

А.М.Онищенко, к.е.н.,

Київський національний університет ім. Т.Шевченка,
м. Київ

**АНАЛІЗ ЕКОНОМІЧНОЇ ДИНАМІКИ КРАЇНИ
В УМОВАХ ТОРГІВЛІ КВОТАМИ ЕМІСІЙ ПАРНИКОВИХ ГАЗІВ
НА ОСНОВІ ЕКОЛОГО-ЕКОНОМІЧНОЇ МОДЕЛІ**

На основі запропонованої в [1] еколого-економічної моделі, що поєднує баланси матеріального виробництва та емісій парникових газів, автор запропонував модифіковану модель, яка включає механізм торгівлі квотами, введений в рамках Кіотського протоколу. Проведено її дослідження та отримано траєкторії динаміки валового випуску продукції залежно від встановлених обмежень на емісії.

In the article are discussed the realization of Kyoto Protocol on the economic-mathematic level. In particular author obtained dynamic of gross domestic product under conditions of ecological limits. Even so is modeled use of flexibility mechanisms of Kyoto Protocol.

У своєму еволюційному розвитку людство постійно змушене ліквідувати ту чи іншу загрозу як штучного, так і природного походження. В переліку останніх вже не одне десятиліття все більш вагоме місце посідає проблема зміни клімату. Наслідком такої зміни може стати підвищення середньої температури, рівня світового океану, частоти ураганів тощо. Наукові дослідження, розпочаті 1957 року в так званий Міжнародний геофізичний рік, коли було розгорнуто мережу наукових спостережень, заклали основи концепції глобального потепління. Одним з фундаментальних положень концепції став висновок щодо планетарного характеру даної проблеми та неможливості її розв'язання в рамках окремої країни чи регіону. Перша аналітична доповідь Міжурядової групи експертів по зміні клімату (1990 року) засвідчила, що вчені досягли принципової згоди з даного питання. Наслідком цього стало підписання в Ріо-де-Жанейро в 1992 році Рамкової конвенції зі зміни клімату ООН [2], яка заклала правову та політичну основу для подальших дій щодо визначальної ролі антропогенного впливу на зміну клімату. Обґрунтування того, що вплив людини на клімат досяг значної міри, допомогло розпочати новий тур переговорів, під час яких країни-учасниці зобов'язалися скоротити емісії парникових газів в атмосферу. Зрештою, розуміння необхідності розв'язання екологічних проблем з застосуванням економічних важелів впливу привело до розробки низки механізмів, які дозволяють гнучко виконувати зобов'язання зі скорочення емісій. Ці положення

заклали основу Кіотського протоколу [3] до Рамкової конвенції ООН про зміну клімату, який став підсумком різноманітних тенденцій, спрямованих на глобалізацію в розв'язанні проблем економіки та екології. Він визначає ті принципові структурні елементи, на яких в XXI столітті повинні ґрунтуватися глобальні зусилля з розв'язання проблеми кліматичних змін. У певному відношенні Кіотський протокол може виявитися найважливішою та принциповою міжнародною угодою кінця XX ст.

Запропонована в [1] балансова модель поєднує баланси валового випуску матеріального виробництва та обсягу емісій вуглекислого газу:

$$\begin{cases} X(t) = aX(t) + \eta \frac{dX(t)}{dt} + \gamma bX(t), \\ Q \leq R(t) - T(t), \end{cases} \quad (1)$$

де $X(t)$ – поточний обсяг валового випуску;

$\eta(t)$ – коефіцієнт приростної фондоемності;

a – коефіцієнт прямих матеріальних витрат;

$\gamma(t)$ – норма споживання;

$b(t)$ – норма працеемності;

Q – встановлена для країни квота викидів парникових газів;

$R(t)$ – загальний обсяг емісій вуглекислого газу внаслідок дії матеріального виробництва;

$T(t)$ – обсяг утилізованих викидів парникових газів внаслідок дії екологічного виробництва.

В основі першого рівняння моделі (1) знаходиться припущення про взаємозв'язок між накопиченням та приростом валової продукції, який реалізується за допомогою коефіцієнта капіталоемності приростів виробництва. Окрім того, припускається миттєве перетворення капіталовкладень у приріст основних виробничих фондів та миттєву віддачу фондів в обсяги виробництва. Рівняння моделює виробництво та розподіл валового продукту на виробниче споживання, приріст та заміщення основних виробничих фондів, кінцеве споживання.

Нерівність системи (1) відображає поведінку країни в умовах встановленої для неї квоти, яка є не більшою різниці між існуючим обсягами здійснених та утилізованих емісій. Даний сценарій є характерним для більшості країн Додатку I Кіотського протоколу – індустріально розвинених країн, які мають досить жорсткі

зобов'язання зі скорочення викидів парникових газів.

Проведений аналіз моделі (1) за різних залежностей зміни у часі обсягу встановленої квоти дозволив отримати траєкторії залежності обсягу валового випуску від екологічних параметрів. Зокрема доведено, що значне збільшення видатків на заходи зі скорочення емісій призводить до спадних траєкторій динаміки валового випуску продукції. Такий сценарій є характерним для більшості розвинутих країн, які зазначають, що їм досить складно вийти на затверджений в Кіото рівень емісій. Пояснюється це низкою причин: високим рівнем вже існуючої протягом останніх десятиліть енергоефективності, оптимальною структурою енергоспоживання, переходом до застосування інших видів палива і т.і. Як наслідок – такі країни не мають можливостей недорогого скорочення емісій і їм доведеться витратити значно більше ресурсів, ніж іншим країнам для того, щоб виконати свої зобов'язання по Кіотському протоколу. У зв'язку з цим у рамках діючої угоди було закладено поняття торгівлі квотами на викиди парникових газів [4]. Її суть полягає в тому, що якщо країна не використовує повністю надану їй квоту, то вона має право продати невикористану її частину іншій. Таким чином, з'являється альтернативний варіант виконання встановлених зобов'язань, який може бути економічно більш вигідним порівняно з вищенаведеним. Останнє вимагає розширення припущень базової моделі та відповідної її модифікації.

Участь країни в торгівлі квотами на викиди парникових газів дозволяє їй виконати встановлені нормативи, а з точки зору математичного запису відповідно звести нерівність моделі (1) до рівності. Позначимо обсяг необхідних додаткових емісій $Z(t)$. Тоді нерівність набуде вигляду:

$$Q = R(t) - T(t) - Z(t).$$

При цьому, купуючи додаткову квоту в іншій країні, економічний агент витрачає частину свого валового випуску. Відповідно зазнає зміни матеріальний баланс: необхідно передбачити частину валового випуску в структурі балансу матеріального виробництва, яку вилучають на придбання додаткової квоти: $\beta \cdot X(t)$, т.т. загальний обсяг валового випуску продукції розподіляється на виробниче споживання, приріст та відновлення вибуття основних виробничих фондів, кінцеве

споживання, залучення додаткової квоти емісій парникових газів. Отже, модель (1) набуде вигляду:

$$\begin{cases} X(t) = aX(t) + \eta \frac{dX(t)}{dt} + \gamma bX(t) + \beta X(t), \\ Q = R(t) - T(t) - Z(t). \end{cases}$$

Враховуючи особливе значення заходів по реалізації дій зі скорочення викидів вуглекислого газу в рамках національної економіки, загальний обсяг інвестицій будемо поділяти на дві категорії: заходи, спрямовані в матеріальне виробництво, та заходи, спрямовані на виконання положень Кіотського протоколу:

$$\eta \frac{dX(t)}{dt} = \eta_1 \frac{dX(t)}{dt} + \eta_2 \frac{dT(t)}{dt}.$$

Як зазначено вище, одним з центральних положень Кіотського протоколу є визнання глобальної зміни клімату як наслідку антропогенного впливу, основна частка якого припадає на матеріальне виробництво. Перед розвиненими країнами з жорсткими зобов'язаннями щодо скорочення емісій постала проблема скорочення обсягів валового випуску продукції з метою виконання екологічних нормативів. З метою запобігання такому шляху розвитку Рамковою конвенцією ООН про зміну клімату зрештою було введено процедуру торгівлі квотами та механізмів гнучкості. Очевидно, існує пряма залежність між загальним обсягом емісій та обсягом валового випуску. Будемо розглядати лінійну залежність:

$$R(t) = k_1 X(t).$$

Виходячи з тих же міркувань, можна розглядати лінійну залежність між необхідною додатковою квотою та обсягом валового випуску на дану квоту:

$$Z(t) = k_2 \beta X(t).$$

В рамках зроблених припущень система (1) набуде вигляду:

$$\begin{cases} X(t) = aX(t) + \eta_1 \frac{dX(t)}{dt} + \eta_2 \frac{dT(t)}{dt} + \gamma bX(t) + \beta X(t), \\ Q = k_1 X(t) - T(t) - k_2 \beta X(t). \end{cases}$$

В умовах участі у процедурі торгівлі квотами, очевидним є факт того, що відповідних змін будуть зазнавати економічна та екологічна складові країни-донора. В баланс матеріального виробництва необхідно включити вартість, сплачену країною I за

придбану квоту емісій $\beta X(t)$. В рамках попередніх припущень матеріальний баланс формалізується у вигляді:

$$X^2(t) = a^2 X^2(t) + \eta_1^2 \frac{dX^2(t)}{dt} + \eta_2^2 \frac{dT^2(t)}{dt} + \gamma^2 b^2 X^2(t) + \beta X^1(t).$$

При цьому будемо вважати, що країна, яка має надлишок дозволів на викиди в умовах торгівлі з метою залучення максимального обсягу коштів повністю продає вільну квоту і тим самим обсяг встановленої для неї квоти дорівнює різниці між величиною спричинених матеріальним виробництвом викидів парникових газів об'ємом їх утилізації внаслідок дії природоохоронного виробництва та квотою продажу:

$$Q^2 = k_1^2 X^2(t) - T^2(t) - k_2^1 \beta X^1(t).$$

Остаточно еколого-економічна модель динаміки валового випуску продукції залежно від встановлених квот двох країн в умовах торгівлі квотами набуде вигляду:

$$\begin{cases} X^1(t) = a^1 X^1(t) + \eta_1^1 \frac{dX^1(t)}{dt} + \eta_2^1 \frac{dT^1(t)}{dt} + \gamma^1 b^1 X^1(t) + \beta X^1(t) \\ Q^1 = k_1^1 X^1(t) - T^1(t) - k_2^1 \beta X^1(t) \\ X^2(t) = a^2 X^2(t) + \eta_1^2 \frac{dX^2(t)}{dt} + \eta_2^2 \frac{dT^2(t)}{dt} + \gamma^2 b^2 X^2(t) - \beta X^1(t) \\ Q^2 = k_1^2 X^2(t) - T^2(t) + k_2^1 \beta X^1(t). \end{cases}$$

З метою спрощення отриманої системи виразимо з другого та четвертого рівнянь змінні $T^1(t)$, $T^2(t)$ та підставимо отримані залежності в перше та третє рівняння попередньої системи відповідно:

$$\begin{cases} X^1(t) = a^1 X^1(t) + \eta_1^1 \frac{dX^1(t)}{dt} + \eta_2^1 \frac{(k_1^1 - k_2^1 \beta) X^1(t) - Q^1}{dt} + \gamma^1 b^1 X^1(t) + \beta X^1(t) \\ X^2(t) = a^2 X^2(t) + \eta_1^2 \frac{dX^2(t)}{dt} + \eta_2^2 \frac{k_1^2 X^2(t) + k_2^1 \beta X^1(t) - Q^2}{dt} + \gamma^2 b^2 X^2(t) - \beta X^1(t). \end{cases} \quad (2)$$

Для визначення траєкторій зміни валового випуску продукції двох країн у часі $X^1(t)$, $X^2(t)$ необхідно розглянути припущення відносно зміни обсягів встановленої квоти Q . Кожне з цих припущень характеризує зміну обсягів валового випуску продукції залежно від величини встановленої квоти для коротко-, середньо- та довгострокового горизонту планування.

1. $Q = const = Q_0$. Подібний сценарій може бути характерним, наприклад, для одного звітного періоду Кіотського протоколу, який встановлюється на п'ять років. Його також можна розглядати як один з варіантів у рамках перших пілотних проектів з метою відпрацювання механізмів протоколу на ранніх стадіях реалізації. Дана умова зводить систему (2) до вигляду:

$$\begin{cases} X^1(t) = a^1 X^1(t) + \eta_1^1 \frac{dX^1(t)}{dt} + \eta_2^1 \frac{(k_1^1 - k_2^1 \cdot \beta) X^1(t)}{dt} + \gamma^1 b^1 X^1(t) + \beta X^1(t) \\ X^2(t) = a^2 X^2(t) + \eta_1^2 \frac{dX^2(t)}{dt} + \eta_2^2 \frac{k_1^2 X^2(t) + k_2^1 \beta X^1(t)}{dt} + \gamma^2 b^2 X^2(t) - \beta X^1(t). \end{cases}$$

Досліджуючи отриману економіко-математичну модель, згідно з загальною методологією моделювання, на даному етапі абстрагуємося від змістовної концепції та розглядаємо її як суто математичний об'єкт. Наведена задача є системою диференціальних рівнянь, а враховуючи початкові умови $X^1(0) = X_0^1$, $X^2(0) = X_0^2$, задачею Коші, яка має розв'язки:

$$\begin{cases} X^1(t) = X_0^1 e^{\frac{C}{A}t}, \\ X^2(t) = X_0^2(t) e^{\frac{D}{B}t} + \frac{\beta(A - Ck_2^1 \eta_2^2)}{BC - AD} \left(X_0^1 e^{\frac{C}{A}t} - e^{\frac{D}{B}t} \right). \end{cases}$$

де $A = \eta_1^1 + \eta_2^1 k_1^1 - \eta_2^1 k_2^1 \beta$

$$B = \eta_1^2 + \eta_2^2 k_1^2$$

$$C = 1 - a^1 - \gamma^1 b^1 - \beta$$

$$D = 1 - a^2 - \gamma^2 b^2.$$

Аналізуючи отримані розв'язки зміни обсягів валового випуску продукції у часі, очевидно, можна спостерігати як зростаючі, так і спадні траєкторії. Порівнюючи динаміку валового випуску продукції країни І за умови сталої квоти без застосування механізму торгівлі квотами, де було отримано розв'язок

$X(t) = X(0) * e^{\frac{1-a-\gamma*b}{\eta_1+k\eta_2} * t}$, слід зазначити вплив коефіцієнта β , який визначає частку валового випуску, спрямовану на придбання додаткової квоти. Як слідує з введених змінних C та A значне його збільшення призводить до стагнації матеріального виробництва.

Будемо вважати, що початкова однопродуктова динамічна балансова модель є продуктивною, що забезпечує невід'ємні значення її змінних, відповідно змінних C та A . Тоді зростаючу траєкторію валового випуску країни Π забезпечить невід'ємність чисельника $A - \eta_2^2 k_2^1 C$. Аналіз його структури вказує на те, що значне збільшення частки витрат на придбання додаткової квоти β або введення додаткових потужностей з утилізації емісій парникових газів η_2^2 уповільнюють динаміку зростання обсягів валового випуску продукції, а перевищуючи критичне значення взагалі призводять до спадної траєкторії.

2. Відповідно до основної ідеї Кіотського протоколу загальна світова тенденція дозволених викидів парникових газів повинна поступово зменшуватись. Постає необхідність розгляду відповідних функціональних залежностей. В випадку середньострокового горизонту моделювання, як один з можливих варіантів, можна запропонувати наступну спадну залежність

дозволених емісій від часу: $Q(t) = \frac{Q_0}{1 + \lambda t}$. Варто зазначити, що дана залежність є частинним випадком попередньої за умови $\lambda \rightarrow 0$:

$$\lim_{\lambda \rightarrow 0} Q(t) = \lim_{\lambda \rightarrow 0} \frac{Q_0}{1 + \lambda t} = Q_0 = const.$$

Модель (2) в зроблених припущеннях набуває вигляду:

$$\begin{cases} X^1(t) = a^1 X^1(t) + \eta_1^1 \frac{dX^1(t)}{dt} + \eta_2^1 \left[\frac{(k_1^1 - k_2^1 \beta) X^1(t)}{dt} + \lambda \frac{Q_0}{(1 + \lambda t)^2} \right] + \gamma^1 b^1 X^1(t) + \beta X^1(t) \\ X^2(t) = a^2 X^2(t) + \eta_1^2 \frac{dX^2(t)}{dt} + \eta_2^2 \left[\frac{k_1^2 X^2(t) + k_2^1 \beta X^1(t)}{dt} + \lambda \frac{Q_0}{(1 + \lambda t)^2} \right] + \gamma^2 b^2 X^2(t) - \beta X^1(t). \end{cases}$$

Порівняно з попередньо отриманим розв'язком на уповільнення динаміки даних траєкторій, окрім виділених вище факторів, справляє вплив темп зміни встановленої для країн квоти на емісії парникових газів λ^1 та λ^2 . Останнє особливо важливо враховувати при плануванні подальших нормативів зі скорочення викидів CO₂ та затвердженні правових положень Кіотського протоколу. Окрім того, дослідження отриманих розв'язків за умови $\lambda \rightarrow 0$ приводить до траєкторій динаміки валового випуску продукції, що відповідають попередньо розглянутому випадку.

3. Досліджуючи довгостроковий період моделювання, введемо

експоненціальну залежність встановленої квоти від часу:

$$Q(t) = Q_0 e^{-\lambda t}, \quad \lambda > 0.$$

Рівняння (2) набуде вигляду:

$$\begin{cases} X^1(t) = a^1 X^1(t) + \eta_1^1 \frac{dX^1(t)}{dt} + \eta_2^1 \left[\frac{(k_1^1 - k_2^1 \beta) X^1(t)}{dt} + Q_0 e^{-\lambda t} \lambda^1 \right] + \gamma^1 b^1 X^1(t) + \beta X^1(t) \\ X^2(t) = a^2 X^2(t) + \eta_1^2 \frac{dX^2(t)}{dt} + \eta_2^2 \left[\frac{k_1^2 X^2(t) + k_2^2 \beta X^1(t)}{dt} + Q_0 e^{-\lambda t} \lambda^2 \right] + \gamma^2 b^2 X^2(t) - \beta X^1(t) \end{cases}$$

Відповідний розв'язок:

$$\begin{aligned} X^1(t) &= X_0^1 e^{\frac{C}{A}t} + \frac{Q_0^1 \eta_2^1 \lambda^1}{C + A\lambda^1} \left(e^{-\lambda^1 t} - e^{\frac{C}{A}t} \right), \\ X^2(t) &= X_0^2 e^{\frac{D}{B}t} + \frac{Q_0^1 \beta \eta_2^1 \lambda^1 (1 + k_2^1 \eta_2^2 \lambda^1)}{(D + B\lambda^1)(C + A\lambda^1)} \left(e^{\frac{D}{B}t} - e^{-\lambda^1 t} \right) - \\ &- \frac{Q_0^2 \eta_2^2 (C + A\lambda^1) \lambda^2}{(D + B\lambda^1)(C + A\lambda^1)} \left(e^{\frac{D}{B}t} - e^{-\lambda^2 t} \right) + \frac{(C + AB)(C + A\lambda^1)}{(BC - AD)(C + A\lambda^1)} \left(\left(X_0^1 - \frac{Q_0^1 \eta_2^1 \lambda^1}{C + A\lambda^1} \right) e^{\frac{D}{B}t} + e^{\frac{C}{A}t} \right). \end{aligned}$$

Аналогічно до випадку, розглянутому в пункті 1, збільшення видатків на придбання додаткової квоти емісій, т.т. коефіцієнта β , уповільнює темп зростання обсягів валового випуску продукції, а в випадку значного збільшення, коли починає домінувати другий доданок, взагалі призводить до спадних траєкторій. Водночас певне його збільшення дозволяє зменшити матеріальні витрати на проведення заходів зі зменшення викидів у рамках національної економіки, т.т. до зменшення коефіцієнта приростної фондоємності η_2 . Останнє є особливо актуальним для більшості промислово розвинутих країн з незначним потенціалом подальшого покращення енергоефективності. Обґрунтоване поєднання зазначених двох чинників дозволяє визначити оптимальні заходи виконання зобов'язань у рамках обмежень з викидів парникових газів.

Для низки країн додатку I Кіотського протоколу, які майже вичерпали подальші можливості скорочення обсягу емісій за рахунок проведення внутрішніх екологічних заходів, з'являється альтернативна можливість виконання своїх зобов'язань – торгівля квотами. Участь у торгівлі, як і самостійні заходи зі скорочення викидів вуглекислого газу, вимагає певної частки матеріального ресурсу. Однак може виявитись більш дешевою порівняно зі

збільшенням національної екологічної складової. Найбільш економічно ефективним буде оптимальне поєднання названих альтернативних підходів. При цьому, як показує модельний аналіз, значне збільшення відповідних коефіцієнтів може привести до стагнації матеріального виробництва. Зважаючи на цей факт, в Кіотському протоколі було закладено механізми гнучкості виконання взятих зобов'язань, що дозволяє їх здешевити. Дослідження їх впливу на національну економіку вимагає розгляду відповідної концептуальної моделі, переходу до рівня еколого-економічного моделювання.

Список використаних джерел:

1. Онищенко А.М. Аналіз динаміки обсягів валового випуску продукції країни у випадку встановлених квот емісій парникових газів // Економіка: проблеми теорії та практики: Збірник наукових праць. – Випуск 247: В 6 т. – Т.ІІ. – Дніпропетровськ: ДНУ, 2009. – С. 312-318.
2. [Електронний ресурс]. – Доступ. – <http://www.unfccc.int>.
3. [Електронний ресурс]. – Доступ. – http://www.climate.org.ua/int_agr/kyoto.
4. Использование механизмов Киотского протокола [Електронний ресурс]. – Доступ. – <http://www.sustainable-cities-net.org.ua/publicationshow.php?id=504>.