

О.Є. МАЛЯРЕНКО, Н.П. ІВАНЕНКО
Інститут загальної енергетики НАН України

ІМІТАЦІЙНА МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОГНОЗУВАННЯ ПОПИТУ НА ПАЛИВО З УРАХУВАННЯМ ЕКОЛОГІЧНИХ ОБМЕЖЕНЬ

У статті запропоновано вдосконалену імітаційну математичну модель прогнозування попиту на паливо та його види з урахуванням екологічних зобов'язань, що взяла на себе Україна стосовно Зеленого енергетичного переходу, обмежень на викиди парникових газів та забруднюючих речовин. Огляд українських і зарубіжних публікацій свідчить про те, що багато з них не можуть бути застосовані до умов України через високу нестабільність економіки у зв'язку з агресією росії. Метою дослідження є розвиток імітаційної математичної моделі прогнозування попиту на паливо, яка на верхньому рівні враховує показник граничних викидів парникових газів у 2030 р., що дає змогу вибирати прогнозні сценарії попиту на паливо, передусім на вугілля і нафтопродукти, які за сумарними прогнозними обсягами викидів парникових газів від споживання палива відповідають визначеним обмеженням на граничну енергоємність ВВП. Обмеження на викиди забруднюючих речовин розглядаються на рівні технології як доповнення до цієї імітаційної моделі. Автори представили розроблення, аналіз та вдосконалення імітаційної математичної моделі, призначеної для опису складних динамічних процесів, що відбуваються у технічних системах із розподіленими параметрами. Модель ґрунтується на рівняннях у частинних похідних, які враховують вплив просторових неоднорідностей, зовнішніх керуючих дій та нелінійних ефектів у системі. Наведено постановку завдання, умови коректності та принципи побудови чисельної схеми для розв'язування рівнянь. Проведено аналітичне дослідження стійкості та збіжності отриманих розв'язків, а також розроблено алгоритм ідентифікації параметрів моделі за експериментальними даними. Наведено приклади моделювання для різних значень параметрів, що підтверджують адекватність запропонованого підходу та можливість його застосування до опису процесів у реальних технічних системах. Наведено приклади різних варіантів модернізації Бурштинської ТЕС, які дають змогу знизити питомі викиди вуглекислого газу і забруднюючих речовин. Розраховано питому плату за викиди парникових газів, що діє в Україні, та усереднену для Європейського Союзу. Розроблено рекомендації щодо застосування запропонованих сценаріїв. Отримані результати можуть бути використані для оптимізації керування, підвищення енергоефективності та зниження втрат у промислових і енергетичних об'єктах.

Ключові слова: імітаційна математична модель, попит, прогноз, паливо, викиди, парникові гази.

O.YE. MALIARENKO, N.P. IVANENKO
General Energy Institute of NAS of Ukraine

SIMULATION MATHEMATICAL MODEL FOR FORECASTING FUEL DEMAND TAKING INTO ACCOUNT ENVIRONMENTAL CONSTRAINTS

The article proposes an improved simulation mathematical model for forecasting fuel demand and its types, taking into account the environmental obligations undertaken by Ukraine regarding the Green Energy Transition and restrictions on greenhouse gas emissions and pollutants. A review of Ukrainian and foreign publications shows that many of them cannot be applied to the conditions of Ukraine due to the high instability of the economy due to Russian aggression. The purpose of the study is to develop a simulation mathematical model for forecasting fuel demand, which at the upper level takes into account the indicator of marginal greenhouse gas emissions in 2030, which allows choosing forecast scenarios for fuel demand, primarily for coal and oil products, which, in terms of the total forecast volumes of greenhouse gas emissions from fuel consumption, correspond to the specified restrictions on the marginal energy intensity of GDP. Limitations on pollutant emissions are considered at the technology level as a complement to this simulation model. The authors presented the development, analysis and improvement of a simulation mathematical model designed to describe complex dynamic processes occurring in technical systems with distributed parameters. The model is based on partial differential equations that take into account the influence of spatial inhomogeneities, external control actions and nonlinear effects in the system. The problem statement, correctness conditions and principles for constructing a numerical scheme for solving equations are presented. An analytical study of the stability and convergence of the obtained solutions is carried out, and an algorithm for identifying model parameters using experimental data is also developed. Examples of modeling for different parameter values are presented, confirming the adequacy of the proposed approach and the possibility of its application to describing processes in real technical systems. Examples of various options for modernizing the Burshtyn TPP are presented, which allow reducing specific emissions of carbon dioxide and pollutants. Accordingly, the specific fee for greenhouse gas emissions, which is valid in Ukraine and averaged for the European Union, was calculated. Recommendations for the application of the proposed scenarios were developed. The results obtained can be used to optimize management, increase energy efficiency and reduce losses in industrial and energy facilities.

Key words: simulation mathematical model, demand, forecast, fuel, emissions, greenhouse gases.

Постановка проблеми

Проблема моделювання попиту на енергоресурси, зокрема на паливо, є надзвичайно актуальною в умовах його дефіциту внаслідок російської агресії. Україна сьогодні не має доступу до своїх викопних ресурсів на сході країни, постійно руйнуються внаслідок російських атак нафтогазовидобувні підприємства на Сумщині, Полтавщині, Харківщині. Україна є підписантом цілої низки міжнародних документів, що регламентують зниження споживання викопного палива та розвиток відновлюваних джерел енергії. Розвиток імітаційної моделі прогнозування попиту на паливо з урахуванням діючих екологічних обмежень дасть змогу визначити необхідні обсяги споживання палива за різних сценаріїв повоєнного відродження економіки України.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Питанням прогнозування попиту на паливно-енергетичні ресурси з урахуванням впливу екологічного чинника присвячено низку публікацій як зарубіжних, так і українських учених.

Так, у статті індійських учених [1] запропоновано емпіричну залежність між вуглецемісткістю як співвідношення викидів CO_2 на душу населення на одиницю ВВП у постійних цінах та низкою факторів: питомою енергоємністю ВВП на душу населення, питомим споживанням енергії з відновлюваних джерел на душу населення, загальною рентою на природні ресурси, економічним зростанням ВВП на душу населення на прикладі Індії. Цей підхід можливо адаптувати для України з визначенням відповідних коефіцієнтів багатofакторної моделі.

Дослідження німецьких учених К. Ріпп і Ф. Штайнке з Дармштадтського технічного університету [2] присвячено моделюванню в часі викидів CO_2 в мультимодальних енергетичних системах зі зберіганням енергії в накопичувачах. У таких мультимодальних енергетичних системах для оцінки придатності місцевих заходів зі скорочення викидів CO_2 важливо визначити вплив моделі споживання окремого гравця на загальні викиди CO_2 . Представлено два нові методи обчислення залежних від часу викидів CO_2 , які стосуються різних цілей: перший метод визначає викиди CO_2 енергетичної системи як ϵ ; другий метод аналізує, як загальні викиди CO_2 зміняться у відповідь на нескінченно малі зміни попиту. Щоб визначити залежну від часу інтенсивність викидів CO_2 , аналіз «що якщо» аналізує диференціальні зміни загальних викидів CO_2 по відношенню до змін попиту.

В Інституті загальної енергетики (ІЗЕ) НАН України багато років розроблялись імітаційні математичні моделі обчислення прогнозного попиту на енергоресурси з урахуванням впливу різних факторів: структурні зміни в економіці внаслідок трансформації пострадянської економіки у ринкову, технологічне енергозбереження за різних сценаріїв упровадження проєктів, запропоновано комплексний метод прогнозування попиту на енергоресурси. Цей метод прогнозування попиту на енергетичні ресурси одночасно на кількох ієрархічних рівнях: «країна – види економічної діяльності» або «країна – регіони – види економічної діяльності» представлений у роботах [3; 4]. Цей підхід ґрунтується на існуючих укрупнених за видами економічної діяльності або регіонами статистичних даних та дає змогу визначити прогнози енергоспоживання за умови неточності статистичних даних, отриманих із різних джерел.

Також в ІЗЕ НАН України розроблялись математичні моделі різного класу, що враховували екологічний чинник. Так, робота В.М. Макарова та М.О. Перова [5] досліджує вплив викидів парникових газів в атмосферу на вуглевидобувних шахтах. За основу для розрахунку коефіцієнту екологічної прийнятності беруться значення питомих викидів метану під час видобутку вугілля.

У статті [6] І. Лещенко та співавторами розроблено прогнози викидів ПГ в еквіваленті діоксиду вуглецю та викидів метану від вугільного сектора до 2040 р. Визначено, що у вугільному секторі викиди ПГ не перевищать значення, визначеного відповідно до Оновленого національно визначеного внеску, для всіх розглянутих сценаріїв до 2030 р.

Б.А. Костюковський у статті [7] одним із важливих завдань під час прогнозування розвитку об'єднаної електроенергетичної системи (ОЕС) України відзначає оцінку обсягів викидів парникових газів (ПГ) у перспективі за різних сценаріїв її розвитку.

У публікації [8] О.С. Маляренко та співавторів розглянуто взаємозв'язок між показниками енергетичної та екологічної ефективності. Виявлено, що динаміка зміни цих показників має схожу тенденцію, але не тотожну функцію, що її описує, тому прогнозування обсягів викидів не прямо пропорційно обсягам спожитого палива. Має значення структура споживання палива.

У статті [9] О.С. Маляренко та Н.П. Іваненко розглянуто обмеження на викиди парникових газів до розрахункової імітаційної моделі прогнозування попиту на паливо та його види. Це обмеження урахує узяті Україною зобов'язання в Оновленому національно визначеному внеску до Паризької угоди та дає змогу аналізувати за сценаріями доцільні варіанти прогнозного попиту.

Відомою в Україні математичною моделлю є TIMES-Україна – лінійна оптимізаційна модель енергетичної системи, яка забезпечує багатотехнологічне представлення енергетичної системи (знизу вгору) для оцінки енергетичної динаміки в довгостроковій перспективі. У ній як показники екологічної ефективності використовуються вуглецевоємність ВВП та питомі викиди парникових газів на одну особу [10]. Із 2015 р. змінилися форми статистичних даних, більше не надається інформація про енергоспоживання за видами продукції, по яких обчислюється енергоспоживання у даній моделі. Тому результати, що отримані за цією моделлю, потрібно порівнювати з результатами, отриманими за іншими моделями.

Мета дослідження

Метою дослідження є розвиток імітаційної математичної моделі прогнозування попиту на паливо, яка на верхньому рівні враховує показник граничних викидів парникових газів у 2030 р., що дає змогу вибирати прогнозні сценарії попиту, передусім на вугілля і нафтопродукти, які за сумарними прогнозними обсягами викидів парникових газів від споживання палива відповідають визначеним обмеженням на граничну енергоємність ВВП.

Виклад основного матеріалу дослідження

Імітаційна математична модель обчислення прогнозного попиту на енергоресурси з урахуванням впливу структурних змін в економіці та технологічного переозброєння на рівні країни (ТОР-рівень) визначалася за відповідними показниками енергетичної ефективності: енергоємністю ВВП базового року та оціненим на перспективу потенціалом енергозбереження [3]:

$$P_t^j = e_{\sigma}^{BBIIj} V_t^{BBII} - \Delta E_{\sigma-t}^{Sj} = (e_{\sigma}^{BBIIj} - \Delta e_{\sigma-t}^{BBIIj}) V_t^{BBII} \quad (1)$$

де e_{σ}^{BBIIj} – енергоємність ВВП j -виду енергоресурсу для базового року; $\Delta E_{\sigma-t}^{Sj}$ – обсяг економії (перевитрат) j -виду енергоресурсу за рахунок зміни s -структури економіки (зміни співвідношення обсягів ВДВ за секторами до ВВП та обсягів випуску продукції в i -секторі до ВДВ узагальнюючого сектору, розраховується за методикою [3]); $\Delta e_{\sigma-t}^{BBIIj}$ – різниця між енергоємністю ВВП у базовому (e_{σ}^{BBIIj}) та в t -му (e_t^{BBIIj}) роках за s -ї структури ВВП:

$$\Delta e_{\sigma-t}^{BBIIj} = \sum_s \sum_j \sum_i (\Delta e_{mex\ t}^{BBIIj} + \Delta e_{cmp\ t}^{BBIIj}) = \sum_j \sum_i \sum_m (\alpha_{\sigma}^{ml} e_{\sigma}^{ml} - \alpha_t^{ml} e_t^{ml}) + \sum_i \sum_k e_{\sigma}^{ks} \cdot \Delta r_t^{ks} + \sum_j \sum_i e_{\sigma}^{is} \cdot \Delta p_t^{is} \quad (2)$$

де α_{σ}^{ml} , α_t^{ml} – частка впровадження новітньої технології у базовому та t -му роках; Δr_t^{ks} – зміна частки k -ої секції економіки, що входить до складу укрупненого сектору i (внутрісекторні структурні зміни); Δp_t^{is} – зміна частки i -го укрупненого сектору в структурі економіки країни.

До рівняння (1) додавалися такі обмеження:

- 1) за енергоємністю ВВП: $e_t^{BBIIj} < e_{\sigma}^{BBIIj}$;
- 2) за структурою виробництва ВВП (структура ВВП за укрупненими секторами економіки): $\sum_i p_i^{is} = 1$, де p_i^{is} – частка ВДВ i -го сектору економіки у структурі ВВП;
- 3) за структурою ВДВ за ВЕД (структура окремого сектору за видами економічної діяльності): $\sum_k r_i^{ks} = 1$, де r_i^{ks} – частка ВДВ k -го виду економічної діяльності у структурі ВДВ i -го сектору економіки.

Із проведених варіантних розрахунків енергоємності ВВП за різних s -х структур економіки у t -му році визначається найбільш ефективна щодо використання ПЕР структура за умови найбільшого зниження енергоємності ВВП: $\Delta e_{\sigma-t}^{BBI S_j} > 0$.

Потенціал енергозбереження $\Delta E_{\sigma-t}^{S_j}$ у приведеному вище рівнянні (1) згідно з розробленою в ІЗЕ НАН України методологією визначався як технологічний (за різницею показників енергоефективності між існуючими показниками та перспективними) [3] або економічно доцільний, який потребує комплексної оцінки заходів з енергозбереження [3].

Традиційну комплексну оцінку заходів з енергозбереження наведено у [3].

Оновлений варіант імітаційної моделі прогнозування попиту враховує вплив зміни структури економіки, обсяги впровадження технологічного потенціалу енергозбереження та оцінку обсягів заміщення вуглецеємного палива (вугілля, важкі нафтопродукти) на менш вуглецеємне або нейтральне (природний та очищені штучні горючі гази (біогаз, звалищ ний газ), тверде біопаливо). Урахування екологічних чинників потребує економічного обґрунтування доцільності впровадження заходів із підвищення енергоефективності чи обґрунтування обсягів їх заміщення менш шкідливими. Упровадження природоохоронних заходів з очищення викидів від ЗР потребує оцінки додаткових енерговитрат на роботу очисного обладнання. Урахування в одній моделі впливу заходів зі зниження викидів парникових газів (ПГ) та забруднюючих речовин дуже складно, оскільки обмеження на відповідні викиди контролюються на різних ієрархічних рівнях економіки: парникових газів – на верхньому рівні (країна), забруднюючих речовин – на рівні технологій.

Для рівня країни [9]:

$$E_{ij}^{TOP} = b_{\sigma j}^{BBI} V_t^{BBI} \pm E_{ij}^{mpi} - \sum_n \Delta E_{ijn}^{mexi} \mp \sum_l E_{ijl}^{ex}, \quad (3)$$

де E_{ij}^{TOP} – прогноз споживання j -виду палива у t році на TOP-рівні (країна або регіон); $b_{\sigma j}^{BBI}$ – енергоємність ВВП j -виду палива у базовому році b на TOP-рівні, кг у.п./грн (кг н.е./грн, МДж/грн); V_t^{BBI} – прогнозний обсяг ВВП економіки у t році на TOP-рівні у постійних цінах (приведених до цін базового року), тис грн; $\pm E_{ij}^{mpi}$ – структурний потенціал енергозбереження: сумарне зниження або збільшення енергоспоживання j виду палива у t році шляхом зміни i структури економіки та/або структури її секторів, кг у.п./грн (кг н.е./грн, МДж/грн); $\sum_n \Delta E_{ijn}^{mexi}$ – технологічний потенціал енергозбереження: зниження споживання j виду палива у t році шляхом n технологічних змін, кг у.п./грн (кг н.е./грн, МДж/грн); $\mp \sum_l E_{ijl}^{ex}$ – обсяги заміщення j виду палива іншими низьковуглецевими видами палива або додаткові обсяги енергоресурсів на функціонування l екологічних технологій, що не є енергоощадними у t році, тис т у.п. (тис т н.е., ГДж).

До рівняння (3) додаються обмеження на обсяги прогнозних викидів парникових газів від споживання органічного палива (сумарно за видами) згідно з Оновленим національно визначеним внеском України до Паризької угоди 2021 р. (НВВ2) [9], який надає обмеження на прогнозні обсяги викидів парникових газів у 2030 р. до 35% від обсягу викидів парникових газів у 1990 р.:

$$V_{2030}^{PI} = (V_{2030}^{CO2} + \kappa_1 V_{2030}^{CH4} + \kappa_2 V_{2030}^{N2O}) \leq 0,35 V_{1990}^{PI}, \quad (4)$$

де V_{2030}^{PI} – обсяг викидів парникових газів у 2030 р., кт $CO_{2-екв.}$; V_{2030}^{CO2} – обсяг викидів діоксиду вуглецю у 2030 р., кт $CO_{2-екв.}$; \square_1 – коефіцієнт переводу метану у т $CO_{2-екв.}$, $\kappa_1 = 25$; V_{2030}^{CH4} – обсяг викидів метану в 2030 р., кт $CO_{2-екв.}$; \square_2 – коефіцієнт переводу закису азоту у т $CO_{2-екв.}$, $\kappa_2 = 298$; V_{2030}^{N2O} – обсяг викидів закису азоту в 2030 р., кт $CO_{2-екв.}$; V_{1990}^{PI} – обсяг викидів парникових газів у 1990 р., кт $CO_{2-екв.}$.

Також запропоновано «Удосконалену комплексну оцінку заходів з енергозбереження», на яку отримано свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 125029 від 25.03.2024 [11], у якій запропоновано такі показники:

1) Енергетичні показники: уведено прогнозне граничне значення енергоємності ВВП (2030 р.), за якого будуть дотримані екологічні вимоги: $V_{ПЗр}^{2030} \leq 0,35V_{ПЗ}^{1990}$; що забезпечать обсяги структурного – $\Delta E_{стр}^{2030}$ і технологічного енергозбереження – $\Delta E_{техн}^{2030}$ на макрорівні.

2) Екологічні показники: уведено прогнозне граничне значення питомих викидів ПГ ($CO_{2-екв}$), яке визначається за існуючими екологічними обмеженнями по країні та прогнозом ВВП:

$$k_{ПЗр}^{2030} = \frac{V_{ПЗр}^{2030}}{V_{ВВП}^e} \quad (5)$$

Яке оцінене за рівнянням (4)

$$V_{ПЗр}^{2030} = 0,35 V_{ПЗ}^{1990} = 209245,93 \text{ кт } CO_{2-екв}.$$

$$k_{ПЗр}^{2030} \leq 0,0537 \dots 0,074 \text{ кг } CO_{2-екв} / \text{грн ВВП} \quad (6)$$

за прогнозним ВВП $V_{ВВП}^{2030} = 3894,1$ млрд грн (сценарій помірному відновлення економіки та 2827,2 млрд грн (консервативний сценарій).

3) Удосконалена оцінка економічної ефективності впровадження природоохоронних заходів [12]:

1. *Визначення скорочення викидів ПГ та економії енергоресурсів.*
2. *Визначення економії витрат* (на дозволах за викиди, на споживанні енергоресурсів).
3. *Визначення загальних економічних вигод* (сума економії на дозволах та додаткових економічних вигод, зменшена на вартість упровадження заходів).
4. *Визначення витрат на впровадження та експлуатацію.*
5. *Розрахунок чистих вигод.*
6. *Розрахунок економічної ефективності.*
8. *Період окупності* (для заходів, що є чисто екологічними, не обчислюється).
9. *Чиста приведена вартість (NPV).*
10. *Внутрішня норма дохідності (IRR).*

11. *Аналіз чутливості* (проводиться для оцінки впливу зміни ключових параметрів: вартість дозволів, обсяг скорочення викидів, ставка дисконтування на показники економічної ефективності; це дає змогу визначити стійкість результатів до можливих коливань цих параметрів).

Удосконалена комплексна оцінка економічної ефективності потребує достатньо багато вихідних даних, які потрібні для прийняття остаточного рішення щодо доцільності впровадження заходу зі зниження викидів в атмосферу.

Для попередньої оцінки доцільності впровадження заходу можна обмежитися кількома показниками.

Для оцінки впливу викидів забруднюючих речовин необхідно проводити оцінку щодо зниження викидів забруднюючих речовин згідно з Національним планом скорочення викидів від великих спалювальних установок [12], котрий регламентує для конкретних паливоспалюючих установок (енергетичних, металургійних печей, печей нафтопереробних заводів, газотурбінних установок, ін.) нормативи викидів. Алгоритм визначення річного обсягу викидів забруднюючої речовини від спалювальної установки та значення граничних річних викидів за останній рік дії Національного плану наведено у [12]. Найбільше об'єктів, що підпадають під дію Національного плану скорочення викидів ЗР, включено 90 існуючих великих спалювальних установок номінальною тепловою потужністю не менше 50 МВт, яким було надано перший дозвіл на викиди до 1 липня 1992 р. і на яких планується досягти нормативів гранично допустимих викидів на виконання Директиви 2010/75/ЄС про промислові викиди.

Наведемо приклад розрахунків питомих викидів вуглекислого газу і питомої плати за викиди вуглекислого газу і забруднюючих речовин для різних варіантів модернізації Бурштинської ТЕС. Вона працює на вугіллі. Установлена потужність становить 2,3 ГВт. Станція була обладнана електрофільтрами ще в 1978–1980 рр.

Запропоновано три сценарії модернізації. Перший включає заміщення 20% вугілля на біомасу. При цьому викиди вуглекислого газу зменшуються на 20%, оксиду сірки – приблизно на 20% (за рахунок низького вмісту сірки в біомасі), оксидів азоту – теж приблизно на 20% (за рахунок композиційного ефекту), пилу – на 10% (нижча зольність).

Другий сценарій включає підвищення ККД (заміна пальників на більш ефективні) за рахунок модернізації обладнання. Усі викиди зменшуються пропорційно зменшенню споживання палива.

Третій сценарій включає установавання очисного обладнання для відхідних газів, а саме: десульфуризацію відхідних газів (FGD), селективне каталітичне відновлення (SCR) і підсиленний пилевловлювач. При цьому викиди вуглекислого газу не змінюються, викиди оксиду сірки зменшуються на 95%, оксидів азоту – на 90%, пилу – на 98%.

У табл. 1 наведено питомі викиди вуглекислого газу і забруднюючих речовин для запропонованих сценаріїв і базового, який припускає роботу ТЕС у поточному режимі.

Таблиця 1

Питомі викиди вуглекислого газу і забруднюючих речовин, т/МВт·год [13]

Сценарій	CO ₂	NO _x	SO ₂	Пил
База	1,032	0,003273	0,008727	0,000545
20% біомаси	0,8256	0,002618	0,006982	0,000490
модернізація (η=38%)	0,896	0,002843	0,007579	0,000473
FGD+SCR+фільтри	1,032	0,000327	0,000436	0,000011

У табл. 2 наведено плату за викиди за ставками України, а в табл. 3 – плату за викиди за ставками ЄС. У другому випадку пил пропущено, оскільки гармонізованого податку немає.

Таблиця 2

Плата за викиди за ставками України, грн/МВт·год [14]

Сценарій	CO ₂ (30 грн/т)	NO _x (2574,43 грн/т)	SO ₂ (2574,43 грн/т)	Пил (96,99 грн/т)	Разом
База	30,96	8,43	22,47	0,05	61,91
20% біомаси	24,77	6,74	17,97	0,05	49,53
модернізація (η=38%)	26,88	7,32	19,52	0,05	53,77
FGD+SCR+фільтри	30,96	0,84	1,12	0,00	32,92

За українськими ставками найбільше зниження плати дає третій сценарій (очисне обладнання) через зниження викидів SO₂ і NO_x. Перший сценарій також істотно зменшує плату за рахунок CO₂ і SO₂.

Таблиця 3

Плата за викиди за ставками ЄС, €/МВт·год [15]

Сценарій	CO ₂ (€79,5/т)	NO _x (€48/т)	SO ₂ (€64/т)	Разом
База	82,0	0,16	0,56	82,72
20% біомаси	65,6	0,13	0,45	66,17
модернізація (η=38%)	71,2	0,14	0,49	71,82
FGD+SCR+фільтри	82,0	0,02	0,03	82,04

За європейських цін домінує CO₂ (EU ETS). Тому перший сценарій (біомаса) найбільш «вартісно-ефективний» щодо EU ETS, знижує витрати на 16,6 €/МВт·год проти бази; другий сценарій економить близько 0,9 €/МВт·год; а третій – майже не змінює витрати, але різко зменшує локальне забруднення (санітарні/дозвільні вимоги, доступ на ринки).

Таким чином, за чинних податків, якщо мати за мету мінімізацію платежів за забруднювачі, пріоритет має установлення очисного обладнання: -47% платежів проти бази плюс сильний екологічний ефект у регіоні (SO₂/NO_x/пил). Якщо за мету мати зменшення вуглецевого сліду (та підготовка до СВAM/ETS), то перші два сценарії дають кращий результат: -20% CO₂ або -13% CO₂ на МВт·год. відповідно.

За умов ЄС перший сценарій (кофайринг біомаси) дає більш високий результат, ніж другий і третій, із погляду витрат. Водночас третій сценарій критично важливий для відповідності рівням забруднення і локальної якості повітря (без прямої економії по CO₂).

Висновки

У статті представлено розвиток існуючої імітаційної математичної моделі прогнозування попиту на паливо та його види з урахуванням екологічних зобов'язань, яка відрізняється від попередньої версії оновленою комплексною оцінкою заходів, що сприяють зниженню викидів шкідливих речовин. Надано приклади технологій, що сприятимуть скороченню викидів як парникових газів, так і забруднюючих речовин. Представлена модель дає змогу обчислити обсяги прогнозного попиту на паливо в т.у.п./т н.е. та за видами у натуральних одиницях: т вугілля, т нафтопродуктів, тис м куб. газу. Оцінка прогнозних обсягів з урахуванням зміни структури економіки внаслідок воєнної агресії проти України була розглянута у попередніх публікаціях авторів. У даній статті показано приклади застосування комплексної оцінки заходів, що сприятимуть зниженню викидів забруднюючих речовин в атмосферу за сценаріїв упровадження різних варіантів модернізації вугільної ТЕС. Відповідно розраховано питомі викиди парникових газів і забруднюючих речовин, питому плату за ці викиди за ставками, що діють в Україні, та усереднені для Європейського Союзу. Розроблено рекомендації щодо застосування запропонованих сценаріїв. Отримані результати можуть бути використані для оптимізації керування, підвищення енергоефективності та оцінки зниження витрат у промислових і енергетичних об'єктах, а також за прогновної оцінки обсягів упровадження цих технологій (які під час постійних обстрілів енергооб'єктів важко оцінити) для прогнозування попиту на паливо за умов упровадження екологічних заходів.

Список використаної літератури

1. Özkan Oktay, Onyeje Obekpa Nephzibah, Adewale Alola Andrew. Examining the nexus of energy intensity, renewables, natural resources, and carbon intensity in India. [Journal]. *Energy&Environment*. 2023. V. 36, Issue 1. P. 168–186. DOI: <https://doi.org/10.1177/0958305X231169706>
2. Ripp Christopher; Steinke Florian: Modeling Time-dependent CO₂ Intensities in Multimodal Energy Systems with Storage. *Electrical Engineering and Systems Science*. In: ArXiv e-prints, 2019. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1806.04003>
3. Кулик М.М., Маляренко О.Є., Майстренко Н.Ю., Станиціна В.В., Куц Г.О. Енергоефективність та прогнозування енергоспоживання на різних ієрархічних рівнях економіки: методологія, прогнозні оцінки до 2040 року. Київ : Наукова думка, 2021. 234 с.
4. Майстренко Н.Ю., Маляренко О.Є., Горський В.В. Триетапний метод прогнозування рівнів енергоспоживання в економіці з урахуванням регіональних потенціалів енергозбереження. *Проблеми загальної енергетики*. 2020. № 3 (62). С. 37–45. DOI: <https://doi.org/10.15407/pge2020.03.037>
5. Макаров В., Перов М. Оцінка перспективності діючих вуглевидобувних підприємств. *Системні дослідження в енергетиці*. 2023. № 2(73). С. 18–29. DOI: <https://doi.org/10.15407/srenergy2023.02.018>
6. Leshchenko I.Ch., Shulzhenko S., Kaplin M., Maistrenko N., Shcherbyna E. Assessment of the greenhouse gases reduction by the oil and gas sector of Ukraine to meet international climate

- agreements. In: *Zaporozhets, A., Popov, O. (eds) Systems, Decision and Control in Energy IV. Studies in Systems, Decision and Control, vol 456. Springer, Cham.* P. 199–212. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-22500-0_1317
7. Костюковський Б.А. Моделювання розвитку електроенергетичної системи України для обґрунтування Другого національно визначеного внеску щодо обмеження викидів парникових газів. *Системні дослідження в енергетиці*. 2021. № 2(65). С. 28–35. DOI: <https://doi.org/10.15407/pge2021.02.028>
 8. Маляренко О., Іваненко Н., Судариков О. Дослідження взаємозв'язку показників екологічної та енергетичної ефективності на рівні країни. *Системні дослідження в енергетиці*. 2023. № 4(75). С. 84–94. DOI: <https://doi.org/10.15407/srenergy2023.04.084>
 9. Маляренко О., Іваненко Н. Урахування обмежень на викиди парникових газів у моделі прогнозування споживання палива на рівні країни. *Системні дослідження в енергетиці*. 2024. № 1(76). С. 73–84. DOI: <https://doi.org/10.15407/srenergy2024.01.073>
 10. TIMES-Україна. URL: <https://www.timesukraine.tokni.com/about> (дата звернення: 24.10.2025).
 11. Маляренко О.Є., Іваненко Н.П., Судариков О.А. Удосконалена комплексна оцінка заходів з енергозбереження. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 125029 від 25.03.2024.
 12. Маляренко О., Горський В., Іваненко Н., Євтухова Т., Матушкін Д. Комплексна оцінка заходів зі зниження викидів забруднюючих речовин в атмосферу. *Системні дослідження в енергетиці*. 2025. № 1(81). С. 100–110. DOI: <https://doi.org/10.15407/srenergy2025.01.100>
 13. European Environment Agency (EEA). EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook 2023. URL: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/emep-eea-guidebook-2023> Євроагентство екології (дата звернення: 24.10.2025).
 14. Державна податкова служба України (ДПС України). Податковий кодекс, Розділ VIII «Екологічний податок». URL: <https://tax.gov.ua/nk/rozdil-viii--ekologichniy-poda/> (дата звернення: 24.10.2025).
 15. EU4Environment Review of Environmental Taxation in Ukraine. 2023. URL: <https://www.eu4environment.org/app/uploads/2023/09/Env-Taxation-and-Expenditure-Ukraine-pre-final.pdf> (дата звернення: 24.10.2025).

References

1. Özkan, O., Onyeje Obekpa, H., & Adewale Alola, A. (2023). Examining the nexus of energy intensity, renewables, natural resources, and carbon intensity in India. *Energy & Environment*. 36 (1), 168–186. <https://doi.org/10.1177/0958305X231169706> [in English].
2. Ripp, C., & Steinke, F. (2019). Modeling Time-dependent CO₂ Intensities in Multi-modal Energy Systems with Storage. *Electrical Engineering and Systems Science*. In: ArXiv e-prints. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1806.04003> [in English].
3. Kulyk, M.M., Maliarenko, O.Ye., Maistrenko, N.Yu., Stanytsina, V.V. & Kuts, H.O. (2021). *Enerhoefektyvnist ta prohnozuvannia enerhospozhyvannia na riznykh iierarkhichnykh rivniakh ekonomiky: metodolohiia, prohnozni otsinky do 2040 roku* [Energy efficiency and forecasting of energy consumption at different hierarchical levels of the economy: methodology, forecast estimates until 2040]. Kyiv: NVP «Vydavnytstvo «Naukova dumka» NAN Ukrainy» [in Ukrainian].
4. Maistrenko, N.Yu., Maliarenko, O.Ye. & Horskyi V.V. (2020). Tryetapnyi metod prohnozuvannia rivniv enerhospozhyvannia v ekonomitsi z urakhuvanniam rehionalnykh potentsialiv enerhoberezhennia [Three-stage method of forecasting energy consumption levels in the economy with regard for regional energy saving potentials]. *Problemy zahalnoi enerhetyky*, 3(62), 37–45. <https://doi.org/10.15407/pge2020.03.037> [in Ukrainian].

5. Makarov, V. & Perov, M. (2023). Otsinka perspektyvnosti diiuchykh vuhlevydobuvnykh pidpriemstv [Assessment of the Prospectiveness of Operating Coal Mining Enterprises]. *Systemni doslidzhennia v enerhetytsi*, 2(73), 18–29. <https://doi.org/10.15407/srenergy2023.02.018.7> [in Ukrainian].
6. Leshchenko, I.Ch., Shulzhenko, S., Kaplin, M., Maistrenko, N. & Shcherbyna, E. (2023). Assessment of the greenhouse gases reduction by the oil and gas sector of Ukraine to meet international climate agreements. In: Zaporozhets, A., Popov, O. (eds) *Systems, Decision and Control in Energy IV. Studies in Systems, Decision and Control*, vol. 456. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-22500-0_13 [in English].
7. Kostjukovskyi, B.A. (2021). Modeliuvannia rozvytku elektroenerhetychnoi systemy Ukrainy dlia obgruntuvannia Druhoho natsionalno vyznachenoho vnesku shchodo obmezhenia vykydiv parnykovykh haziv [The modelling of Power System of Ukraine development for assessment of Nationally Determined Contribution of Ukraine to the Paris Agreement]. *The Systemni doslidzhennia v enerhetytsi*, 2(65), 28–35. <https://doi.org/10.15407/pge2021.02.028> [in Ukrainian].
8. Maliarenko, O., Ivanenko, N. & Sudarykov, O. (2023). Doslidzhennia vzaiemozviazku pokaznykiv ekolohichnoi ta enerhetychnoi efektyvnosti na rivni krainy. [Study of the relationship of environmental and energy efficiency indicators at the country level]. *Systemni doslidzhennia v enerhetytsi*, 4(75), 84–94. <https://doi.org/10.15407/srenergy2023.04.084> [in Ukrainian].
9. Maliarenko, O. & Ivanenko, N. (2024). Vrakhuvannia obmezhen na vykydy parnykovykh haziv u modeli prohnouzuvannia spozhyvannia palyva na rivni krainy. [Taking Into Account Limitations on Greenhouse Gas Emissions in the Fuel Consumption Forecasting Model at the National Level]. *Systemni doslidzhennia v enerhetytsi*, 1(76), 73–84. <https://doi.org/10.15407/srenergy2024.01.073> [in Ukrainian].
10. TIMES-Ukraina. (2025). Ofitsiinyi sait [Official site]. Retrieved from <https://www.timesukraine.tokni.com/about> [in Ukrainian].
11. Maliarenko, O.Ye., Ivanenko, N.P. & Sudarykov, O.A. Udoskonalena kompleksna otsinka zakhodiv z enerhozberezhennia. Svidotstvo pro reiestratsiiu avtorskoho prava na tvir №125029 vid 25.03.2024 r. [Improved comprehensive assessment of energy saving measures. Certificate of registration of copyright for the work No. 125029 dated 03/25/2024] [in Ukrainian].
12. Maliarenko, O., Horskyi, V., Ivanenko, N., Yevtukhova, T. & Matushkin, D. (2025). Kompleksna otsinka zakhodiv zi znyzhennia vykydiv zabrudniuiuchykh rehovyn v atmosferu [Comprehensive assessment of measures to reduce atmospheric pollutant emissions]. *Systemni doslidzhennia v enerhetytsi*, 1(81), 100–110. <https://doi.org/10.15407/srenergy2025.01.100> [in Ukrainian].
13. European Environment Agency (EEA). (2023). EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook 2023. Ofitsiinyi sait [Official site]. Retrieved from: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/emep-eea-guidebook-2023> Yevroahentstvo ekolohii [in English].
14. Derzhavna podatkova sluzhba Ukrainy (DPS Ukrainy). (2025). Podatkovi kodeks, Rozdil VIII «Ekolohichni podatok». [State Tax Service of Ukraine (DTS of Ukraine). Tax Code, Chapter VIII «Environmental Tax»]. Ofitsiinyi sait [Official site]. Retrieved from <https://tax.gov.ua/nk/rozdil-viii--ekologichniy-poda/> [in Ukrainian].
15. EU4Environment. (2023). Review of Environmental Taxation in Ukraine. Retrieved from <https://www.eu4environment.org/app/uploads/2023/09/Env-Taxation-and-Expenditure-Ukraine-pre-final.pdf> [in English].

Маляренко Олена Євгеніївна – к.т.н., старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник відділу прогнозування енергетичної ефективності та перспективних паливно-енергетичних балансів Інституту загальної енергетики НАН України. E-mail: malyarenlena@gmail.com, ORCID: 0000-0001-5882-916X.

Іваненко Наталія Петрівна – к.т.н., ст. дослідник, старший науковий співробітник відділу прогнозування енергетичної ефективності та перспективних паливно-енергетичних балансів Інституту загальної енергетики НАН України. E-mail: ivanenkonataliya@gmail.com, ORCID: 0000-0001-5438-1556.

Maliarenko Olena Yevgeniivna – Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Leading Researcher at the Department of Energy Efficiency Forecasting and Future Fuel and Energy Balances of the General Energy Institute of the NAS of Ukraine. E-mail: malyarenlena@gmail.com, ORCID:0000-0001-5882-916X.

Ivanenko Nataliya Petrivna – Candidate of Technical Sciences,, Senior Researcher, Senior Researcher at the Department of Energy Efficiency Forecasting and Future Fuel and Energy Balances of the General Energy Institute of the NAS of Ukraine. E-mail: ivanenkonataliya@gmail.com, ORCID: 0000-0001-5438-1556.

Дата надходження статті: 31.10.2025

Дата прийняття статті: 25.11.2025

Опубліковано: 30.12.2025

