

УДК 504: 620.9

М.В. ЛЕБІДЬ, Інститут загальної енергетики НАН України
вул. Антоновича, 172, м. Київ, 03150, Україна

АНАЛІЗ РИНКОВИХ МЕХАНІЗМІВ РЕГУЛЮВАННЯ ВИКИДІВ ПАРНИКОВИХ ГАЗІВ У СВІТІ ТА ЇХ ВРАХУВАННЯ В ІСНУЮЧИХ МОДЕЛЯХ ПРОГНОЗУВАННЯ РОЗВИТКУ ЕНЕРГЕТИКИ

Представлено огляд системи торгівлі квотами на викиди парникових газів. Наявний досвід показує, що за умови правильно впровадженої системи, торгівля квотами на викиди може бути ефективним, надійним і прозорим інструментом для досягнення економічно ефективних скорочень викидів парникових газів. Водночас досягається мобілізація представників приватного сектору, залучаються інвестиції та активізується міжнародне співробітництво. Найбільша з таких систем діє в Європейському Союзі з 2005 року. Угодою про асоціацію між Україною та ЄС у сфері екологічної безпеки та сталого розвитку передбачено впровадження подібної системи в Україні. У статті оглянуто моделі, що використовуються для моделювання розвитку енергетики, зокрема ціни на викиди. Автор спирається на концептуальний аналіз та на деякі найбільш практичні уроки, отримані станом на сьогодні внаслідок впровадження системи торгівлі квотами на викиди парникових газів у Європейському Союзі та по всьому світі.

Ключові слова: торгівля, квота, ринковий механізм, парникові гази, ціна, модель прогнозування.

Викиди парникових газів (ПГ) в Україні в 2016 р. [1] склали 338,3 млн. т CO₂екв., що на 64,7% нижче, ніж у 1990 р., і на 5% менше, ніж у 2015 р. Найбільше викидів ПГ, 221,7 млн. т CO₂екв. або приблизно 65,5% всіх викидів ПГ в Україні у секторі «Енергетика», а саме при спалюванні палива. У 2016 р. викиди ПГ зменшились на 69,4%, порівняно з 1990 р.

З 2011 р. в Україні діє вуглецевий податок, який охоплює практично всі стаціонарні об'єкти, включаючи підприємства енергетичного сектору та промисловості. Ставка податку за викиди CO₂ на січень 2018 р. становить 0,41 грн. за 1 тону. Передусім через такий низький рівень податку існуюча податкова система не є рушієм скорочення викидів ПГ. Тому метою статті є аналіз ринкових механізмів регулювання викидів ПГ у світі і застосування цих механізмів в умовах України, а також огляд існуючих моделей

прогнозування розвитку енергетики з урахуванням таких механізмів.

Наразі у світі існує два найбільш розповсюджені ринкові механізми скорочення викидів ПГ: торгівля квотами на викиди ПГ та вуглецевий податок. Обидва механізми мають на меті формування такої ціни на викиди, що може:

1. Змінити поведінку виробників, споживачів та інвесторів.
2. Стимулювати інновації в технології та їх практичне застосування.
3. Створити екологічні, економічні та соціальні супутні переваги.

Ключова різниця полягає в тому, що при вуглецевому податку уряд встановлює ціну та дозволяє ринку визначати кількість викидів ПГ. При торгівлі квотами на викиди уряд встановлює обмеження по обсягу викидів та дозволяє ринку визначати ціну.

Досвід використання вуглецевого податку показав, що він є ефективним інструментом керування попитом та поповнення

бюджету, але не вносить суттєвих змін в галузеву структуру. Він підходить для регулювання великої кількості однорідних джерел викидів, а також потребує точного адміністрування, внесення постійних поправок в податкове законодавство, залежно від економічної ситуації та пріоритетів соціально-економічної політики. Тоді як при торгівлі квотами на викиди відбувається оптимізація витрат для досягнення екологічних показників, стимулювання інвестицій у підвищення енергоефективності, енергозбереження та модернізацію.

Неможливо однозначно сказати, який ринковий механізм є найкращим способом визначення ціни на викиди CO₂. В основному, це залежить від того, як кожна система розроблена, що й буде визначати економічну ефективність та вплив на навколишнє середовище. Наприклад, наскільки сильним є економічний стимул (тобто ціна на викиди CO₂) для зменшення викидів ПГ та переходу на більш екологічно чисту «зелену» енергію або чи інвестуються отримані кошти у зелену інфраструктуру або відповідні податкові пільги. Ці два підходи є подібними і тому при якісній їх розробці можна використовувати як один, так і інший, або комбінацію цих підходів.

Система торгівлі квотами на викиди ПГ (СТВ) працює за принципом cap-and-trade («обмеження та торгівля»). Тобто, уряд встановлює верхню межу або «обмеження» на загальний об'єм викидів ПГ в одному чи декількох секторах економіки. Компанії в цих секторах повинні мати дозвіл (квоту) на кожну одиницю викидів, які вони здійснюють. Дозволи на викиди визначаються, залежно від конкретних параметрів діяльності, таких як виробництво або споживання енергії. Квоти можуть розподілятися безкоштовно, ґрунтуючись на певному поєднанні історичних даних про викиди, об'ємів виробництва та/або контрольних показників, або ж продаватися на аукціоні. Продаж на аукціоні створює надходження до бюджету. Учасники системи можуть обрати торгівлю квотами або перенесення їх на наступний період (збереження на рахунок) для використання в майбутньому.

Встановлення верхнього ліміту і створення ринку торгівлі квотами призводить

до виникнення єдиної ціни на квоти, що створює стимул скорочувати обсяги викидів доти, доки витрати на скорочення обсягів викидів є нижчими за цю ціну. Результатом є нижча ціна на товари та послуги. Більш суворий верхній ліміт означає меншу пропозицію квот, вищі ціни та міцніший стимул скорочувати обсяги викидів. Завчасне встановлення верхнього ліміту забезпечує довгостроковий сигнал ринку, тому учасники можуть відповідним чином планувати і робити інвестиції.

Кінець кожного звітного періоду є контрольною точкою для перевірки відповідності реального об'єму викидів кожного підприємства квотам на викиди, що були отримані або куплені ними. Якщо існуючих квот не вистачає, то держава має встановити штрафи за недотримання зобов'язань. При цьому розмір штрафів має бути таким, щоб дотримання зобов'язань було найбільш вигідним способом введення бізнесу, тобто штрафи повинні бути значно вище ціни на квоти.

Найбільша регіональна СТВ діє в країнах ЄС [2]. Свої СТВ мають такі країни, як Швейцарія, Казахстан, Нова Зеландія, Республіка Корея, також існує СТВ на рівні міст або окремих штатів. Щорічні обсяги світової торгівлі перевищують 6 млрд. тонн CO₂-екв [3]. Ціни в СТВ у 2016–2017 рр. коливались від 3 до 16 USD/т CO₂-екв [4].

Європейську систему торгівлі квотами на викиди (СТВ ЄС) запроваджено у січні 2005 р. відповідно до Директиви 2003/87/ЄС [5]. СТВ діє у 28 країнах ЄС, а також Ісландії, Ліхтенштейні та Норвегії, обмежує викиди ПГ від понад 12000 установок з виробництва теплової та електричної енергії, промисловості; включає операторів повітряних суден з викидами понад 10000 т CO₂/рік. СТВ охоплює близько 45% викидів ПГ ЄС. СТВ ЄС вже пройшла дві фази і наразі знаходиться на третій фазі своєї дії.

Третя фаза СТВ ЄС діє (2013–2020 рр.) відповідно до Директиви 2009/29/ЄС [6]. На цій фазі внесено зміни у принципи та правила СТВ, зокрема, обмеження на обсяг викидів, який застосовується для всіх країн ЄС, для більш ефективного досягнення цільового скорочення викидів ПГ. Обмеження на викиди буде зменшуватись на 1,74%

щороку для того, щоб зменшити викиди на 21% у 2020 р., порівняно з 2005 р.

Основною проблемою третього періоду став великий надлишок квот, переведених з другого періоду, що призвело до того, що ціна квоти становила лише 3—7 євро за тону CO₂. Крім того, Європейська комісія запропонувала створити резерв ринкової стабільності в наступному торговому періоді, який повинен збалансувати попит та пропозицію шляхом коригування обсягів аукціону.

У грудні 2014 р. почалися публічні консультації щодо перегляду СТВ на пост-кіотський період (2021—2028 рр.), в якому ЄС має намір повністю переглянути Директиву 2009/29/ЄС щодо скорочення викидів ПГ до 2026 р. Вони встановили мету досягти 43% скорочення викидів у СТВ ЄС, порівняно з рівнем 2005 р. Пропозиція передбачає [7], що загальна кількість квот знижуватиметься щорічно на 2,2% з 2021 р., порівняно з 1,74% зараз. Один з ключових моментів пропозиції – це динамічний розподіл безкоштовних квот, у тому числі:

- оновлення контрольних показників (бенчмаркінгів);
- краще узгодження безкоштовних квот з рівнями виробництва;
- створення інноваційного фонду та фонду модернізації для вирішення інноваційних та інвестиційних проблем, пов'язаних з переходом на низьковуглецеву економіку;
- безкоштовні квоти залишаються доступними в країнах з низькими доходами для модернізації енергетичного сектору.

Основний метод розподілу квот модифіковано з історичного розподілення (1 період) до продажу дозволів на аукціоні (3 період) для енергетики, безкоштовний розподіл для промисловості з поступовим збільшенням розподілу дозволів за допомогою продажу на аукціоні. У 2016/17 рр., розподіл більш ніж 40% всіх перевірених викидів відбувався за допомогою аукціону [8].

Не всі установки включаються у СТВ, наприклад, для енергетичних об'єктів порогом для включення у СТВ ЄС є номінальна теплова потужність 20 МВт (крім небезпечних установок або муніципальних установок зі спалювання сміття).

Останні офіційні данні [9] СТВ ЄС показують, що викиди ПГ впали на 2,7% в 2016 р., порівняно з попереднім роком. Загальне зменшення викидів у СТВ ЄС в основному пов'язано з енергетичним сектором. Викиди в енергетичному секторі, на який приходилось трохи більше 60% від загальних викидів СТВ у 2016 р., скоротились приблизно на 40 млн. тонн, порівняно з попереднім роком, що становить понад 4% від загального обсягу викидів у секторі. Загальне скорочення викидів в енергетичному секторі більше, ніж загальне скорочення викидів у СТВ ЄС. Таким чином, інші енергоємні промислові сектори, що входять у СТВ ЄС, сукупно трохи збільшили свої викиди. В енергетичному секторі СТВ ЄС 60% від загального скорочення викидів відноситься до Великобританії. Таке скорочення відбулось у зв'язку з перевищенням ціни на квоту у СТВ, що запровадив уряд країни. Це призвело до високих цін на викиди вуглецю, що, в свою чергу, призвело до закриття багатьох вугільних електростанцій [10]. Ще одна третина від загального скорочення викидів в енергетиці відбулась в Іспанії. Скорочення обумовлено змінами в структурі спалювання палива за рахунок заміщення вугілля природним газом на електростанціях. Крім того, зростання відновлюваної енергетики теж суттєво вплинуло на показник викидів. Дані, надані іспанським оператором Red Eléctrica, показали, що частка відновлювальних джерел у виробництві електроенергії зросла на 4% і склала 41,1%. Більш того, попит на електроенергію виріс – це демонструє, що зниження викидів ПГ не пов'язано з низьким попитом.

І навпаки, у ряді держав-членів викиди в енергетичному секторі фактично зросли, порівняно з 2015 р. Зокрема, це сталося в Нідерландах та Франції, де викиди виросли більш, ніж на 8 млн. тонн. У Франції збільшення викидів від енергетичного сектору відбулось через скорочення виробництва електроенергії на атомних електростанціях. Для протидії цьому зменшенню ряд традиційних електростанцій значно збільшили відпуск електроенергії, що призвело до збільшення викидів. У Нідерландах дві новозбудовані вугільні електростанції внесли значний вклад у збільшення викидів ПГ в країні.

Верховна Рада України та Європейський Парламент 16 вересня 2014 р. ратифікували Угоду про асоціацію між Україною, з одного боку, та ЄС, Європейським співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами, з іншого боку. Угода містить низку важливих положень щодо формування та реалізації політики у сфері зміни клімату – це поступове наближення законодавства України до права та політики ЄС у сфері охорони навколишнього природного середовища, розвиток та імплементація політики з питань зміни клімату. Додаток ХХХ до Угоди, підрозділ «Зміна клімату та захист озонового шару» [11] містить положення, пов'язані з імплементацією Директиви 2003/87/ЄС, а саме:

1. Прийняття національного законодавства та визначення уповноваженого органу.
2. Визначення відповідних установок та перелік ПГ.
3. Розробка національного плану розподілу квот на викиди ПГ між установками.
4. Запровадження дозвільної системи на викиди ПГ.
5. Створення системи МЗВ викидів ПГ, а також процедури консультацій з громадськістю.

Згідно Паризької угоди, яку Україна ратифікувала у 2016 р., необхідно визначити основні стратегічні ініціативи щодо переходу до низьковуглецевої економіки на засадах сталого розвитку та відповідно до національних пріоритетів. Для енергетичного сектора країни це є перехід до енергосистеми, яка передбачає використання джерел енергії із низьким вмістом вуглецю, розбудову джерел чистої електричної та теплової енергії, підвищення енергоефективності та енергозбереження, стимулювання використання альтернативних нафтопродуктам моторних палив. Декарбонізація енергетичної системи призведе до структурних змін в економіці, насамперед через зниження попиту на вичопні види палива.

Міжнародний досвід підтверджує, що з економічної точки зору СТВ є найбільш ефективним механізмом для скорочення викидів ПГ. Однак, практичне впровадження цього інструменту є достатньо складним та

потребує ретельної підготовки та відповідних витрат. Так, до переваг впровадження СТВ в Україні можна віднести наступне:

- виконання міжнародних зобов'язань зі скорочення викидів ПГ;
- стимулювання модернізації й підвищення енергоефективності виробничих процесів;
- усунення потенційних перешкод для українського експорту до країн, де викиди ПГ враховуються у виробничих витратах;
- можливість вести точний та прозорий моніторинг викидів ПГ;
- введення в обіг квот створює новий фінансовий інструмент, який може використовуватись, як застава для залучення позикових коштів, тобто залучення інвестицій до ключових секторів економіки;
- точний та достовірний облік викидів ПГ дозволить підприємствам вийти на міжнародний ринок пільгових «зелених» фінансів;
- створення передумов для виходу на регіональний (СТВ ЄС) і можливий світовий (в рамках Паризької угоди) ринки торгівлі квотами на викиди ПГ;
- облік викидів ПГ та списання квот в розрахунку на одиницю продукції створює зручний механізм порівняння ефективності виробництва з національними та зарубіжними підприємствами.

Одним з основних недоліків впровадження СТВ та участі компаній/підприємств у ній є потреба значних як капітальних, так і операційних витрат [12]. Зокрема, це стосується питання точного обліку викидів, тобто впровадження системи МЗВ викидів ПГ, а також придбання дефіциту квот, якщо такий виникне. Тому, на першому етапі Урядом було прийнято рішення щодо створення та впровадження системи МЗВ викидів ПГ для енергетичних та промислових підприємств. Запровадження системи МЗВ може оптимізувати існуючий вуглецевий податок, а також бути основою для подальшого введення СТВ.

Зв'язки між кліматичними, енергетичними, політичними, економічними та іншими системами є дуже складними. Для цілей визначення оптимальних зв'язків між цими системами використовуються енергетично-

економічні моделі [13]. Їх можна класифікувати наступним чином: частково рівноважні енергетично-економічні моделі, такі як MESSAGE, POLES, GAINS, GET та ін.; імітаційні моделі: MiniCAM, PRIMES та TAIMER; моделі рівноваги: MERGE та GEM-E3.

Енергетично-економічно-кліматичні моделі використовуються для визначення витрат або порівняння витрат з витратами по базовому сценарію для досягнення певних скорочень викидів; у них оцінюється, чи є доцільним досягнення кліматичних цілей, потенційна роль та внесок новітніх технологій; визначаються майбутній та базовий сценарій будівництва з урахуванням таких параметрів як, ріст населення, урбанізація, розвиток економіки, обмеження у ресурсах та розвиток технологій.

Частково рівноважні енергетично-економічні моделі та рівноважні моделі, такі як MESSAGE, POLES, GAINS, GET побудовані за підходом «згори-вниз», використовуються переважно для оцінки впливу енергетичної політики, зокрема, щодо скорочення викидів CO₂, на економіку країни і навпаки. Суттєвим недоліком таких моделей є високий рівень агрегування секторів. Крім того, ці моделі не дозволяють дослідити взаємодію між основними видами діяльності в умовах обмеження викидів, оцінити вплив скорочення викидів на конкурентоспроможність окремих видів діяльності та моделювати ринкові інструменти скорочення викидів.

Моделі енергетичних систем, які належать до класу моделей часткової рівноваги і побудовані за принципом «знизу-вгору», такі як MERGE та GEM-E3, детально описують зв'язки всередині енергетичного сектора. Технології виробництва електроенергії детально описуються набором таких параметрів, як ціна, експлуатаційні витрати, термін експлуатації та окупності, темпи амортизації, питомі витрати ресурсів, інтенсивність викидів тощо. Енергетичні моделі широко використовуються для прогнозів енергетичних викидів CO₂ і граничних витрат скорочення цих викидів.

В імітаційних моделях, таких як PRIMES, основними інструментами екологічної політики є секторальні та націо-

нальні обмеження на викиди, екологічні податки, ринок дозволів, субсидії на витрати скорочення викидів для виробництва електроенергії та тепла.

Для прикладу роботи таких моделей проаналізовано рівноважну модель для європейського ринку вуглецю та енергії Econ Policy's Carbon Market Model [14], яка прогнозує ринкові ціни на викиди CO₂. Ця модель вирішує питання розподілу квот в СТВ ЄС та симулятивно прогнозує ринок електроенергії. Вона охоплює 27 країн ЄС, а також Норвегію та Швейцарію. Модель є комбінацією моделей bottom-up та top-down.

Для ринку електричної енергії модель визначає для кожної країни ціну на електричну енергію на кожен рік, її споживання, виробництво та інвестиції, що були зроблені для покриття потреби в електричній енергії, потужності гідроенергетики, та торгівлю між країнами. Модель визначає довгострокову рівновагу у тому сенсі, що інвестиції в нову генеруючу потужність визначаються у моделі. Оптимізація поведінки виробників та споживачів здійснюється в межах обмежень, що описують фактичні ринкові умови. Обмеження включають податки та регуляторні надбавки, що описують втручання уряду. Невизначеності у моделі не враховуються.

Модель визначає попит на електроенергію, ціну на електроенергію для кінцевого споживача e , виробництво (з урахуванням доходу виробників) у різні місяці m та періоди навантаження a , інвестиції у різні технології з виробництва електроенергії k та ремонт, викиди та торгівлю між країнами, що входять у модель, та країнами поза моделлю c .

Рівняння (1) описує баланс попиту та пропозиції електроенергії:

$$\begin{aligned} & \sum_e \lambda_{l,a} (1 + \sigma_l^d) D_{m,l,e} + Q_{m,a,l} + \sum_s T_{m,a,l,s} + \\ & + \sum_c V_{m,a,l,c} \leq \sum_k X_{m,a,l,k} + \sum_k \Gamma_{m,a,l,k} + \\ & \sum_s \frac{T_{m,a,s,l}}{1 + \sigma_{l,s}^t} + \sum_c U_{m,a,l,c}, \forall_{m,a,l}. \end{aligned} \quad (1)$$

У правій частині рівняння наявна пропозиція дорівнює внутрішньому виробництву

електроенергії ($X_{m,a,l,k}$), яке визначається у моделі плюс автономне виробництво ($\Gamma_{m,a,l,k}$); плюс імпорт від інших країн моделі з врахуванням втрат при транспортуванні ($\frac{T_{m,a,s,l}}{1+\sigma_{l,s}^d}$); плюс імпорт з країн, які не входять до моделі ($U_{m,a,l,c}$). Попит складається з споживання електроенергії в період навантаження ($\lambda_{l,a}(1+\sigma_l^d)D_{m,l,e}$), з урахуванням внутрішніх втрат при транспортуванні (σ_l^d); плюс споживання на ГАЕС ($Q_{m,a,l}$); плюс експорт до країн, що входять у модель ($T_{m,a,l,s}$); плюс експорт у країни, які не входять до моделі ($V_{m,a,l,c}$).

Ціна квоти визначається рівноважним попиту та пропозицією на квоти на ринку СТВ ЄС для всього торговельного періоду, що розглядається. Для ринку квот на вуглецеві викиди модель відображає важливу роль попиту та пропозиції на ринку СТВ ЄС. Загальна кількість пропозицій квот задається кількістю квот, розподілених між учасниками. Загальна потреба у квотах визначається за допомогою рівня діяльності у секторах, які входять до СТВ ЄС: енергетичний, паперово-целюлозний, мінеральна та хімічна промисловість, переробка та авіація. Вони об'єднуються у наступні групи в моделі: електричну, теплову та іншу промисловість. Різниця між викидами за базовим сценарієм та обмеженням, визначеним від загальної кількості квот, визначає необхідне скорочення викидів. Які скорочення викидів є більш актуальними, визначається, залежно від ціни скорочення викидів у різних секторах СТВ.

Загальні викиди CO_2 від виробництва електроенергії, тепла та промислових секторах i визначаються згідно з рівнянням (1):

$$E = \sum_l E_{l,ел.енергії} + \sum_l E_{l,тепла} + \sum_i (\sum_l E_{l,i}^{базовий\ сценарій} - \sum_j A_{j,i}), \quad (2)$$

де $\sum_l E_{l,ел.енергії}$ – викиди від спалювання викопного палива при виробництві електроенергії як на існуючих, так і на нових станціях в кожній країні l ; $\sum_l E_{l,тепла}$ – викиди від виробництва тепла, включені у модель

екзогенно; $\sum_i (\sum_l E_{l,i}^{базовий\ сценарій} - \sum_j A_{j,i})$ – викиди від інших секторів промисловості i , які є частиною СТВ ЄС. Викиди від промисловості залежать від викидів за базовим сценарієм $\sum_l E_{l,i}^{базовий\ сценарій}$ та від заходів зі скорочення викидів, що, у свою чергу, є функцією глобального економічного зростання та внутрішніх умов. $A_{j,i}$ – скорочення викидів у галузях промисловості з використанням заходів зі скорочення викидів j . Доцільність та обсяги впровадження таких заходів залежать від граничних витрат на скорочення викидів ПГ та ціни на квоти. Таким чином, A є ендогенною змінною. Обсяги зменшення викидів у кожному секторі промисловості обмежується потенціалом впровадження відповідних заходів:

$$A_{i,j} \leq A_{i,j}^{max}. \quad (3)$$

Загальні викиди від усіх установок не мають перевищувати загальну кількість квот \bar{E} , що задається обмеженням (4):

$$E - \hat{E} \leq \bar{E}. \quad (4)$$

Якщо загальні викиди перевищують обмеження СТВ, треба заплатити штраф на перевищені викиди \hat{E} (на додаток до квот, які треба купити на ринку).

Оскільки СТВ ЄС є системою, де квотами можна торгувати, то загальне обмеження є релевантним, не індивідуальним обмеженням країн. Таким чином рівняння (4) застосовується для всього СТВ ЄС, а не для окремих країн та установок.

Рішення моделі знаходиться шляхом максимізації площі під кривою попиту за винятком приватних економічних витрат, включаючи короткострокові граничні витрати виробників ($\delta_{l,k} X_{m,a,l,k}$), податки ($\tau_{l,e}^m, \tau_{l,e}^e, \tau_{l,e}^o$) та тарифи ($\tau_{l,e}^n, \tilde{p}_{m,l}$), витрат на експорт ($\pi_{c,a}^e V_{m,c,l,a}$) та імпорт ($\pi_{c,a}^i U_{m,c,l,a}$) у країни, що не входять до моделі, інвестиційні витрати ($\iota_{k,l} I_{k,l}$) та витрати на ремонт ($\varsigma_{k,l} J_{k,l}$), затрати на заходи зі скорочення викидів CO_2 ($\varpi_{i,j} A_{i,j}$) та штрафи за перевищення встановленого СТВ обмеження ($\vartheta \hat{E}$):

$$\begin{aligned}
 W = & \sum_{m,a,l} \{ \sum_e W_{m,l,e} (D_{m,l,e}) - \sum_k \delta_{l,k} X_{m,a,l,k} - \\
 & - \sum_e (\tau_{l,e}^n + \tau_{l,e}^e + \tau_{l,e}^o) D_{m,l,e} - \sum_e (\tilde{p}_{m,l} + \tau_{l,e}^n + \\
 & \tau_{l,e}^e + \tau_{l,e}^o) \tau_{l,e}^m D_{m,l,e} + \sum_c \pi_{c,a}^e V_{m,c,l,a} - \\
 & - \sum_c \pi_{c,a}^i U_{m,c,l,a} - \sum_s \tau_{l,s}^t T_{m,a,l,s} \} - \sum_{k,l} \iota_{k,l} I_{k,l} - \\
 & \sum_{k,l} \varsigma_{k,l} J_{k,l} - \sum_{i,j} \varpi_{i,j} A_{i,j} - \vartheta \hat{E} \rightarrow \max \quad (5)
 \end{aligned}$$

Максимізація здійснюється за умови рівноваги на ринку електроенергії (1), яка зв'язує змінні величини разом; обмеження при виробництві електроенергії; обмеження щодо потужності при торгівлі; обмеження, пов'язане з викидами CO₂ та квотами, та формально навіть рівняння, що визначають ціни. Основними обмеженнями є різні технічні та економічні обмеження ринку, включаючи втрати при розподіленні та транспортуванні.

Максимізація рівняння (5) визначає всі кількісні змінні системи: споживання ($D_{m,l,e}$), виробництво ($X_{m,a,l,k}$), інвестиції ($I_{k,l}$), ремонт ($J_{k,l}$) та торгівля ($T_{m,a,l,s}$, $U_{m,c,l,a}$, $V_{m,c,l,a}$), викиди (E) та скорочення викидів (A_i) у різних секторах та навіть ціну виробника електроенергії ($p_{m,l}$) та ціну квоти.

У результаті цієї оптимізації модель знаходить одну рівноважну ціну квот для всього періоду торгівлі. Оскільки, на практиці, квоти можна позичити з наступного року протягом періоду, загальна кількість викидів та загальна кількість квот протягом всього періоду визначає ціну. Високі викиди в один рік призводить до використання багатьох квот у цьому році, залишаючи небагато доступних квот на наступний рік, таким чином неявно збільшуючи ціну квот в майбутньому. Цей механізм вирівнює ціну в усі роки. З досконалою інформацією та при відсутності невизначеності (як у моделі), не має коливання у ціні квоти.

Результати моделі вказують на те, що для прогнозування ціни на квоти, надзвичайно важливо зафіксувати короткотермінове та довгострокове заміщення палива при виробництві електроенергії та швидко реагувати на попит на електроенергію. Крім того,

значним є вплив інших політик та заходів, наприклад, підтримка використання відновлювальних джерел енергії.

У наведених вище моделях розглядається та моделюється європейський ринок електроенергії та СТВ ЄС, тому для умов України необхідно розробити нові або адаптувати існуючі моделі прогнозування розвитку електроенергетики з урахуванням впровадження національної СТВ.

ВИСНОВКИ

1. Досвід роботи впроваджених СТВ у світі доказує, що вони є найбільш економічно ефективним заходом зі скорочення викидів ПГ, але їх впровадження потребує значних фінансових, часових та людських ресурсів.

2. До впровадження СТВ необхідно впровадження системи МЗВ викидів ПГ, яка надасть можливість визначити достовірні, прозорі та перевірені викиди на рівні установок.

3. Одним з найбільш суттєвих недоліків національної СТВ буде її достатньо низька ліквідність у зв'язку зі значною монополізацією енергетичного сектору та обмеженої кількості промислових підприємств.

4. Необхідні обов'язкові наукові дослідження стосовно першочерговості запровадження заходів з енергоефективності, «зеленої» енергетики чи впровадження СТВ.

5. Моделі, наведені у статті, не враховують національні політики України та специфіку роботи електроенергетичної системи, тому в подальшому планується розробити нову або адаптувати існуючу модель прогнозування розвитку електроенергетики з урахуванням впровадження національної СТВ та умов нашої країни.

1. Національний кадастр антропогенних викидів із джерел та абсорбції поглиначами парникових газів 1990–2016 рр. URL: https://menr.gov.ua/files/docs/Zmina_klimaty/Ukraine_NIR_2018%20project.pdf.

2. Emissions Trading in Practice: a Handbook on Design and Implementation (Торгівля викидами на практиці: посібник з планування та впровадження). World Bank/PMR, ICAP. 2016 р.
3. Carbon Market Monitor (Моніторинг вуглецевого ринку). Січень 2017 р.
4. Ежеквартальный бюллетень ICAP - Новости об основных тенденциях торговли квотами на выбросы парниковых газов, номер 11. – 28.09.2016р. URL: <https://icapcarbonaction.com/ru/>
5. European Parliament (2003) Art. 1, Directive EC/87/2003.
6. Директива Європейського парламенту та ради 2009/29/ЄС, URL: old.minjust.gov.ua/file/33347.docx.
7. The EU Emissions Trading System (EU ETS), European Union, 2016 URL: https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/factsheet_ets_en.pdf.
8. European Commission (2014): Climate Action-Policies-Auctioning.
9. European Union Transaction Log (EUTL) URL: <http://ec.europa.eu/environment/ets/>.
10. Sandbag, the Brussels and London-based non-profit organisation, offers an in-depth discussion of recent developments in (UK) power-sector emissions. URL: <https://sandbag.org.uk/project/european-energy-transition-power-sector-2017/>.
11. ДОДАТОК XXX до Глави 6 «Навколишнє природне середовище» Розділу V «Економічне і галузеве співробітництво». URL: https://www.kmu.gov.ua/storage/app/media/ugoda-pro-asociaciyu/30_Annex.pdf.
12. Система торгівлі квотами на выбросы парниковых газов: почему это выгодно для бизнеса? URL: <https://ckp.in.ua/ru/events/12975>.
13. F. Hedenus, D. Johansson, K. Lindgren. A critical assessment of energy-economy-climate models, 2012.
14. Orvika Rosnes, Anne-Franziska Sinner, Berit Tennbakk. Handbook of CO₂ in Power Systems, 2012.

Надійшла до редколегії 14.03.2018