергії 2025 Відновлення, інвестиції та стратегія енергетичного переходу України. URL: <https://eba.com.ua/en/bdo-v-ukrayini-energy-day-2025-vidnovlennya-investytsiyi-ta-strategiya-energetychnoyi-transformatsiyi-ukrayiny/>
2. Implementation of the National Energy and Climate Plan by 2030. BDO Україна, 2025. URL: <https://www.bdo.ua/en-gb/insights-1/information-materials/2025/implementation-of-the-national-energy-and-climate-plan-by-2030/>
3. Гармаш О. ЄБРР планує інвестувати щонайменше 1,56 млрд доларів у постраждалу від війни економіку України цього року. Reuters. 6 лютого 2025. URL: <https://www.reuters.com/world/europe/ebd-plans-invest-least-156-bln-ukraines-war-hit-economy-this-year-2025-02-06/>
4. Robert J. Hodrick, Edward C. Prescott. Post-War U.S. Business Cycles: An Empirical Investigation. *Northwestern University. Discussion Paper #451*. May 1981. 26 p.
5. Hodrick Robert, and Edward C. Prescott, "Postwar U.S. Business Cycles: An Empirical Investigation". *Journal of Money, Credit, and Banking*. 1997. Available at: <https://business.columbia.edu/sites/default/files-efs/pubfiles/205/post-war.pdf>
6. Pollock D. S. G. (2000). Trend estimation and de-trending via rational square-wave filters. *Journal of Econometrics*. 2000. Vol. 99. P. 317–334. URL: <https://ideas.repec.org/a/eee/econom/v99y2000i2p317-334.html>
7. Gomez V. The Use of Butterworth Filters for Trend and Cycle Estimation in Economic Time Series. *Journal of Business & Economic Statistics*. 2001. Vol. 19. Issue 3. P. 365–73. DOI: <https://doi.org/10.1198/073500101681019909>
8. Christiano L. J., Fitzgerald T. J. The band pass filter. *International Economic Review*. 2003. Vol. 44. P. 435–465. DOI: <https://doi.org/10.1111/1468-2354.t01-1-00076>
9. Держенергоефективності. Національний звіт щодо розвитку відновлюваної енергетики в Україні у 2022 році. Київ, 2023. URL: <https://saec.gov.ua>
10. IRENA. Renewable Energy Market Analysis: Southeast Europe. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2021.
11. «Зелені» інвестиції у сталому розвитку: світовий досвід та український контекст. Центр Разумкова, 2019. URL: https://razumkov.org.ua/uploads/article/2019_ZELEN_INVEST.pdf
12. World Bank. Energy use (kg of oil equivalent) per \$1,000 GDP (constant 2017 PPP). URL: <https://data.worldbank.org/indicator/EG.GDP.PUSE.KO.PP>
13. Світовий банк. (2015). *Ukraine Economic Update*. URL: <https://www.worldbank.org/uk/country/ukraine>
14. Рябцев Г. Л. Національний інститут стратегічних досліджень листопад 2018 р. Актуальні виклики та загрози енергетичній безпеці України. URL: <https://niss.gov.ua/sites/default/files/2019-01/111Zagrozi---AZ-%28fin%29-40cb6.pdf>
15. Reinhart C. M., Rogoff K. S. The Aftermath of Financial Crises. *American Economic Review*. 2009. Vol. 99(2). P. 466–472.
16. International Energy Agency (IEA). (2021). Renewables 2021 – Analysis and forecast to 2026. URL: <https://iea.org/reports/renewables-2021>
17. Christiano L. J., Fitzgerald T. J. The Band Pass Filter. *International Economic Review*. 2003. Vol. 44(2). P. 435–465. DOI: <https://doi.org/10.1111/1468-2354.t01-1-00076>
18. IRENA. (2021). Renewables Readiness Assessment: Ukraine. International Renewable Energy Agency. URL: <https://www.irena.org/Energy-Transition/Country-engagement/RRA>
19. Держенергоефективності (2023). Звіт про реалізацію політики енергоефективності та ВДЕ в Україні. Київ: Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України. URL: <https://saec.gov.ua/news/publicnii-zvit-golovi-derzenergoefektivnosti-za-2022-rik>
20. SEU (State Enterprise "Ukrenergo"). (2019). Report on the State of the Renewable Energy Sector in Ukraine.
21. IRENA. (2020). Renewable Energy and Jobs – Annual Review 2020. International Renewable Energy Agency. URL: https://www.developmentaid.org/api/frontend/cms/file/2020/09/IRENA_RE_Jobs_2020.pdf
22. Proposals for a green recovery in Ukraine. Green Deal Ukraine (GDU) – 2024. URL: <https://greendealukraina.org/assets/images/reports/hlwg-gdu-1.pdf>
23. Contracts for Difference (CfD) scheme / UK Government. URL: <https://www.gov.uk/government/publications/contracts-for-difference>
24. Ковалишена Ю. Енергія сонця: скільки підприємств Вінниці встановили сонячні панелі та що це означає для міста. Суспільне Новини. 2024. 4 березня. URL: <https://suspilne.media/597888-energia-sonca-skilki-pidpriemstv-vinnici-vstanovili-sonacni-paneli-ta-so-ce-oznacae-dla-mista/>

25. Олійник М. Одна з областей, де найбільше: скільки жителів Чернівецької області мають сонячні станції. Суспільне Чернівці. 2024. 8 листопада. URL: <https://suspilne.media/chernivtsi/875581-odna-z-oblastej-de-najbilse-skilki-ziteliv-cherniveckoi-oblasti-maut-sonacni-stancii/>
26. REN21 Renewables Now. URL: <https://www.ren21.net>
27. Стратегія розвитку «зеленої» енергетики компанії Elementum Energy. URL: <https://elementum.energy/projects/>
28. Bennett V. €157 million finance package for private Ukraine wind farms / European Bank for Reconstruction and Development. 2025. 3 квітня. URL: <https://www.ebrd.com/home/news-and-events/news/2025/-157-million-finance-package-for-private-ukraine-wind-farms--.html>
29. Житомирщина – регіон енергоефективних інновацій: енергоефективні школи та садочки. Проєкт GIZ. URL: <https://www.giz.de/en/worldwide/39462.html>
30. IRENASTAT: Renewable Energy Statistics Data Portal. International Renewable Energy Agency. URL: <https://www.irena.org/Statistics/View-Data-by-Topic/Capacity-and-Generation/Technologies>

REFERENCES

1. BDO v Ukraini: Den enerhii 2025 – Vidnovlennia, investysii ta stratehiia enerhetychnoho perekhodu Ukrainy [BDO in Ukraine: Energy Day 2025 Recovery, Investment and Ukraine's Energy Transition Strategy]. Available at: <https://eba.com.ua/en/bdo-v-ukrayini-energy-day-2025-vidnovlennya-investysii-ta-strategiya-energetychnoyi-transformatsiyi-ukrayiny/>
2. Implementation of the National Energy and Climate Plan by 2030. BDO Ukraine, 2025. Available at: <https://bdo.ua/en-gb/insights-1/information-materials/2025/implementation-of-the-national-energy-and-climate-plan-by-2030/>
3. Harmash O. YeBRR planuie investuvaty shchonaimenshe 1,56 mlrd dolariv u postrazhdalu vid viiny ekonomiku Ukrainy tsoho roku [EBRD plans to invest at least \$1.56 billion in Ukraine's war-torn economy this year]. Reuters. 6 liutoho 2025. Available at: <https://www.reuters.com/world/europe/ebd-plans-invest-least-156-bln-ukraines-war-hit-economy-this-year-2025-02-06/>
4. Robert J. Hodrick, Edward C. Prescott. Post-War U.S. (1981) Business Cycles: An Empirical Investigation. *North-western University. Discussion Paper #451*, 26 p.
5. Hodrick Robert, and Edward C. (1997) Prescott, "Postwar U.S. Business Cycles: An Empirical Investigation". *Journal of Money, Credit, and Banking*. Available at: <https://business.columbia.edu/sites/default/files-efs/pubfiles/205/post-war.pdf>
6. Pollock D. S. G. (2000). Trend estimation and de-trending via rational square-wave filters. *Journal of Econometrics*, vol. 99, pp. 317–334. Available at: <https://ideas.repec.org/a/eee/econom/v99y2000i2p317-334.html>
7. Gomez V. (2001) The Use of Butterworth Filters for Trend and Cycle Estimation in Economic Time Series. *Journal of Business & Economic Statistics*, vol. 19, issue 3, 365–73. DOI: <https://doi.org/10.1198/073500101681019909>
8. Christiano L. J., Fitzgerald T. J. (2003). The band pass filter. *International Economic Review*, vol. 44, pp. 435–465. DOI: <https://doi.org/10.1111/1468-2354.t01-1-00076>
9. Derzhenerhoefektyvnosti. Natsionalnyi zvit shchodo rozvytku vidnovliuvanoi enerhetyky v Ukraini u 2022 rotsi [State Agency for Energy Efficiency. National report on the development of renewable energy in Ukraine in 2022]. Kyiv, 2023. Available at: <https://sae.gov.ua>
10. IRENA. Renewable Energy Market Analysis: Southeast Europe. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2021.
11. "Zeleni" investysii u stalomu rozvytku: svitovyi dosvid ta ukraïnskyi kontekst ["Green" investments in sustainable development: global experience and Ukrainian context]. Tsentrazumkova, 2019. Available at: https://razumkov.org.ua/uploads/article/2019_ZELEN_INVEST.pdf
12. World Bank. Energy use (kg of oil equivalent) per \$1,000 GDP (constant 2017 PPP). URL: <https://data.worldbank.org/indicator/EG.GDP.PUSE.KO.PP>
13. Svitovyi bank. (2015). Ukraine Economic Update. Available at: <https://www.worldbank.org/uk/country/ukraine>
14. Riabtsev H. L. Natsionalnyi instytut stratehichnykh doslidzhen lystopad 2018 r [National Institute for Strategic Studies November 2018]. Aktualni vyklyky ta zahrozy enerhetychnii bezpetsi Ukrainy. Available at: <https://niss.gov.ua/sites/default/files/2019-01/111Zagrozi---AZ-%28fin%29-40cb6.pdf>
15. Reinhart C. M., Rogoff K. S. (2009). The Aftermath of Financial Crises. *American Economic Review*, vol. 99(2), pp. 466–472.
16. International Energy Agency (IEA). (2021). Renewables 2021 – Analysis and forecast to 2026. Available at: <https://www.iea.org/reports/renewables-2021>
17. Christiano L. J., Fitzgerald T. J. (2003). The Band Pass Filter. *International Economic Review*, vol. 44(2), pp. 435–465. DOI: <https://doi.org/10.1111/1468-2354.t01-1-00076>
18. IRENA. (2021). Renewables Readiness Assessment: Ukraine. International Renewable Energy Agency. Available at: <https://www.irena.org/Energy-Transition/Country-engagement/RRA>
19. Derzhenerhoefektyvnosti (2023). Zvit pro realizatsiiu polityky enerhoefektyvnosti ta VDE v Ukraini [Report on the implementation of energy efficiency and renewable energy policies in Ukraine]. Kyiv: Derzhavne ahentstvo z enerhoefektyvnosti ta enerhozberezhennia Ukrainy. Available at: <https://sae.gov.ua/news/publicnii-zvit-golovi-derzen-ergoefektyvnosti-za-2022-rik>
20. SEU (State Enterprise "Ukrenergo"). (2019). Report on the State of the Renewable Energy Sector in Ukraine.

21. IRENA. (2020). Renewable Energy and Jobs – Annual Review 2020. International Renewable Energy Agency. Available at: https://www.developmentaid.org/api/frontend/cms/file/2020/09/IRENA_RE_Jobs_2020.pdf
22. Proposals for a green recovery in Ukraine. Green Deal Ukraine (GDU) – 2024. URL: <https://greendealukraine.org/assets/images/reports/hlwg-gdu-1.pdf>
23. Contracts for Difference (CfD) scheme. UK Government. Available at: <https://gov.uk/government/publications/contracts-for-difference>
24. Kovalyshena Yu. (2024) Enerhiia sontsia: skilky pidpriemstv Vinnytsi vstanovyly soniachni paneli ta shcho tse oznachaie dlia mista [Solar energy: how many Vinnytsia enterprises have installed solar panels and what this means for the city]. Suspilne Novyny. 2024. 4 bereznia. URL: <https://suspilne.media/597888-energia-sonca-skilki-pidpriemstv-vinnici-vstanovili-sonacni-paneli-ta-so-ce-oznacae-dlia-mista/>
25. Oliynyk M. Odnа z oblastei, de naibilshe: skilky zhyteliv Chernivetskoi oblasti maiut soniachni stantsii [One of the regions with the most: how many residents of Chernivtsi region have solar stations] Suspilne Chernivtsi. 2024. 8 lystopada. Available at: <https://suspilne.media/chernivtsi/875581-odna-z-oblastej-de-najbilshe-skilki-ziteliv-cerniveckoi-oblasti-maut-sonacni-stancii/>
26. REN21 Renewables Now. Available at: <https://www.ren21.net>
27. Stratehiia rozvytku “zelenoi” enerhetyky kompanii Elementum Energy [Elementum Energy's green energy development strategy]. Available at: <https://elementum.energy/projects/>
28. Bennett V. €157 million finance package for private Ukraine wind farms. European Bank for Reconstruction and Development. 2025. 3 kvitnia. Available at: <https://www.ebrd.com/home/news-and-events/news/2025/-157-million-finance-package-for-private-ukraine-wind-farms--.html>
29. Zhytomyrshchyna – rehion enerhoefektyvnykh innovatsii: enerhoefektyvni shkoly ta sadochky [Zhytomyr region – a region of energy-efficient innovations: energy-efficient schools and kindergartens]. Proiekt GIZ. Available at: <https://www.giz.de/en/worldwide/39462.html>
30. IRENASTAT: Renewable Energy Statistics Data Portal / International Renewable Energy Agency. Available at: <https://www.irena.org/Statistics/View-Data-by-Topic/Capacity-and-Generation/Technologies>

Volodymyr Lubchak, Oleksandr Kubatko, Nataliia Barchenko, Sumy State University; Lyudmila Kalinichenko, V.N. Karazin Kharkiv National University; Nataliya Martynova, Sumy State University. Business cycle modeling in the renewable energy sector of Ukraine: filtering and forecasting approaches.

Annotation. This article explores the phase dynamics of Ukraine's renewable energy development in the context of structural transformations, regulatory shifts, and external shocks. The study applies a set of time series filtering techniques – Hodrick-Prescott, Butterworth, and Christiano-Fitzgerald filters – to decompose the dynamics of renewable electricity generation into trend and cyclical components using annual data from 2000 to 2022. The HP filter outlines long-term growth, while the BW filter reveals high-frequency fluctuations associated with short-term shocks such as financial crises, war, and the COVID-19 pandemic. The CF filter, which is particularly effective with short samples, identifies structural shifts in the share of renewables in electricity generation and shows a strong correlation ($K = 0.8378$) with energy efficiency indicators. The analysis confirms the presence of pronounced business cycles in the renewable energy sector and highlights the necessity of adaptive governance sensitive to phase changes. Based on the results, the authors propose a strategic framework for anti-cyclical policy support, including mechanisms like Contracts for Difference, local project stimulation, digital monitoring platforms, and integration with energy efficiency programs. Special attention is given to the resilience and decentralization potential of renewables, particularly in post-war recovery scenarios. **The findings** offer valuable insights for long-term planning, sustainable financing, and resilience-building in Ukraine's energy transition.

Keywords: renewable energy; energy efficiency; Hodrick-Prescott filter; Butterworth filter; Cristiano-Fitzgerald filter; adaptive control; sustainable development strategy.