

DOI : 10.33274/2079-4819-2024-80-1-58-74

JEL : C49, Q40

УДК 519.7:620.9(477)

Єлісєєва О. К.,
доктор екон. наук,
професор

Дніпровський національний університет
імені Олеся Гончара
Дніпро, Україна,

e-mail: yelisyeyeva.o@ef.dnu.edu.ua

Лижник Ю. Б.,
старший викладач

Донецький національний університет економіки
і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського,
м. Кривий Ріг, Україна,

e-mail: lyzhnyk_ub@donnuet.edu.ua

ЕКОНОМІКО-МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОЗВИТКУ ВІДНОВЛЮВАЛЬНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ УКРАЇНИ

UDC 519.7:620.9(477)

Yelisieieva O. K.,
Grand PhD in Economic sciences,
Professor
Lyzhnyk Yu. B.,
Senior Lecturer

Oles Honchar Dnipro National University,
Dnipro, Ukraine

e-mail: yelisyeyeva.o@ef.dnu.edu.ua

Mykhailo Tuhan-Baranovskyi Donetsk
National University of Economics and Trade,
Kryvyi Rih, Ukraine,
e-mail: lyzhnyk_ub@donnuet.edu.ua

ECONOMIC AND MATHEMATICAL MODELING OF THE RENEWABLE ENERGY DEVELOPMENT IN UKRAINE

Мета. Метою статті є застосувати економіко-математичні моделі для аналізу, моделювання та прогнозування розвитку відновлюваної енергетики в Україні, оцінки потенціалу відновлюваних джерел енергії країни.

Методи. Для моделювання та прогнозування розвитку відновлюваної енергетики в Україні було використані наступні методи: кореляційний та актокореляційний аналіз (для виявлення зв'язків між макроекономічними показниками України та розвитком відновлюваної енергетики в країні); трифакторне авторегресійне і мультиплікативне прогнозування та п'ятифакторне регресійне прогнозування (для прогнозування показників відновлюваної енергетики України); основи математичного апарату аналізу перехідних процесів, методологію визначення коефіцієнтів імпульсно-перехідної та перехідної функцій, методи побудови диференціальних моделей, перетворення по Лапласу та отримання перехідних функцій, основи математики уявних величин, методи отримання амплітудно-фазових та частотних характеристик досліджуваного об'єкту, методи аналізу стійкості керованих динамічних процесів (для представлення показнику Total renewable energy у вигляді динамічного перехідного процесу та моделювання його майбутніх станів за допомогою отримання диференційного рівняння другого порядку з простим входом, комплексної передавальної функції та шляхом визначення амплітудно-фазової частотної характеристики і побудови частотного годографа Найквіста, що показав стійкість досліджуваного процесу до зовнішніх збурень).

Результати. Прогнозування встановлених потужностей та обсягів виробництва відновлюваної енергетики є важливим завданням для ефективного розвитку цієї галузі. Пропонується новий підхід до прогнозування, що поєднує авторегресійні і багатфакторні регресійні моделі та динамічне моделювання.

Розвиток потужності відновлюваної енергетики розглядався як динамічний перехідний процес, що був представлений складною передавальною функцією її дійсною частотною характеристикою та її уявною частотною характеристикою, що використовувались для побудови годографа Найквіста, що показав стійкість досліджуваного процесу розвитку потужності відновлюваної енергетики від інвестиційних вкладень.

За результатами проведеного моделювання на основі методики перехідних процесів була отримана модель зміни обсягу встановлених потужностей відновлювальної енергетики України в залежності від обсягів інвестицій у відновлювану енергетику у вигляді диференційного рівняння та з'ясовано, що цей процес є сталим, тобто навіть при тимчасових обмеженнях або зменшеннях такого інвестування з часом він буде повертатися до стабільного зростаючого тренду.

Запропонований метод динамічного моделювання дозволяє отримати більш точні та надійні прогнози розвитку потужності відновлюваної енергетики, порівняно з традиційними методами. Цей метод може бути використаний для прийняття обґрунтованих рішень щодо розвитку сонячної енергетики та інвестування в цю галузь в Україні.

Ключові слова: відновлювальна енергетика, відновлювані джерела енергії, моделювання економічної динаміки, перехідні процеси, імпульсна функція, імпульсно-перехідна функція, передавальна функція, диференційні рівняння, сталість економічних об'єктів.

Постановка проблеми. Починаючи з 2010р. спостерігається стрімке зростання та успішний розвиток відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) в енергетичному секторі. Цей тренд підтверджується рекордними темпами введення нових потужностей ВДЕ, що свідчить про визнання багатьма країнами світу важливості переходу до більш сталого та екологічно чистого енергопостачання. Сонячна та вітрова енергія залишаються лідерами серед ВДЕ, складаючи близько 90% від загального приросту потужностей у цій сфері. Це підкреслює їх значний потенціал для подальшого зростання та розвитку. Зростаючий попит на чисту енергію з боку споживачів та корпорацій також стимулює перехід до ВДЕ. Багато компаній у різних галузях впроваджують ВДЕ у свою стратегію корпоративної соціальної відповідальності та сталого розвитку.

Одним із ключових факторів прискорення переходу на ВДЕ є збільшення інвестицій, в тому числі в країнах, що розвиваються. Також важливо розробити ефективні механізми підтримки та стимулювання ВДЕ, включаючи скасування субсидій на викопне паливо та впровадження ціноутворення на викиди вуглецю. Важливу роль відіграють технологічні прориви та розробка ефективних систем зберігання енергії, що забезпечать надійність та гнучкість ВДЕ. Необхідно також

підвищувати громадську обізнаність про переваги ВДЕ та їх вплив на довкілля.

Збільшення встановлених потужностей ВДЕ є позитивним трендом, але для досягнення нульових викидів до 2050 року потрібні більш суттєві зусилля, що потребує не тільки збільшення встановлених потужностей ВДЕ та зростання обсягів інвестицій у їх розвиток, але й вимагає застосування сучасних економіко-математичних моделей для аналізу, моделювання та прогнозування розвитку відновлюваної енергетики.

Важливо розробляти та впроваджувати доступні та економічно вигідні енергетичні технології та рішення для всіх країн і регіонів, але особливо актуальним це питання є для України в умовах енергетичної кризи, спровокованої воєнними діями та нагальною необхідністю пошуку нових джерел енергії та підвищення рівня диверсифікації енергетичних потужностей, в тому числі, за рахунок розвитку ВДЕ. Проведення економіко-математичного моделювання та виконання прогнозування показників відновлюваної енергетики є важливим завданням для досягнення ефективного розвитку цієї галузі.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Одним з перших авторів, хто досліджував методологію моделювання динамічних процесів був В. Хеммінг, який окреслив основні напрями застосування

моделювання перехідних процесів шляхом обчислення динамічних характеристик [1].

Застосування методів і принципів моделювання економічної динаміки, особливо, методології моделювання перехідних процесів для економічних явищ і об'єктів, залишається відносно малодослідженою сферою. Основоположником цього напрямку в Україні був академік О. М. Марюта [2-4], який запропонував використовувати методики аналізу технічних процесів для дослідження соціально-економічних об'єктів та процесів. Його ідеї знайшли продовження в роботі І. Костецької [6], що розглядала використання цих методів для удосконалення процесів бізнес-планування.

У подальшому О. Половцев [6] обґрунтував доцільність використання об'єктно-орієнтованого підходу для опису соціально-економічних систем. І. М. Вергунова [7] окреслила особливості системного підходу як методології, що допомагає вирішувати задачі концептуального та формалізованого представлення об'єктів як систем, а також побудови моделей різного рівня і класу.

Окремої уваги заслуговує робота Йонна Кілстама та Крістера Торнквіста, в якій розглядаються проблеми сталого розвитку суспільства, конфлікт між екологією та економікою, роль корпоративної соціальної відповідальності бізнесу та великих корпорацій у вирішенні глобальної кліматичної кризи [8].

Д. Хелм [9] займався дослідженням енергетичної політики, зокрема аспектів безпеки постачання, стійкості та конкуренції. Його роботи зосереджувалися на аналізі політик, які могли б забезпечити стабільне та конкурентне енергопостачання.

Стосовно розробок у сфері моделювання показників енергетичної галузі варто виділити роботи Г. Г. Хантінгтон, Дж. Вейант та Дж. Л. Суїні [10], які досліджували моделювання енергетичних систем для кращого розуміння процесів, а не лише для отримання точних цифр. Вони використовували досвід форуму енергетичного моделювання, щоб розвивати моделі, які могли б допомогти у розумінні складних енергетичних систем та процесів.

На підвищенні цінності енергетичного моделювання фокусувалися Дж. А. Лейтнер, С. Дж. ДеКенію, Дж. Г. Кумі та А. Н. Санстанд [11], що створювали моделі, що допомагали у формуванні ефективної енергетичної стратегії та розробці політик, спрямованих на підвищення ефективності енергетичних систем.

А. Піна, К. Сільва та П. Феррао [12] спеціалізувалися на моделюванні погодинної динаміки електроенергії. Їхні дослідження сприяли розробці довгострокових енергетичних сценаріїв, що могли б допомогти у формуванні політики для стабільного енергопостачання в майбутньому.

У працях зазначених науковців значна увага приділяється методам аналізу впровадження ВДЕ, оскільки енергетична політика передбачає довгострокове стратегічне планування на всіх рівнях державного управління.

Розробкою моделей прогнозування енергії на основі інженерної економіки займалися Е. Воррел, С. Рамезол та Г. Бойд [13], які досягли значних успіхів у цій галузі, створюючи моделі, що допомагали прогнозувати майбутні потреби в енергії та розробляти відповідні стратегії для їх задоволення.

Проте варто зазначити недостатню кількість наукових досліджень саме в сфері економіко-математичного моделювання та прогнозування розвитку відновлюваної енергетики України.

Мета статті – застосувати економіко-математичні моделі для аналізу, моделювання та прогнозування розвитку відновлюваної енергетики в Україні, оцінки потенціалу відновлюваних джерел енергії країни.

Виклад основного матеріалу дослідження. Розвиток відновлювальної енергетики є надзвичайно важливим з екологічної, економічної та стратегічної точок зору. Перехід до джерел енергії, які не вичерпуються та не забруднюють навколишнє середовище, сприяє зменшенню викидів парникових газів та збереженню природних ресурсів. Крім того, це сприяє розвитку нових технологій, створенню

робочих місць у зеленому секторі, зниженню енергозалежності та зміцненню енергетичної безпеки країни [14].

Розвиток стратегій розвитку енергетики та планування впровадження ВДЕ, збільшення частки спільного виробництва енергії повинні включати важливі принципи екологічної прийнятності, розвитку конкурентних та доступних енергетичних ринків в умовах енергетичної безпеки та незалежності країн, розвитку енергоефективності та створення енергетичних резервів [15].

Визначення оптимальних напрямків розвитку енергетики на макrorівні потребує розробки та застосування ефективних методів визначення залежностей та зв'язків між різними елементами енергосистеми економіки країни, зв'язків з іншими країнами, впливу зовнішніх факторів та прогнозування розвитку такої системи [12, 15].

Такі методи мають стосуватися як розрахунку показників, так і розробки рекомендацій щодо політики розвитку енергетичного сектору на міжнародному, європейському, національному та місцевому рівнях, визначення попиту та пропозиції на енергетичному ринку, оцінки впливу енергетики на навколишнє середовище та здоров'я людини, взаємодії енергетики та довкілля [9, 15].

Сьогодні у всьому світі більш доступними стали капіталомісткі та довгострокові енергетичні проекти. Розуміння важливості зміни клімату потребує довгострокового планування наслідків використання енергії загалом та впровадження ВДЕ, що призводить до розвитку методів довгострокового аналізу та прогнозування [11, 15].

Глобальні інвестиції у ВДЕ у 2022 році досягли рекордних 732 млрд. дол. Світовий обсяг встановлених потужностей ВДЕ у 2022 році зріс на 24% порівняно з 2021 роком. За прогнозами The International Energy Agency (IEA), частка ВДЕ у світовому виробництві електроенергії зросте з 28% у 2022 році до 40% у 2030р. [16].

Важливо зазначити, що ВДЕ не є єдиним джерелом енергії. Інші джерела, такі як гідроенергетика, ядерна енергетика та

використання викопного палива, також відіграють важливу роль в енергетичній безпеці та сталості. Розвиток ВДЕ не повинен перешкоджати доступу до енергії для країн, що стикаються з енергетичними обмеженнями.

До повномасштабного вторгнення встановлена потужність відновлюваної енергетики (ВДЕ) України становила близько 10 ГВт. З початком повномасштабного вторгнення приріст потужностей відновлюваної енергетики України різко скоротився, значна частина сонячних електростанцій була розташована на тимчасово окупованих територіях Півдня України та наразі фізично втрачена [17].

До початку повномасштабного вторгнення в Україні активно впроваджувалися заходи, спрямовані на більш широке впровадження відновлювальної енергетики, проте наразі для України більш актуальним є питання не подальшого розвитку відновлюваної енергетики, а захист та збереження наявних потужностей та відновлення пошкоджених або зруйнованих внаслідок воєнних дій [18].

При економіко-математичному прогнозуванні економічних явищ та процесів для підвищення точності отриманого прогнозу, якості моделі та розширення перспектив її застосування на практиці важливе значення має вибір впливових факторів при побудові моделі. При цьому виникає необхідність виключення взаємовпливових факторів; пошуку опосередкованого впливу на показник через треті невизначені фактори та проблема отримання прогнозних значень на майбутні періоди – якщо статистика по впливовим факторам відома лише по минулим і поточному періоду [19].

Однак, застосування саме авторегресійних прогнозних моделей дозволяє одночасно вирішити всі ці три задачі, оскільки спирається на дослідження попередніх значень основного показника та, в залежності від результатів автокореляційного аналізу, розбивку його на кілька умовних змінних для отримання багатфакторних прогнозних моделей.

У попередніх періодах на цільовий досліджуваний показник впливали всі ті ж

самі встановлені та невстановлені фактори, що продовжують свою дію і в майбутньому. Отже, самі значення показника вже формуються під дією всіх впливових факторів, таким чином враховуючи їх. Крім того, оскільки авторегресійні моделі у якості впливових змінних розглядають масив попередніх значень показника, на їх основі можна розрахувати наступне значення, додати його у масив статистичних даних та рекурсійно застосувати отриману математичну модельну залежність для прогнозування на наступні періоди [19].

Для побудови багатофакторних регресійних моделей у якості впливових показників було обрано наступні макроекономічні показники України за період 2010-2022, за даними Державного Комітету статистики України[20]:

1. Номінальний ВВП, млн. грн.
2. Експорт, млн грн
3. Імпорт, млн. грн.
4. Реальний ВВП, млн. грн.
5. ВВП на душу населення, грн
6. ВВП на душу населення, дол.
7. Споживчі витрати, млн. грн.
8. Валове нагромадження, млн.грн.
9. Обсяг реалізованої продукції промисловості, млн. грн.
10. Капітальні інвестиції, млн.грн.

Загалом, макроекономічні показники можуть бути важливими джерелами інформації для прогнозування розвитку відновлюваної енергетики, адже вони відображають стан економіки та політичні рішення, які можуть впливати на цей сектор. Макроекономічні показники, такі як ВВП (валовий внутрішній продукт), інвестиції та споживчі витрати, мають великий вплив на попит на енергію. Зростання ВВП часто супроводжується збільшенням споживання енергії, а отже, і попитом на відновлювану енергію.

Макроекономічні показники відображають складові енергетичної політики країни. Наприклад, уряд може вирішити стимулювати розвиток відновлюваної енергетики, надаючи фінансові пільги, спрощуючи регулювання або зменшуючи податки на цей сектор. Це знаходить своє відображення у макроекономічних показниках.

Крім того, макроекономічні показники можуть вказувати на технологічний розвиток та інновації, що сприяють підвищенню ефективності відновлюваної енергетики та зниженню її вартості. Макроекономічні показники також дозволяють враховувати глобальні тенденції у сфері енергетики, такі як зміни цін на нафту, газ, а також рішення міжнародних організацій.

Розвиток відновлюваної енергетики часто вимагає значних інвестицій. Макроекономічні показники можуть служити індикаторами фінансової стабільності та доступності капіталу для цього сектору. Великі інвестиції можуть підтримувати розширення виробництва відновлюваної енергії.

Для побудови багатофакторних регресійних моделей прогнозування показників відновлюваної енергетики України у якості впливових показників було обрано наступні показники за період 2010-2022pp., за даними The International Renewable Energy Agency (IRENA) [21]:

1. Total renewable energy, CAP (MW) – потужність встановлених ВДЕ, МВт.
2. Total renewable energy, PROD (GWh) – виробництво енергії від ВДЕ, ГВт·год.
3. Hydropower, CAP (MW) – потужність встановлених ВДЕ у гідроенергетиці, МВт.
4. Hydropower, PROD (GWh) – виробництво енергії від ВДЕ у гідроенергетиці, ГВт·год.
5. Wind energy, CAP (MW) – потужність встановлених ВДЕ у вітровій енергетиці, МВт.
6. Wind energy, PROD (GWh) – виробництво енергії від ВДЕ у вітровій енергетиці, ГВт·год.
7. Solar energy, CAP (MW) – потужність встановлених ВДЕ у сонячній енергетиці, МВт.
8. Solar energy, PROD (GWh) – виробництво енергії від ВДЕ у сонячній енергетиці, ГВт·год.
9. Bioenergy, CAP (MW) – потужність встановлених ВДЕ у біоенергетиці, МВт.

10. Bioenergy, PROD (GWh) – виробництво енергії від ВДЕ у біоенергетиці, ГВт·год.
11. Renewable energy share of electricity capacity, CAP, % – частка відновлюваної енергетики в електроенергетиці по потужності.
12. Renewable energy share of electricity capacity, PROD, % – частка відновлюваної енергетики в

електроенергетиці по обсягу виробництва.

Де Cap – потужність встановлених ВДЕ; Prod – виробництво енергії на встановлених потужностях ВДЕ.

На першому етапі було застосовано кореляційний аналіз для виявлення рівнів впливу між макроекономічними показниками України та показниками ВДЕ України - рис.1-2.

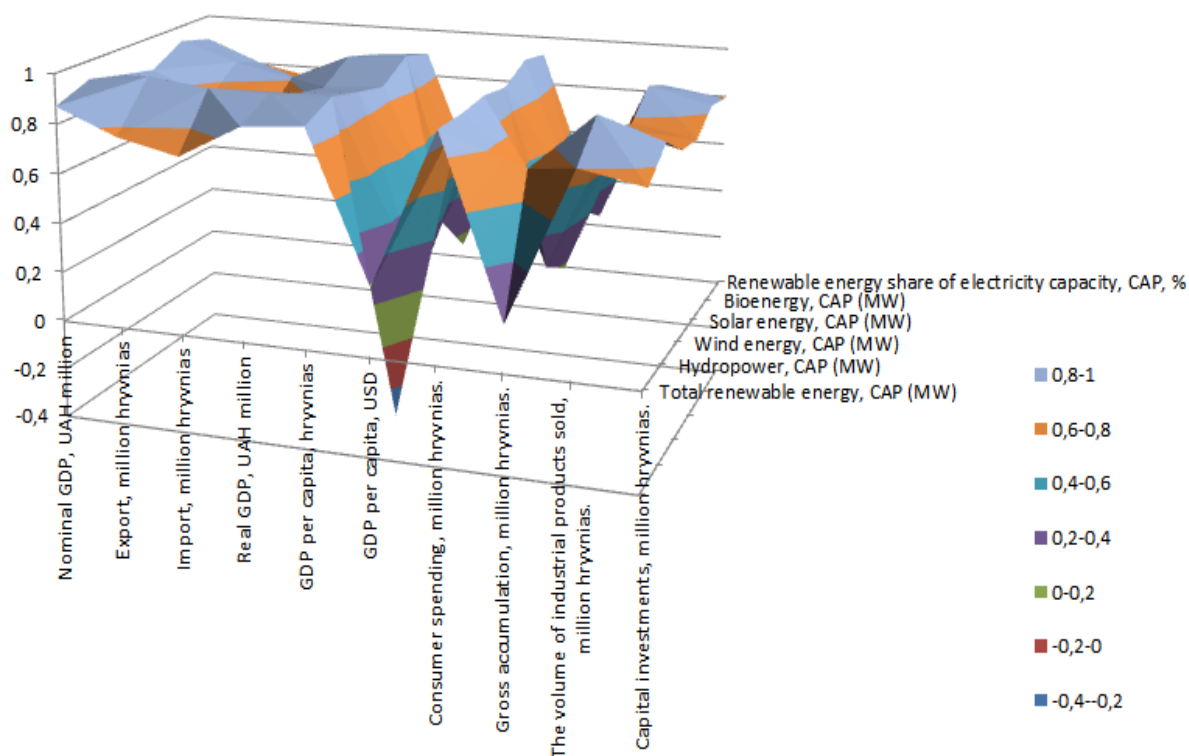


Рис. 1. Поверхня кореляційних зв'язків між потужностями української відновлюваної енергетики та основними макроекономічними показниками України (побудовано авторами за даними [20-21])

Побудова функцій взаємкореляцій дозволяє визначити, який з попередніх періодів впливового показника найбільше впливає на досліджуваний [22]. Тобто, дозволяє з'ясувати рівні впливу макроекономічних показників на обсяги встановлених потужностей та поточну кількість виробленої (використаної) відновлюваної енергії у числовій формі на основі аналізу отриманих значень кореляційної функції.

Як бачимо з рис. 1, між більшістю досліджених макроекономічних показників та показників відновлюваної енергетики існує доволі тісний кореляційний зв'язок. Найбільшою мірою макроекономічний стан

України впливає на Hydropower, CAP (MW) – 77,4% подібності динаміки.

Також суттєвий вплив на відсоток Renewable energy share of electricity capacity, CAP – 72,9% та на Bioenergy, CAP (MW) – 75,8%.

По розглянутим макро показникам найбільш впливовим виявився рівень споживчих витрат - зв'язок в цілому з усіма показниками відновлюваної енергетики становить 91,6% подібності динаміки змін. Також доволі впливовими є номінальний та реальний ВВП (89,6% та 87,9% відповідно) та обсяг виробленої продукції промисловості (84,5%).

Єдиним показником з наявністю від'ємного зв'язку є ВВП на душу населення в дол. США (-32,6 %). Тобто це означає, при зростанні ВВП на душу населення в дол. США відбувається зменшення показнику Hydropower, CAP (MW) на відповідну частку.

На рис. 2 наведена поверхня кореляційних зв'язків між виробництвом енергії за рахунок відновлюваної енергетики та основними макроекономічними показниками

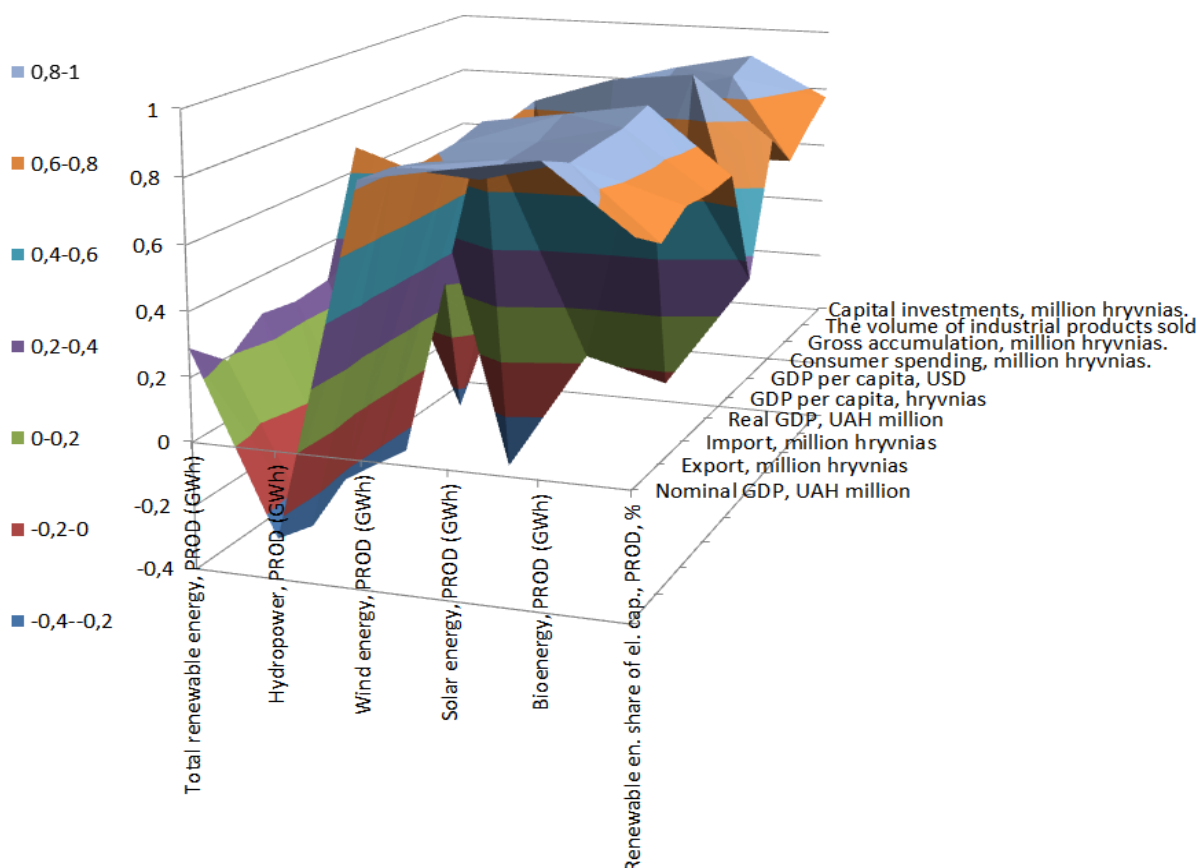


Рис. 2. Поверхня кореляційних зв'язків між виробництвом енергії за рахунок відновлюваної енергетики та основними макроекономічними показниками України (побудовано авторами за даними [20-21])

Порівнюючи рис. 1 та рис. 2 можна зробити висновок, що при тому, що потужність відновлюваної енергетики України в цілому доволі тісно пов'язана із макроекономічними показниками країни, проте стосовно виробництва енергії за рахунок досліджуваних видів відновлюваної енергетики – такого сильного зв'язку немає, а часто він взагалі обернений.

Відповідно, рис. 2 показує доволі негативну ситуацію саме стосовно виробництва енергії за рахунок відновлюваної енергетики.

Hydropower, PROD (GWh) в цілому має загальний від'ємний кореляційний зв'язок з макроекономічними показниками

розвитку України. Для Total renewable energy, PROD (GWh) зв'язок хоча і додатний, але дуже низький та становить всього 31,8%.

Розглядаючи окремо кожний з макроекономічних показників, рівні їх впливу на виробництво енергії за рахунок відновлюваної енергетики не перевищують 58%.

Спираючись на проведений аналіз (рис.1) було обрано п'ять макроекономічних показників, що мають найбільший рівень зв'язку (за коефіцієнтом кореляції по Пірсону) з досліджуваними показниками відновлюваної енергетики України для Cap – потужність:

X1 - The volume of industrial products sold, million hryvnias (обсяг реалізованої продукції промисловості, млн. грн.)

X2 - Consumer spending, million hryvnias (споживчі витрати, млн. грн.)

X3 - Capital investments, million hryvnias (капітальні інвестиції, млн. грн.)

X4 - Export, million hryvnias (експорт, млн. грн.)

X5 - Nominal GDP, UAH million hryvnias (номінальний ВВП, млн. грн.)

Надалі було виконано багатofакторне регресійне прогнозування показників (освоєних потужностей) відновлюваної енергетики України в залежності від обраних макроекономічних показників України та отримано наступну систему регресійних рівнянь:

$$\text{Total renewable energy} = 7326,08 - 0,0107 \cdot X1 - 0,0032 \cdot X2 - 0,0059 \cdot X3 - 0,0068 \cdot X4 + 0,0161 \cdot X5$$

$$\text{Hydropower} = 4995,95 - 0,0003 \cdot X1 + 0 \cdot X2 - 0,0013 \cdot X3 + 0,0017 \cdot X4 + 0,0001 \cdot X5$$

$$\text{Wind energy} = 382,75 - 0,0014 \cdot X1 + 0,0003 \cdot X2 - 0,0018 \cdot X3 + 0,0005 \cdot X4 + 0,0011 \cdot X5$$

$$\text{Solar energy} = 2387,17 - 0,0091 \cdot X1 - 0,0038 \cdot X2 - 0,0035 \cdot X3 - 0,0077 \cdot X4 + 0,0151 \cdot X5$$

$$\text{Bioenergy} = 9,36 - 0,0001 \cdot X1 + 0,000053 \cdot X2 - 0,0002 \cdot X3 + 0 \cdot X4 + 0,0001 \cdot X5$$

$$\text{Renewable energy share of el. cap.} = 11,38 - 0,000015 \cdot X1 - 0,000002 \cdot X2 - 0,000007 \cdot X3 - 0,00001 \cdot X5 + 0,000021 \cdot X10$$

Точність отриманих моделей за показником R^2 наведено в таблиці 1, всі моделі мають точність вище 98%, що є дуже високою точністю.

Спираючись на проведений аналіз (рис.2) було обрано п'ять макроекономічних показників, що мають найбільший рівень зв'язку (за коефіцієнтом кореляції по Пірsonу) з досліджуваними показниками відновлюваної енергетики для Prod – виробництво:

X1 - Real GDP, million hryvnias (реальний ВВП, млн. грн.)

X2 - Consumer spending, million hryvnias (споживчі витрати, млн. грн.)

X3 - Capital investments, million hryvnias (капітальні інвестиції, млн.грн.)

X4 - Import, million hryvnias (імпорт, млн. грн.)

X5 - Nominal GDP, UAH million (номінальний ВВП, млн. грн.)

Надалі було виконано багатofакторне регресійне прогнозування показників (обсягів виробництва) відновлюваної енергетики України в залежності від обраних макроекономічних показників та отримано наступну систему регресійних рівнянь:

$$\text{Total renewable energy} = 10859,87 + 0,0405 \cdot X1 - 0,0005 \cdot X2 + 0 \cdot X3 - 0,0117 \cdot X4 + 0,0007 \cdot X5$$

$$\text{Hydropower} = 11386,27 + 0,0545 \cdot X1 - 0,0107 \cdot X2 + 0,0003 \cdot X3 - 0,0147 \cdot X4 + 0,0084 \cdot X5$$

$$\text{Wind energy} = -163,94 - 0,0172 \cdot X1 + 0,0046 \cdot X2 + 0,00007 \cdot X3 + 0,0059 \cdot X4 - 0,0039 \cdot X5$$

$$\text{Solar energy} = -428,08 - 0,0073 \cdot X1 + 0,0059 \cdot X2 + 0,0005 \cdot X3 + 0,0015 \cdot X4 - 0,0042 \cdot X5$$

$$\text{Bioenergy} = 35,14 - 0,0003 \cdot X1 + 0,000346 \cdot X2 + 0,0006 \cdot X3 + 0,0001 \cdot X4 - 0,0002 \cdot X5$$

$$\text{Renewable energy share of el. cap.} = 4,53 + 0,000014 \cdot X1 + 0,00008 \cdot X2 + 0,000 \cdot X3 - 0,0003 \cdot X4 + 0,007 \cdot X5$$

Як бачимо за даними табл.1, що хоча прогнозування показників освоєних потужностей відновлюваної енергетики України в залежності від обраних макроекономічних показників має дуже

високі рівні точності апроксимації, проте стосовно показників обсягів виробництва відновлюваної енергетики України в залежності від обраних макроекономічних показників мають менші рівні точності.

Таблиця 1

Точності отриманих прогнозних моделей для відновлюваної енергетики України (R^2 , %) (розраховано авторами)

Показник	CAP (MW)	PROD (GWh)
Total renewable energy	99,16	79,02
Hydropower	99,39	76,32
Wind energy	99,01	94,85
Solar energy	98,92	99,03
Bioenergy	99,39	97,66
Renewable energy share of el. cap.	99,39	87,13

Лише для вітрової, сонячної енергетики та біоенергетики точність прогнозування обсягів виробництва енергії за рахунок цих джерел від макроекономічних показників має точність апроксимації вище 95%, для інших показників точність апроксимації не настільки висока.

Протягом досліджуваного періоду (2010-2022рр.) отримані моделі показують дуже високий рівень точності апроксимації, але якщо розглядати прогноз на наступні роки (спираючись на відомі значення

макроекономічних показників до 2023 року та прогноз розвитку України до 2025р.), то прогнозна лінія починає швидко відхилятися від фактичного тренду.

Для прогнозування розвитку відновлюваної енергетики в Україні було використано авторегресійний та мультиплікативний аналіз. Для прогнозування встановлених потужностей ВДЕ в Україні - Total renewable energy, CAP (MW) трифакторна авторегресійна модель має вигляд:

$$Y_i^* = \sqrt[3]{(-16627,4 + 4,28 \cdot Y_{i-3}) \cdot (-17434,3 + 4,16 \cdot Y_{i-2}) \cdot (-635,8 + 1,25 \cdot Y_{i-1})}$$

Точність отриманої моделі складає $R^2 = 82,8\%$

Для прогнозування розвитку встановлених потужностей ВДЕ в Україні -

$$Y_i^* = (-635,8 + 1,25 \cdot Y_{i-1}) \cdot (0,261 + 0,00013 \cdot Y_{i-2}) \cdot (1,097 - 0,00002 \cdot Y_{i-3})$$

Точність отриманої моделі складає $R^2 = 82,7\%$

Для прогнозування обсягів виробництва енергії від джерел ВДЕ - Total renewable energy, PROD (GWh) були отримані

Total renewable energy, CAP (MW) трифакторна мультиплікативна авторегресійна модель має вигляд:

аналогічні моделі (за допомогою авторегресійного та мультиплікативного методу – табл. 2), по Україні точності відповідних моделей становлять 87,7% та 91,4%.

Таблиця 2

Коефіцієнти та точності побудованих прогнозних моделей розвитку ВДЕ в Україні (побудовано авторами)

Показник		Multifactorial forecast			Точність, %	multiplicative forecast			Точність, %
		Y(i-3)	Y(i-2)	Y(i-1)		Y(i-3)	Y(i-2)	Y(i-1)	
Total renewable energy, CAP (MW)	a	-16627,4	-17434,3	-635,8	82,80	1,097	0,261	-635,8	82,75
	b	4,278	4,160	1,247		-0,00002	0,00013	1,247	
Total renewable energy, PROD (GWh)	a	17341,7	17993,6	8099,5	87,67	1,631	1,352	8099,5	91,41
	b	-0,558	-0,604	0,270		-0,00006	-0,00003	0,270	

Отже, точність отриманих авторегресійних моделей щодо прогнозування встановлених потужностей та виробництва ВДЕ в Україні у є більш низькою, ніж було отримано на етапі

п'ятифакторного регресійного моделювання розвитку потужностей ВДЕ в Україні, проте рівень адекватності прогнозних моделей вище 85% є достатнім для їх застосування на практиці – рис.3.

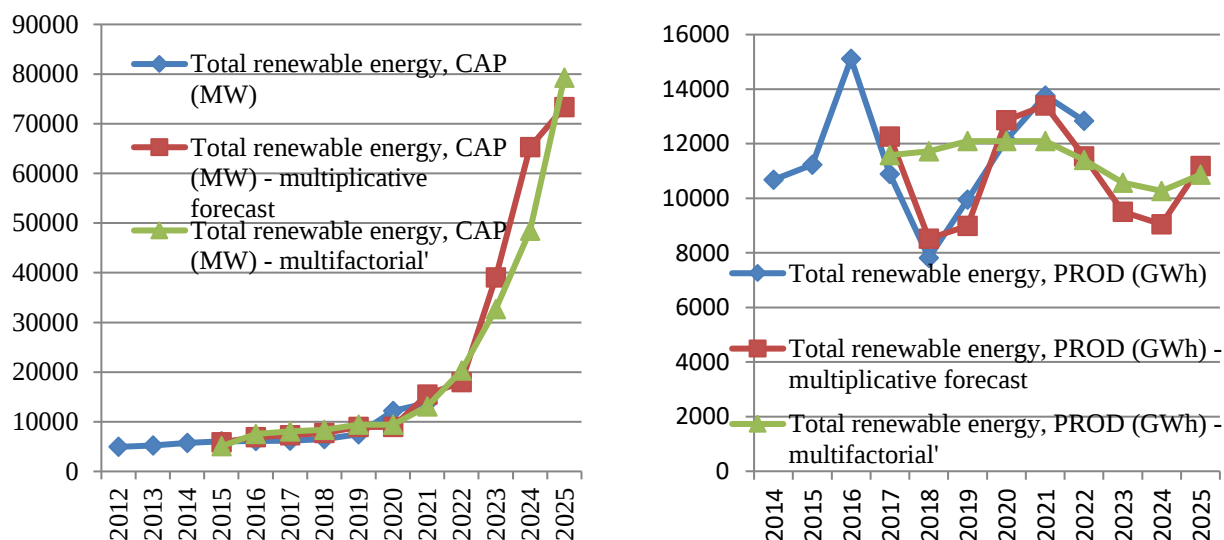


Рис. 3. Результати прогнозування встановлених потужностей та обсягів виробництва ВДЕ в Україні (розраховано авторами за даними [21,25])

За даними рис. 3, показник встановлених потужностей ВДЕ має сталу тенденцію до зростання у загальній динаміці тренду, що підтверджується отриманими високими рівнями апроксимації (85%). За даними рис. 3 можна виділити чітку коливальну тенденцію обсягів виробленої енергії за рахунок джерел ВДЕ в Україні.

Надалі було виконано представлення встановлених потужностей ВДЕ України у вигляді динамічного перехідного процесу та моделювання його майбутніх станів за допомогою отримання диференційного рівняння другого порядку з простим входом, комплексної передавальної функції та шляхом визначення амплітудно-фазової частотної характеристики (АФЧХ) і побудови частотного годографа Найквіста, що показав стійкість у малому досліджуваного процесу до зовнішніх

збурень. У якості впливового регульованого показника було використано обсяг інвестицій у відновлюванні джерела енергетики України для диференційного моделювання досліджуваних показників за методикою аналізу перехідних процесів [2-4, 15, 23-24].

Оскільки в якості вхідних даних використовувалися статистичні показники за 11 років (2010-2022рр.), то для зсуву в 6 періодів залишається лише 5 періодів для розрахунку, при чому в даній точці кореляційні функції стрімко зменшуються та наближується до мінімального значення.

Спираючись на побудовані кореляційну та автокореляційну функції, було сформовано систему рівнянь по ВДЕ для пошуку значень імпульсно-перехідної функції:

$$\begin{cases} 0,777 = 1 * \omega_0 + 0,212 * \omega_1 - 0,241 * \omega_2 - 0,078 * \omega_3 + 0,033 * \omega_4 + 0,079 * \omega_5 \\ 0,515 = 0,212 * \omega_0 + 1 * \omega_1 + 0,212 * \omega_2 - 0,241 * \omega_3 + 0,169 * \omega_4 - 0,040 * \omega_5 \\ 0,202 = -0,241 * \omega_0 + 0,212 * \omega_1 + 1 * \omega_2 + 0,212 * \omega_3 - 0,241 * \omega_4 - 0,078 * \omega_5 \\ 0,045 = -0,078 * \omega_0 - 0,241 * \omega_1 + 0,212 * \omega_2 + 1 * \omega_3 + 0,212 * \omega_4 - 0,241 * \omega_5 \\ -0,013 = 0,033 * \omega_0 - 0,078 * \omega_1 - 0,241 * \omega_2 + 0,212 * \omega_3 + 1 * \omega_4 + 0,212 * \omega_5 \end{cases}$$

Розв'язавши наведену систему рівнянь, було отримано значення імпульсно-перехідної функції для процесу зміни ВДЕ та

розраховано перехідну функцію, як суму попередніх значень імпульсної перехідної в кожній точці – рис. 4.

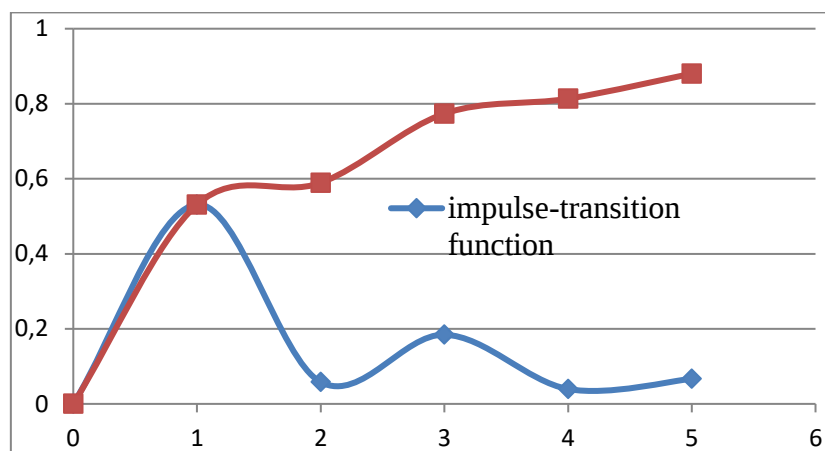


Рис. 4. Імпульсна перехідна та перехідна функції для встановлених потужностей ВДЕ України (розраховано авторами за даними [21,25])

Для знаходження коефіцієнтів диференційного рівняння використовується три допоміжні величини F_1 ; F_2 ; F_3 , що

зв'язані з коефіцієнтами диференційного рівняння наступними залежностями [2-4].

$$\begin{cases} a_1 = b_1 + F_1 \\ a_2 = b_2 + F_2 + F_1 * b_1 \\ a_3 = b_3 + F_3 + b_2 * F_1 + F_2 * b_1 \end{cases}$$

Таблиця 3

Результати визначення виду диференційного рівняння та обчислення його коефіцієнтів (розраховано авторами)

Параметри F		Умова	Коефіцієнти
F1=	3,796	F2 > F3	a ₁ = 3,80
F2=	6,205		a ₂ = 6,20
F3=	5,556		b ₀ = 0,60

Таким чином, для встановлених потужностей ВДЕ України отримане диференційне рівняння моделювання перехідного процесу зміни потужностей

встановлених ВДЕ в залежності від зміни інвестицій у відновлювану енергетику України має вигляд:

$$6,2 \cdot \frac{d^2 y}{dt^2} + 3,8 \cdot \frac{dy}{dt} + y = 0,6 \cdot x$$

Отже, отриману модель можна застосовувати як для розрахунку майбутніх значень встановлених потужностей ВДЕ, так і для імітаційного моделювання різноманітних можливих змін встановлених потужностей ВДЕ, оскільки побудована модель оперує не часовими значеннями X та Y, а їх використовує агреговані дані про їх

можливі зміни та описує математичну залежність між ними.

Крім того вони дозволяють оцінити сталість показника. Наскільки побудована модель та визначена залежність між динамічними станами зміни встановлених потужностей ВДЕ є стійкою до зовнішніх збурень та непередбачуваних обставин. Якщо система є стійкою, то отримані моделі

залишаються адекватними та можуть застосовуватися і у тих випадках, коли досліджувані показники зазнають різких змін. Тобто навіть якщо обсяги вкладень у ВДЕ дуже значно впадуть або в рази зростуть, якщо отримана модель є сталою, то визначена залежність між приростом інвестицій та змінами у обсягах

встановлених потужностей ВДЕ (диференційне рівняння) буде залишатися адекватною.

Для отримання передаточної функції, диференційне рівняння записується по Лапласу та виділяється відношення його виходу та входу [3]:

$$\omega(p) \frac{y}{x} = \frac{b}{a_2 p^2 + a_1 p + a_0}$$

Відповідно для встановлених потужностей ВДЕ України передавальна функція має вигляд:

$$\omega(p) = \frac{0,6}{6,2p^2 + 3,8p + 1}$$

Амплітудно-частотна характеристика (АФЧХ) отримується з передаточної функції шляхом заміни $p \rightarrow j\omega$ та алгебраїчних

перетворень для видалення ірраціональності (j) зі знаменника, враховуючи, що $j^2 = -1$:

$$\begin{aligned} w(j\omega) &= \frac{0,6}{6,2j^2 \omega^2 + 3,8j\omega + 1} = \frac{0,6}{-6,2\omega^2 + 3,8j\omega + 1} = \\ &= \frac{0,6 * (3,8j\omega - (1 - 6,2\omega^2))}{3,8j\omega + (1 - 6,2\omega^2)} = \frac{0,6 * (3,8j\omega - (1 - 6,2\omega^2))}{(3,8j\omega)^2 - (1 - 6,2\omega^2)^2} = \\ &= \frac{2,28j\omega - 0,6 + 3,72\omega^2}{-14,44\omega^2 - 1 + 12,4\omega^2 - 38,44\omega^4} = \frac{j(2,28\omega) + 2,58\omega^2 - 0,6}{-38,44\omega^4 - 2,04\omega^2 - 1} = \\ &= \frac{(0,6 - 2,58\omega^2) - j(2,28\omega)}{38,44\omega^4 + 2,04\omega^2 + 1} \end{aligned}$$

Дійсна та уявна частина для потужностей ВДЕ України відповідно показнику АФЧХ моделі для встановлених будуть мати наступний вигляд:

$$P = \frac{0,6 - 2,58\omega^2}{38,44\omega^4 + 2,04\omega^2 + 1}$$

$$Q = \frac{-2,28\omega}{38,44\omega^4 + 2,04\omega^2 + 1}$$

Спираючись на отримання формульне значення дійсної та уявної частини амплітудно фазової частотної

характеристики було побудовано графік АФЧХ для встановлених потужностей ВДЕ України - рис. 5.

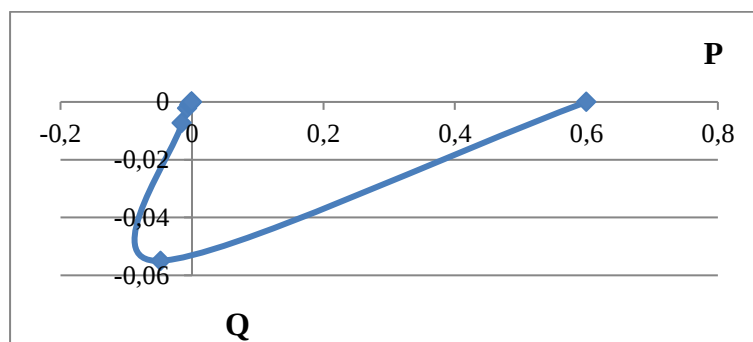


Рис. 5. Амплітудно-частотна характеристика диференційної моделі для встановлених потужностей ВДЕ України (розраховано авторами за даними [21,25])

Оскільки лінія АФЧХ не охоплює точку $(-1;0)$, це говорить про сталість досліджуваного процесу та його здатність до самовирівнювання при виникненні випадкових збурень та непередбачуваних обставин, до яких можна віднести ситуацію повномасштабного вторгнення росії.

За результатами проведеного моделювання на основі методики перехідних процесів була отримана модель зміни обсягу встановлених потужностей ВДЕ України в залежності від обсягів інвестицій у відновлювану енергетику у вигляді диференційного рівняння та з'ясовано, що цей процес є сталим, тобто навіть при тимчасових обмеженнях або зменшеннях такого інвестування з часом він буде повертатися до стабільного зростаючого тренду (який було отримано за допомогою багатofакторних авторегресійних моделей).

Висновки. Розвиток потужності відновлюваної енергетики було представлено у вигляді динамічного перехідного процесу та моделювання його майбутніх станів шляхом отримання диференційного рівняння другого порядку з простим входом, складною передавальною функцією та визначенням амплітудно-фазово-частотної характеристики (АФЧХ) та побудови годографа Найквіста, що показав стійкість досліджуваного процесу до зовнішніх впливів.

Також було обґрунтовано можливість застосування авторегресійних та багатofакторних регресійних моделей прогнозування до потужності відновлювальної енергетики, отримано та порівняно трифакторні авторегресійні та п'ятифакторні регресійні моделі; розраховано прогнозовані значення потужності відновлюваної енергетики до 2025 року.

За результатами проведеного моделювання на основі методики перехідних процесів була отримана модель зміни обсягу встановлених потужностей ВДЕ України в залежності від обсягів інвестицій у відновлювану енергетику у вигляді диференційного рівняння та з'ясовано, що цей процес є сталим, тобто навіть при тимчасових обмеженнях або зменшеннях такого інвестування з часом він буде повертатися до стабільного зростаючого тренду (який було отримано за допомогою багатofакторних авторегресійних моделей).

Запропонований метод динамічного моделювання дозволяє отримати більш точні та надійні прогнози розвитку потужності відновлюваної енергетики, порівняно з традиційними методами. Цей метод може бути використаний для прийняття обґрунтованих рішень щодо розвитку сонячної енергетики та інвестування в цю галузь в Україні.

Список літератури

1. Hamming W. Numerical methods for scientists and engineers. (1987). URL: <http://surl.li/gjavx>.
2. Katrikh L. O., Myronova L. G., Maryuta O. M. Statistical Planning and Efficient Control of Enterprise's Main Industrial Resources in Conditions of Uncertainty pp. *Statistics of Ukraine*. 2006, № 3 (34). pp. 34-38.
3. Maryuta A. N. Analysis of motion of mechanical systems with frictional interaction. *International Applied Mechanics*. 1989. Volume 25, Issue 10. pp. 1031-1040.
4. Maryuta A. N. Mechanics of frictional energy transfer in rolling. *International Applied Mechanics*. 1991. Volume 27, Issue 4. pp. 400-406.
5. Kostetska I. Improving of business planning using the method of fuzzy numbers. *Central European Management Journal*. 2016. № 24 (3). pp. 47-61.
6. Половцев О. Методи моделювання динаміки соціально-економічних систем. *Вісник Національної академії державного управління при Президентові України*. 2010. № 1. С. 105-111.
7. Вергунова І. М. Системне моделювання в економіці. Київ : Наш формат, 2016. 134 с.
8. Thörnqvist C., Kilstam J. (2021). Aligning Corporate Social Responsibility with the United Nations' Sustainability Goals: Trickier than it Seems? *ECONOMICS*:

- Innovative and Economics Research Journal*. № 9(1). pp. 161-177.
9. Helm D. (2002). Energy policy: security of supply, sustainability and competition. *Energy Policy*. № 30, pp. 173-184.
10. Huntington H. G., Weyant J., Sweeney J. L. (1982). Modeling for insights, not numbers: the experiences of the energy modeling forum. *Omega*, № 10(5), pp. 449-462.
11. Laitner J. A., DeCanio S. J., Coomey J. G., Sanstand A. H. (2003). Room for improvement: increasing the value of energy modeling for policy analysis. *Utilities Policy*, № 11(2), pp. 87-94.
12. Pina A., Silva C., Ferrao P. (2011). Modeling hourly electricity dynamics for policy making in long-term scenarios. *Energy Policy*, № 39(9), pp. 4692-4702.
13. Worrel E., Ramesohl S., Boyd G. (2004). Advances in energy forecasting models based on engineering economics. *Annual Review of Environment and Resources*, № 29, pp. 345-381.
14. Лижник Ю. Б. Вплив повномасштабного вторгнення на відновлювальну енергетику України. *Матеріали XII Міжнародної науково-практичної конференції: Соціально-економічні та юридичні проблеми розвитку країн*. Дніпро : OKTAN PRINT, 2024. С. 81-85.
15. Oksana Yelisieieva, Yuliya Lyzhnyk, Iryna Stoliyetova, Natalia Kutova Study of best practices of green energy development in the eu countries based on correlation and bagatofactor autoregressive forecasting. *Economics - Innovative And Economics Research Journal*. 2023. vol. 11 no. 2 URL: <https://economicsrs.com/index.php/eier/article/view/337>.
16. The International Energy Agency (IEA). URL: <https://www.iea.org/>
17. REPowerEU: A plan to rapidly reduce dependence on Russian fossil fuels and fast forward the green transition. URL: https://www.eeas.europa.eu/eeas/eu-external-energy-policy-repowereu_en
18. Лижник Ю. Б. Порівняльний аналіз використання зеленої енергетики в Україні та в ЄС. *Матеріали I науково-практичної конференції Стратегії та політики ЄС: інституційна структура та механізми реалізації*. м. Кривий Ріг: Донецький національний університет економіки і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського. 2024. С. 168-173.
19. Єлісєєва О. К., Лижник Ю. Б. Статистичний аналіз та моделювання соціально-економічних процесів : монографія. Дніпропетровськ: Наука і освіта, 2012. 216 с.
20. Офіційний сайт Державного комітету статистики України URL : www.ukrstat.gov.ua.
21. The International Renewable Energy Agency (IRENA). URL: <https://www.irena.org/>
22. Лижник Ю. Б. Кореляційний та автокореляційний аналіз використанні відновлюваних джерел енергії у світі. *Стійкий розвиток національної економіки: актуальні проблеми та механізми забезпечення : матеріали VI Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції*. Кривий Ріг: Донецький національний університет економіки і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського, 2023. С. 91-93.
23. Лижник Ю. Б. Моделювання перехідних процесів для аналізу показників соціально-економічного розвитку регіонів України. *Антикризове управління економічним розвитком регіонів: колективна монографія. Розділ 3*. Кривий Ріг : Вид. Р. А. Козлов, 2019. С. 42-54.
24. Лижник Ю. Б., Бочарова Ю. Г. Компаративний аналіз сталості фінансових процесів в АТ «Укрсиббанк» та АТ «ПриватБанк» із застосуванням методів моделювання економічної динаміки. *Вісник Донецького національного університету економіки і торгівлі ім. Михайла Туган-Барановського. Серія: Економічні науки*. 2023. № 2(79). С. 93-100.
25. Global Wind Energy Council (GWEC). URL: <https://gwec.net/>

References

1. Hamming, W. (1987). Numerical methods for scientists and engineers. Available at : <http://surl.li/gjavx>.
2. Katrikh, L. O., Myronova, L. H. & Mariuta, O. M. (2006). Statistical Planning and Efficient Control of Enterprise's Main Industrial Resources in Conditions of Uncertainty. *Statistics of Ukraine*, no. 3 (34), pp. 34-38.
3. Mariuta, A. N. (1989). Analysis of motion of mechanical systems with frictional interaction. *International Applied Mechanics*, vol. 25, issue 10, pp. 1031-1040.
4. Mariuta, A. N. (1991). Mechanics of frictional energy transfer in rolling. *International Applied Mechanics*, vol. 27, issue 4, pp. 400-406.
5. Kostetska, I. (2016). Improving of business planning using the method of fuzzy numbers. *Central European Management Journal*, no. 24 (3), pp. 47-61.
6. Polovtsev, O. (2010). *Metody modeliuvannia dynamiky sotsialno-ekonomichnykh system* [Methods of modeling the dynamics of socio-economic systems]. *Visnyk Natsionalnoi akademii derzhavnoho upravlinnia pry Prezidentovi Ukrainy* [Bulletin of the National Academy of Public Administration under the President of Ukraine], no. 1, pp. 105-111.
7. Verhunova, I. M. (2016). *Systemne modeliuvannia v ekonomitsi* [System modeling in economics]. Kyiv, Nash format Publ., 134 p.
8. Thörnqvist, C. & Kilstam, J. (2021). Aligning Corporate Social Responsibility with the United Nations' Sustainability Goals: Trickier than it Seems? *ECONOMICS: Innovative and Economics Research Journal*, no. 9(1), pp. 161-177.
9. Helm, D. (2002). Energy policy: security of supply, sustainability and competition. *Energy Policy*, no. 30, pp. 173-184.
10. Huntington, H. G., Weyant, J. & Sweeney, J. L. (1982). Modeling for insights, not numbers: the experiences of the energy modeling forum. *Omega*, no. 10(5), pp. 449-462.
11. Laitner, J. A., DeCanio, S. J., Coomey, J. G. & Sanstand, A. H. (2003). Room for improvement: increasing the value of energy modeling for policy analysis. *Utilities Policy*, no. 11(2), pp. 87-94.
12. Pina, A., Silva, C. & Ferrao, P. (2011). Modeling hourly electricity dynamics for policy making in long-term scenarios. *Energy Policy*, no. 39(9), pp. 4692-4702.
13. Worrel, E., Ramesohl, S. & Boyd, G. (2004). Advances in energy forecasting models based on engineering economics. *Annual Review of Environment and Resources*, no. 29, pp. 345-381.
14. Lyzhnyk, Yu. B. (2024). *Vplyv povnomasshtabnoho vtorhnennia na vidnovliuvalnu enerhetyku Ukrainy* [The impact of a full-scale invasion on renewable energy in Ukraine]. *Materialy XII Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii: Sotsialno-ekonomichni ta yurydychni problemy rozvytku krain* [Materials of the 12th International Scientific and Practical Conference: Socio-economic and legal problems of the development of countries]. Dnipro, OKTAN PRINT Publ., pp. 81-85.
15. Yelisieieva, O., Lyzhnyk, Yu., Stolietova, I. & Kutova, N. (2023). Study of best practices of green energy development in the EU countries based on correlation and bagatofactor autoregressive forecasting. *Economics - Innovative And Economics Research Journal*, vol. 11, no. 2. Available at: <https://economicsrs.com/index.php/eier/article/view/337>.
16. The International Energy Agency (IEA). Available at : <https://www.iea.org/>
17. REPowerEU: A plan to rapidly reduce dependence on Russian fossil fuels and fast forward the green transition. Available at : https://www.eeas.europa.eu/eeas/eu-external-energy-policy-repowereu_en.
18. Lyzhnyk, Yu. B. (2024). *Porivnialnyi analiz vykorystannia zelenoi enerhetyky v Ukraini ta v YeS* [Comparative analysis of the use of green energy in Ukraine and the EU]. *Materialy I naukovo-praktychnoi konferentsii: Stratehii ta polityky YeS: instytutsiina struktura ta mekhanizmy realizatsii* [Materials of the 1st scientific and practical conference EU strategies and

- policies: institutional structure and implementation mechanisms]. Kryvyi Rih, Mykhailo Tuhan-Baranovskyi DonNUET Publ., pp. 168-173.
19. Yeliseieva, O. K. & Lyzhnyk, Yu. B. (2012). *Statystychnyi analiz ta modeliuvannia sotsialno-ekonomichnykh protsesiv : monografiia* [Statistical analysis and modeling of socio-economic processes: monograph]. Dnipropetrovsk, Nauka i osvita Publ., 216 p.
 20. State Statistics Committee of Ukraine. Available at : www.ukrstat.gov.ua
 21. The International Renewable Energy Agency (IRENA). Available at : <https://www.irena.org/>
 22. Lyzhnyk, Yu. B. (2023). *Koreliatsiinyi ta avtokoreliatsiinyi analiz vykorystanni vidnovliuvanykh dzherel enerhii u sviti* [Correlation and autocorrelation analysis of the use of renewable energy sources in the world]. *Stiiki rozvytok natsionalnoi ekonomiky: aktualni problemy ta mekhanizmy zabezpechennia : materialy VI Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi internet-konferentsii* [Sustainable development of the national economy: current problems and mechanisms of support: materials of the 6th International Scientific and Practical Internet Conference]. Kryvyi Rih, Mykhailo Tuhan-Baranovskyi DonNUET Publ., pp. 91-93.
 23. Lyzhnyk, Yu. B. (2019). *Modeliuvannia perekhidnykh protsesiv dlia analizu pokaznykiv sotsialno-eko-nomichnoho rozvytku rehioniv Ukrainy* [Modeling of transitional processes for the analysis of indicators of socio-economic development of the regions of Ukraine]. *Antykryzove upravlinnia ekonomichnykh rozvytkom rehioniv* [Anti-crisis management of economic development of regions], chapter 3, pp. 42-54.
 24. Lyzhnyk, Yu. B. & Bocharova, Yu. H. (2023). *Komparatyvnyi analiz stalosti finansovykh protsesiv v AT «Ukrsybbank» ta AT «PryvatBank» iz zastosuvanniam metodiv modeliuvannia ekonomichnoi dynamiky* [Comparative analysis of the sustainability of financial processes in JSC «Ukrsibbank» and JSC «PrivatBank» using methods of modeling economic dynamics]. *Visnyk Donetskoho natsionalnoho universytetu ekonomiky i torhivli im. Mykhaila Tuhan-Baranovskoho. Seriya: Ekonomichni nauky* [Bulletin of Mykhailo Tuhan-Baranovskyi Donetsk National University of Economics and Trade. Series: Economic Sciences], no. 2(79), pp. 93-100.
 25. Global Wind Energy Council (GWEC). Available at : <https://gwec.net/>

Objective. The objective of the article is to apply economic and mathematical models for the analysis, modeling and forecasting of the development of renewable energy in Ukraine, assessment of country's renewable energy sources potential.

Methods. The following methods are used to model and forecast the development of renewable energy in Ukraine: correlational and actocorrelational analysis (to identify the relationship between macroeconomic indicators of Ukraine and the development of renewable energy in the country); three-factor autoregressive and multiplicative forecasting and five-factor regression forecasting (for forecasting indicators of renewable energy of Ukraine); the basics of the mathematical apparatus for the analysis of transient processes, the methodology of determining the coefficients of impulse-transient and transient functions, methods of building differential models, Laplace transformation and obtaining transient functions, the basics of the mathematics of imaginary quantities, methods of obtaining the amplitude-phase and frequency characteristics of the object under study, methods of analysis stability of controlled dynamic processes (to present the Total renewable energy indicator in the form of a dynamic transient process and model its future states by obtaining a second-order differential equation with a simple input, a complex transfer function and by determining the amplitude-phase frequency characteristic and constructing a Nyquist frequency hodograph, which showed the stability of the studied process to external disturbances).

Results. Forecasting the installed capacities and production volumes of renewable energy is an important task for the effective development of this industry. A new approach to forecasting is proposed, combining autoregressive and multivariate regression models and dynamic modeling.

The development of the capacity of renewable energy is considered as a dynamic transient process, which is represented by a complex transfer function with its real frequency characteristic and its imaginary frequency characteristic, which are used to construct the Nyquist hodograph, which shows the stability of the researched process of development of the capacity of renewable energy from investment investments.

According to the results of modeling based on the transient process method, a model of changes in the volume of installed capacities of renewable energy of Ukraine depending on the volume of investments in renewable energy is obtained in the form of a differential equation, and it is found out that this process is stable, that is, even with temporary restrictions or reductions of such investment over time it will return to a stable growing trend.

The proposed method of dynamic modeling makes it possible to obtain more accurate and reliable forecasts of the development of renewable energy capacity, compared to traditional methods. This method can be used to make informed decisions regarding the development of solar energy and investment in this industry in Ukraine.

Key words: *renewable energy, renewable energy sources, economic dynamics modeling, transient processes, impulse function, impulse-transition function, transfer function, differential equations, economic objects stability.*

Надійшла до редакції: 12.03.2024