

А. М. Онищенко,

к. е. н., докторант, Київський національний університет імені Тараса Шевченка

ДВОСЕКТОРНА ЕКОЛОГО-ЕКОНОМІЧНА МОДЕЛЬ ОПТИМАЛЬНОГО РОЗВИТКУ

На основі теорії оптимального керування в статті запропоновано двосекторну еколого-економічну модель поведінки виробника в умовах встановлених обмежень на емісії парникових газів. При цьому розглядається випадок необхідності залучення додаткової емісійної квоти з метою виконання положень Кіотського протоколу. На основі достатніх умов оптимальності розглянуто існування оптимальних траєкторій моделі, зокрема серед них виділено магістральні.

On the ground of the optimizing control theory is suggested a two-sector ecology-economy model of the producer by emission of hotair gases limit. The authors discuss the necessity of the additional quota according to Kyoto Protocol. Economy-mathematical analyses allowed to construct the optimal trajectories and specifically turnpike trajectory.

Ключові слова: еколого-економічне моделювання, Кіотський протокол, теорія оптимального керування, магістральні траєкторії.

ВСТУП

Аналіз кліматичних змін переважно був зосереджений на вивченні зміни температури повітря, атмосферних опадів, снігового покриву та стихійних гідрометеорологічних явищ за всю історію інструментальних спостережень. Отримані дані дають загальну картину потепління на планеті в цілому, перерозподілу випадіння опадів. Пов'язані з погодою та кліматом стихійні катаклізми стають причиною скорочення виробництва продукції, забруднення вод, поверхні землі, руйнування об'єктів економіки, інфраструктури. Розробка сценаріїв зміни клімату проводилась на основі найрізноманітніших підходів. З метою повного врахування всіх факторів, що суттєво впливають на клімат, до розгляду було включено фізичні процеси, пов'язані з рівнем радіації, фотохімією, термодинамікою, випаровуванням, конденсацією і т.п. Більшість проведених досліджень зводяться до того, що основною причиною кліматичних змін є надмірна концентрація парникових газів в атмосфері Землі. Наявні дані низки спостережень [1] засвідчують той факт, що регіональні зміни клімату вже суттєво вплинули на ряд фізичних та біологічних процесів та систем. Приклади таких змін включають скорочення льодового покриття, танення вічної мерзлоти, зміну висоти розповсюдження рослинності, скорочення популяції певних видів рослин та тварин, посилення процесів спустинення. Антропогенні зміни фізичних та хімічних властивостей атмосфери можуть потенційно впливати на якість життя і навіть на саме існування деяких її форм.

Разом з тим, визнаним є факт, що економічні вжиті впливи є найефективнішими в питанні боротьби з екологічними негараздами. Виходячи з даної тези, світова спільнота прийшла до створення першої міжнародної екологічної угоди — Кіотського протоколу [2], метою якого є поступове скорочення викидів парникових газів. Особливістю протоколу є застосування так званих механізмів гнучкості [3], що дозволяють обрати найбільш економічно ефективний варіант такого скорочення. Можливі варіанти переходу до екологічної економіки розглянуті ще в перших доповідях Римського Клубу. Побудова економічно ефективного та екологічно безпечного розвитку повинна сприяти покращенню соціального рівня як одного з цільових орієнтирів економічної системи. Однак його реалізація пов'язана з низкою проблем фінансового, організаційного, інформаційного та іншого характеру, механізм якого необхідно ще розробити. Однією з таких спроб повинен стати перехід в наукових дослідженнях від концептуальної теорії до рівня еколого-економічного моделювання.

ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

Проблема математичного моделювання взаємодії економіки та екології в рамках виконання положень Кіотського протоколу не є новою.

Першим класом таких моделей можна назвати моделі міжгалузевого балансу, які досліджують вплив структури економіки на навколишнє природне середовище. До даного класу моделей належать

міжгалузєва модель Леонтьєва-Форда та її узагальнення [4]. Еколого-економічне моделювання за схемою міжгалузєвого балансу дозволяє визначити ціни, балансові фінанси галузей та економічні витрати на регулювання забруднення, прогнозувати вплив зміни доданої вартості на ціни і відповідно на обсяги виробництва за умови виконання тієї чи іншої природоохоронної стратегії. Основним недоліком даного класу моделей є їх неспроможність представити вплив економічних інструментів скорочення викидів парникових газів на поведінку суб'єктів ринку.

Іншим класом моделей, які можна застосувати для оцінки економічних наслідків від запровадження обмежень на викиди вуглекислого газу, є енергетичні моделі. Вони широко застосовуються для аналізу енергетичних ринків, оцінки прямих витрат на скорочення енергоспоживання та емісій парникових газів, можливостей субституції між енергоресурсами, зміни цін на енергетичні ресурси, прогнозування ціни дозволів на вуглецевих ринках тощо. Зокрема, можна вказати на моделі Primes, Poles, Markal та їх численні модифікації [5]. Слід зазначити, що енергетичні моделі не можна застосовувати для оцінки загальноекономічних наслідків від запровадження обмежень на викиди парникових газів. Істотним недоліком моделей даного класу є обмеженість їх застосування для задач, які вимагають детального урахування міжгалузєвих зв'язків.

Для розв'язання задачі дослідження можуть застосовуватися макроекономічні моделі, основані на теорії Кейнса. Найчастіше такі моделі використовують для дослідження рівноваги на окремих ринках, циклічних перетворень, конвергенції та стабільності, довгострокового зростання та прогнозування. В таких моделях не використовуються припущення щодо повної зайнятості первинних факторів виробництва та досконалої конкуренції на всіх ринках. Параметри макроекономічних моделей, як правило, оцінюються на базі часових рядів. Як приклад їх застосування для аналізу різних аспектів скорочення емісій парникових газів можна вказати моделі Oxford та Dri-Wefa [6].

В якості ще одного класу моделей можна вказати прикладні моделі загальної рівноваги. Їх істотною перевагою є те, що вони оперують значними масивами статистичних даних міжгалузєвого балансу або системи національних рахунків і, таким чином, дозволяють максимально повно врахувати структур міжгалузєвих зв'язків, а також досліджувати галузеві та макроекономічні ефекти економіки. На початку 90-х років ХХ ст. прикладні моделі загальної рівноваги стали стандартним інструментом аналізу наслідків від запровадження різноманітних механізмів економічної, соціальної енергетичної або природоохоронної політики. Вони є найбільш застосованими абстракціями, які дозволяють розглянути економічні взаємозв'язки в економічній системі з максимальною повнотою, на підставі об'ємного масиву статистичних даних. В якості застосування вказаного класу моделей можна вказати багаторівневу динамічну модель GEM-E3 [7], створену на замовлення Європейської комісії. Модель обчислює економічні наслідки кіотських обмежень за допомогою торгівлі дозволами на емісії парникових газів між країнами Європейського союзу та порівнює дані результати зі сценаріями скорочення викидів в умовах відсутності торгівлі квотами. К. Борінгер та Т. Разерфорд застосували прикладні моделі загальної рівноваги для оцінки економічного впливу від виконання Кіотських зобов'язань Канадою [8]. Експерти Масачусетського інституту застосували даний вид моделей для оцінки економічних наслідків запровадження альтернативних обмежень на викиди у США на період 2008—2050 років.

Слід відзначити публікації вчених Київського національного університету імені Тараса Шевченка — професора Волошина О.Ф. та старшого наукового співробітника Горіціної І.А. [9], які досліджують питання оптимальності розподілу відповідальності в рамках Кіотського протоколу на основі апарату нечітких множин та теорії прийняття рішень. Одним з основних недоліків більшості міжнародних угод про охорону навколишнього природного середовища є відсутність конкретних механізмів їх реалізації, в першу чергу, формалізованих правил розподілу відповідальності, зокрема фінансової, яку можна з певною долею точності визначити. На основі даного прогнозу агенти угоди можуть приймати відповідне рішення про кооперацію. В розвиток запропонованих механізмів розподілу квот, на думку авторів, доцільно розглянути нечіткі постановки моделей розподілу колективних витрат, оскільки параметри, введені при формуванні індивідуальних потенційних доходів агентів, є емпіричними, а отже, неточними.

Окрему сходинку еколого-економічних моделей Кіотського протоколу посідають оптимізаційні моделі, що пов'язано з розробленістю їх математичного апарату. Серед них можна відзначити запропоновані математичні моделі, багатомірної, нелінійної і багатоекстремальної задачі оптимізації викидів промислових підприємств, з урахуванням обмежень на результуюче поле забруднення, розв'язання яких дозволяє визначити величини додаткових викидів без порушення екологічних вимог на рівень забруднення екологічно важливого регіону і тим самим збільшити кількість виробленої продукції або послуг.

В контексті даного підходу в [10] запропоновано еколого-економічну модель, що відображає сценарій оптимального розвитку з умовах обмежень на емісії парникових газів. Ця модель відображає задачу визначення такого варіанта валового випуску продукції, а також кінцевого споживання та витрат на екологічну складову, які забезпечать найбільше інтегральне споживання.

При цьому кожен виробник ідентифікується рівнянням відтворення основних виробничих потужностей в припущенні, що інвестиції повністю витрачаються без врахування запізнення на приріст основних виробничих потужностей та на амортизаційні відрахування при відомому рівні виробничих потужностей в базовому році.

Виробничі можливості задаються виробничою функцією, а весь валовий випуск продукції розподіляється на проміжне та кінцеве споживання (економічне та екологічне).

Екологічне обмеження на емісії парникових газів розглядається як різниця двох складових: обсягу викидів, який вважається пропорційним обсягу випущеного продукту з коефіцієнтом та обсягу знищених забруднень, пропорційного величині екологічних витрат з коефіцієнтом.

Нерівність є умовою екологічно ефективною економічної системи. Зокрема, означає такий рівень засвоєння екологічного споживання в частці валового випуску, який дозволив би виконувати емісійне обмеження за умов зростання обсягів валового випуску продукції.

В умовах посилення екологічних нормативів поставимо задачу дослідження такої еколого-економічної системи, в якій поряд з основним виробництвом діє допоміжне — зі знищення частини емісії парникових газів. Окрім того, в контексті необхідності подальшого скорочення емісій парникових газів, коли вичерпано власні ресурси (характерно, наприклад, для розвинутих економік) з огляду технологічних можливостей, фінансової доцільності тощо, залишається можливість такого скорочення за рахунок участі в механізмах гнучкості Кіотського протоколу. При цьому для кожної окремої

країни розробляється власна національна стратегія їх реалізації. Об'єднувальним фактором є необхідність виділення частини прибутку та інвестування його в екологічні проекти агента-партнера. Змодельовано динаміку розвитку економічного агента в даних умовах.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Як і в попередньому випадку, припускаємо, що розглядається ринок однорідного товару, на якому деяка сукупність незалежних виробників пропонує товар. Виробники діють в умовах досконалої конкуренції. Виробничі можливості сукупності виробників задаються величиною їх сумарної виробничої потужності M_1 — максимально можливим випуском продукту за одиницю часу. Аналогічним чином допоміжне виробництво характеризує показник потужності M_2 . Єдиним виробничим фактором є однорідна робоча сила R . Згідно неокласичній теорії виробництва будемо описувати технології і виробничі можливості економічної та екологічної складової виробничими функціями [11], які представляють залежність максимального рівня випуску від обсягів залучених факторів. При цьому матеріальне виробництво використовує наявні потужності M_1 та однорідну робочу силу R :

$$Y_1 = F_1(M_1, R),$$

а допоміжне — лише виробничі потужності:

$$Y_2 = F_2(M_2).$$

Враховуючи властивість лінійної однорідності, виробничі функції представимо у вигляді:

$$Y_1 = M_1 f_1(x_1), \quad x_1 = \frac{R}{M_1}, \quad f_1(x_1) = F_1(1, x_1);$$

$$Y_2 = M_2 f_2(1), \quad f_2(1) = F_2(1).$$

При цьому виконуються умови:

$$f(0) = 0, \quad f'(x) > 0, \quad f''(x) < 0,$$

$$f_1(x_1^*) = 1, \quad x_1^* = \frac{R^*}{M_1},$$

де R^* — повна зайнятість робочих місць на виробництві.

Виробники наймають робочу силу на ринку. Пропонує робочу силу населення, яке в той же час є основним споживачем продукту. Населення є однорідною групою споживачів та робітників. Споживчу поведінку населення описують монотонно зростаючою функцією користності і C — попит на споживчий продукт. Будемо вважати, що й виробники для своїх виробничих потреб проявляють попит на продукт величини J . Окрім введеного, будемо розглядати екологічне обмеження, яке виражається в тому, що виробники не повинні перевищувати встановленої для них квоти емісій парникових газів: $Q \leq Q^s$.

У подальшому дослідженні враховується важлива властивість конкурентної ринкової рівноваги. Вона, парето-оптимальною або економічно ефективною, тобто в рівновазі повністю використовується робоча сила R , встановлена квота емісій Q^s та випущений валовий продукт Y . Звідси випливає, що рівновагу потрібно шукати серед парето-оптимальних розподілів ресурсів і продукту, а самій задачі про рівновагу можна поставити у відповідність задачу про оптимальний розподіл ресурсів. Для цього проведемо певні уточнення.

Пропозиція робочої сили змінюється у часі за експоненціальним законом:

$$R^s = R_0 e^{\lambda t}.$$

Випущений продукт може використовуватися як споживчий, так і фондоутворювальний для створення нових виробничих потужностей. Рівняння балансу ви-

робництва та розподілу продукту запишемо у вигляді:

$$M_1 f_1(x_1) = J + S, \quad x_1 = \frac{R}{M_1},$$

де J — обсяг фондоутворюючого продукту; R — обсяг кінцевого продукту (соціальна складова); S — обсяг використаної робочої сили.

При цьому загальний обсяг фондоутворювального продукту спрямовується в економічний та екологічний сектори. Для кожного з них процес створення нової потужності описуємо сталими b_1, b_2 — коефіцієнтами приросту фондоємності. Якщо за одиницю часу створюється I_1, I_2 одиниць нової потужності, то необхідно використовувати $J = b_1 I_1 + b_2 I_2$ одиниць фондоутворювального продукту.

Динаміка зміни потужностей основного та допоміжного виробництв у часі задається відповідними рівняннями:

$$\frac{dM_1}{dt} = I_1 - \mu_1 M_1,$$

$$\frac{dM_2}{dt} = I_2 - \mu_2 M_2$$

де μ_1, μ_2 — коефіцієнти амортизації відповідних виробничих потужностей.

Соціальний продукт складається з кінцевого споживання C та екологічних витрат U , спрямованих на участь в механізмах гнучкості Кіотського протоколу (в іншій інтерпретації можна розглядати як екологічний штраф або еквівалент продукції, що витрачається на штраф):

$$S = C + U.$$

Об'єднуючи вищевведені співвідношення, отримуємо матеріальний баланс виробництва:

$$Y = b_1 I_1 + b_2 I_2 + C + U \quad (1).$$

Введемо в розгляд норму інвестування $0 \leq u \leq 1$. Відповідно виконуються співвідношення: $J = uY$, $C = (1-u)Y$. Аналогічним чином розглядається норма інвестування в основні виробничі фонди матеріального виробництва $0 \leq u_1 \leq 1$: $b_1 I_1 = u_1 J$, $b_2 I_2 = (1-u_1) J$.

З огляду існування емісійного обмеження $Q^s = const$ (встановлена для виробника квота) необхідно ввести в розгляд екологічний баланс. Приріст обсягів викидів парникових газів відбувається внаслідок діяльності основного виробництва, а зменшення — за рахунок утилізації допоміжним виробництвом та реалізації проектів в рамках механізмів гнучкості Кіотського протоколу. Будемо вважати, що обсяг емісій вуглекислого газу пропорційний валовому випуску продукції матеріального виробництва kY , а обсяг скорочених викидів за рахунок участі в проектах Кіотського протоколу пропорційний інвестованому в них частини валового випуску nU . При цьому виконується нерівність $k < n$, що є умовою екологічно ефективною економічної системи, а саме: означає такий рівень засвоєння екологічного споживання в частці валового випуску, який дозволив би виконувати емісійне обмеження за умов зростання обсягів валового випуску продукції. Таким чином, баланс емісій парникових газів запишемо у вигляді:

$$Q = k M_1 f_1\left(\frac{R}{M_1}\right) - M_2 - nU \leq Q^s \quad (2).$$

Система введених вище рівнянь допускає множину траєкторій зростання, які залежать від рівня використання робочої сили, емісійної квоти та розподілу продукту на фондоутворюючий, споживчий та екологічний. Серед траєкторій економічного зростання виділяють характерні траєкторії збалансованого експоненціального зростання. З метою зна-

ходження таких траєкторій сформулюємо задачу оптимальної програми економічного зростання у вигляді:

$$\int_0^T \frac{C}{R} dt \rightarrow \max \quad (3),$$

$$\frac{dM_1}{dt} = I_1 - \mu_1 M_1, M_1(0) = M_{10} \quad (4),$$

$$\frac{dM_2}{dt} = I_2 - \mu_2 M_2, M_2(0) = M_{20} \quad (5),$$

$$Y = b_1 I_1 + b_2 I_2 + C + U \quad (6),$$

$$kY - M_2 - nU = Q^s \quad (7),$$

$$0 \leq R \leq R^s, M_1 \geq 0, M_2 \geq 0, I_1 \geq 0, I_2 \geq 0, C \geq 0, 0 \leq t \leq T \quad (8),$$

$$R^s(t) = R_0 e^{\lambda t}, Q^s = const \quad (9).$$

Запропонована двосекторна еколого-економічна модель відображає максимізацію величини питомого споживання населення протягом планового періоду $[0, T]$ за умов виконання балансів основного та допоміжного виробництв, діяльність яких обумовлена динамікою відповідних їм потужностей.

Математично отримана модель (3)–(9) є задачею теорії оптимального керування [12]. З метою спрощення приведемо її до загальної постановки задачі оптимального керування. Для цього проведемо низку перетворень. З третього (6) та четвертого (7) рівнянь отримуюмо:

$$C = \left(1 - \frac{k}{n}\right) M_1 f_1\left(\frac{R}{M_1}\right) - b_1 I_1 - b_2 I_2 + \frac{1}{n} M_2 + \frac{1}{n} Q^s.$$

Введемо нові змінні:

$$\rho_1 = \frac{M_1}{R^s}, \rho_2 = \frac{M_2}{R^s}, \nu = \frac{R}{R^s}.$$

У відносних змінних модель набуде вигляду:

$$\int_0^T \left[\left(1 - u - \frac{k}{n}\right) f_1\left(\frac{\nu}{\rho_1}\right) \rho_1 + \frac{1}{n} \rho_2 \right] dt + \frac{1}{n} \int_0^T \omega^s dt \rightarrow \max,$$

$$\frac{d\rho_1}{dt} = \frac{u u_1}{b_1} f_1\left(\frac{\nu}{\rho_1}\right) \rho_1 - (\lambda + \mu_1) \rho_1,$$

$$\frac{d\rho_2}{dt} = \frac{u(1-u_1)}{b_2} f_1\left(\frac{\nu}{\rho_1}\right) \rho_1 - (\lambda + \mu_2) \rho_2,$$

$$0 \leq u \leq 1, 0 \leq u_1 \leq 1, 0 \leq \nu \leq 1.$$

З метою математичного дослідження застосуємо до отриманої задачі апарат теорії оптимального керування, а саме — принцип максимуму Понтрягіна [13]. Функція Гамільтона має вигляд:

$$H = \left(1 - u - \frac{k}{n}\right) f_1\left(\frac{\nu}{\rho_1}\right) \rho_1 + \frac{1}{n} \rho_2 + p_1 \left[\frac{u u_1}{b_1} f_1\left(\frac{\nu}{\rho_1}\right) \rho_1 - (\lambda + \mu_1) \rho_1 \right] + p_2 \left[\frac{u(1-u_1)}{b_2} f_1\left(\frac{\nu}{\rho_1}\right) \rho_1 - (\lambda + \mu_2) \rho_2 \right] =$$

$$= \left(1 - \frac{k}{n} + u \left[\left(\frac{p_1}{b_1} - \frac{p_2}{b_2}\right) u_1 + \frac{p_2}{b_2} - 1 \right] \right) f_1\left(\frac{\nu}{\rho_1}\right) \rho_1 + \frac{1}{n} \rho_2 - p_1 (\lambda + \mu_1) \rho_1 - p_2 (\lambda + \mu_2) \rho_2 \rightarrow \max_{u, u_1, \nu}.$$

Спряжені змінні задовольняють умови:

$$\frac{dp_i}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial \rho_i}, i = 1, 2, p(T) = 0,$$

тобто

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dp_1}{dt} &= p_1 (\lambda + \mu_1) - \left(1 - \frac{k}{n} + u \left[\left(\frac{p_1}{b_1} - \frac{p_2}{b_2}\right) u_1 + \frac{p_2}{b_2} - 1 \right] \right) \left(f_1\left(\frac{\nu}{\rho_1}\right) - \left(\frac{\nu}{\rho_1}\right) f_1'\left(\frac{\nu}{\rho_1}\right) \right), \\ \frac{dp_2}{dt} &= p_2 (\lambda + \mu_2) - \frac{1}{n}. \end{aligned} \right.$$

Аналіз отриманої функції на досягнення максимуму приводить до таких висновків:

якщо $\left(\frac{p_1}{b_1} - \frac{p_2}{b_2}\right) u_1 + \frac{p_2}{b_2} - 1 > 0$, то $u = 1, \nu = 1$;

якщо $\left(\frac{p_1}{b_1} - \frac{p_2}{b_2}\right) u_1 + \frac{p_2}{b_2} - 1 \leq 0$, то $u = 0, \nu = 1$.

Отже,

$$1 - \frac{k}{n} + u \left[\left(\frac{p_1}{b_1} - \frac{p_2}{b_2}\right) u_1 + \frac{p_2}{b_2} - 1 \right] = \begin{cases} \frac{p_2}{b_2} - \frac{k}{n} + \left(\frac{p_1}{b_1} - \frac{p_2}{b_2}\right) u_1, & u = 1, \\ 1 - \frac{k}{n}, & u = 0. \end{cases}$$

Завдяки властивостям виробничої функції функція

$f_1\left(\frac{\nu}{\rho_1}\right)$ Гамільтона зростає по ν . Тому на оптимальній

траєкторії $\nu = 1$, що відповідає умові повної зайнятості.

Проаналізуємо гамільтоніан на предмет можливих значень керування u_1 . При цьому з огляду на попередньо отриманий результат нас буде цікавити випадок $u=1$:

1. $u_1=1$ при $\frac{p_1}{b_1} > \frac{p_2}{b_2}$. Система фазових та двоїстих

змінних буде мати вигляд:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d\rho_1}{dt} &= \frac{1}{b_1} f_1\left(\frac{1}{\rho_1}\right) \rho_1 - (\lambda + \mu_1) \rho_1, \\ \frac{d\rho_2}{dt} &= -(\lambda + \mu_2) \rho_2, \\ \frac{dp_1}{dt} &= p_1 (\lambda + \mu_1) - \left(\frac{p_1}{b_1} - \frac{k}{n}\right) \left(f_1\left(\frac{1}{\rho_1}\right) - \left(\frac{1}{\rho_1}\right) f_1'\left(\frac{1}{\rho_1}\right) \right), \\ \frac{dp_2}{dt} &= p_2 (\lambda + \mu_2) - \frac{1}{n}. \end{aligned} \right.$$

2. $u_1=0$ при $\frac{p_1}{b_1} < \frac{p_2}{b_2}$. Відповідна система:

$$\begin{cases} \frac{d\rho_1}{dt} = -(\lambda + \mu_1)\rho_1, \\ \frac{d\rho_2}{dt} = \frac{1}{b_2} f_1\left(\frac{1}{\rho_1}\right)\rho_1 - (\lambda + \mu_2)\rho_2, \\ \frac{dp_1}{dt} = p_1(\lambda + \mu_1) - \left(\frac{p_2}{b_2} - \frac{k}{n}\right) \left(f_1\left(\frac{1}{\rho_1}\right) - \left(\frac{1}{\rho_1}\right) f'_1\left(\frac{1}{\rho_1}\right) \right), \\ \frac{dp_2}{dt} = p_2(\lambda + \mu_2) - \frac{1}{n}. \end{cases}$$

3. На лінії перемикання $\frac{p_1}{b_1} = \frac{p_2}{b_2}$:

$$\begin{cases} \frac{d\rho_1}{dt} = \frac{\hat{u}_1}{b_1} f_1\left(\frac{1}{\rho_1}\right)\rho_1 - (\lambda + \mu_1)\rho_1, \\ \frac{d\rho_2}{dt} = \frac{\hat{u}(1-\hat{u}_1)}{b_2} f_1\left(\frac{1}{\rho_1}\right)\rho_1 - (\lambda + \mu_2)\rho_2, \\ \frac{dp_1}{dt} = p_1(\lambda + \mu_1) - \left(1 - \frac{k}{n} + u\left(\frac{p_2}{b_2} - 1\right)\right) \left(f_1\left(\frac{1}{\rho_1}\right) - \left(\frac{1}{\rho_1}\right) f'_1\left(\frac{1}{\rho_1}\right) \right), \\ \frac{dp_2}{dt} = p_2(\lambda + \mu_2) - \frac{1}{n}. \end{cases}$$

Стаціонарна точка моделі визначається системою рівнянь $\frac{d\rho_1}{dt} = 0, \frac{d\rho_2}{dt} = 0, \frac{dp_1}{dt} = 0, \frac{dp_2}{dt} = 0$ при $\hat{u} = 1$:

$$\begin{cases} \hat{u}_1 f_1\left(\frac{1}{\rho_1}\right) = b_1(\lambda + \mu_1), \\ (1 - \hat{u}_1) f_1\left(\frac{1}{\rho_1}\right) \rho_1 = b_2(\lambda + \mu_2)\rho_2, \\ f_1\left(\frac{1}{\rho_1}\right) - \left(\frac{1}{\rho_1}\right) f'_1\left(\frac{1}{\rho_1}\right) = \frac{b_1 p_2}{1 - \frac{k}{n} + \left(\frac{p_2}{b_2} - 1\right)} (\lambda + \mu_1), \\ \frac{1}{n} = p_2(\lambda + \mu_2). \end{cases} \quad (10)$$

Отримана система дозволяє за відомим з четвертого рівняння p_2 визначити змінну ρ_1 з третього рівняння, що дає можливість отримати оптимальне керування \hat{u}_1 з першого та ρ_2 з другого рівнянь системи, а за відомим керуванням та фазовими змінними знайти максимум інтегрального кінцевого споживання (3) побудованої еколого-економічної моделі, а також обсяг валового випуску продукції основного та обсяги утилізованих викидів допоміжним виробництвом в умовах обмежень на емісії парникових газів.

ВИСНОВКИ

Необхідність вирішення проблеми зменшення антропогенного впливу на довкілля призвела до створення Кіотського протоколу, спрямованого на обмеження емісій парникових газів. Виконання його умов передбачає зростаючу роль заходів з екологічної політики, зокрема виділення окремого сектору в структурі національної економіки. Дослідження даної задачі на рівні математичного моделювання дозволило побудувати еколого-економічну модель, яка включає два види балансів: економічний (1) та екологічний (2), динаміку ресурсних змінних (4)—(5) та ставить своєю метою максимізацію

кінцевого споживання (3). Проведений на основі апарату теорії оптимального керування аналіз дозволив побудувати стаціонарні траєкторії (10) отриманої динамічної системи.

Побудова та дослідження описаної моделі проводилися, виходячи з умови про необхідність залучення додаткової квоти на викиди вуглекислого газу, що характерно для економік більшості промислово розвинутих країн. В той же час згідно змісту Кіотського протоколу участь в ньому беруть також країни, які володіють надлишком дозволених емісій, що дає їм можливість отримати додаткові економічні ресурси. Цей факт потребує переходу на основі запропонованого підходу до відповідної еколого-економічної моделі зі зміною балансових співвідношень (1)—(2) та відображення цільового призначення отриманих додаткових трансфертів.

Література:

1. МГЭИК, 2007: Изменение климата, 2007 г.: Обобщающий доклад. Вклад рабочих групп I, II и III в Четвертый доклад об оценке Межправительственной группы экспертов по изменению климата / Пачаури, Райзингер и основная группа авторов (ред.). — Женева: МГЭИК, 2007. — 104 с.
2. Киотский протокол к Конвенции об изменении климата / Секретариат Конвенции об изменении климата. — Бонн, 2000. — 33 с.
3. Грабб М. и др. Стратегический анализ Киото-Марракешской системы: пер. с англ. — WWF, RIIA, Imperial College London, World Council of Churches. — 2003. — 12 с.
4. Ляшенко І.М. Економіко-математичні методи та моделі сталого розвитку. — К.: Вища школа, 1999. — 236 с.
5. Canes M. Economic Modeling of Climate Change Policy. — Brussels: International Council for Capital Formation, 2002. — 17 p.
6. Research on Output Growth Rates and Carbon Dioxide Emissions of the Industrial Sectors of EU-ETS: Final Report; Oxford Economic Forecasting. — Oxford, 2006. — 63 p.
7. Capros P. Climate Technology Strategies 2: The Macro-Economic Cost and Benefit of Reducing Greenhouse Gas Emissions in the European Union / P.Capros, P.Georgakopoulos, D.Van Regemorter, et. al // ZEW Economic Studies. — Vol. 4. — New York: Physica-Verlag Heidelberg, 1999. — 224 p.
8. Boehringer C., Rutherford T. The Cost of Compliance: A CGE Assessment of Canada's Policy Options under the Kyoto Protocol / C.Boehringer, T.Rutherford // World Economy. Volume. — 2009. — 33 Issue 2. — 211 p.
9. Волошин А.Ф., Горицына И.А. Механизмы распределения квот на выбросы по Киотскому протоколу — Bulgaria, Varna: Proc. XI-th Int. Conf. Knowledge-dialogue-Solution", 2009.
10. Ляшенко І.М., Онищенко А.М. Моделювання динамічної ринкової рівноваги в умовах обмежень на викиди парникових газів // Науковий вісник Київського національного торговель-економічного університету, серія: економіка. — 2010
11. Багриновский К.А., Клейнер Г.Б. Производственные функции: теория, методы, применение // Экономика и математические методы. — 1988. — 24. — Вып. 6. — С. 1144—1146. — Рец. на кн.: Клейнер Г.Б. Производственные функции: теория, методы, применение. — М.: Финансы и статистика, 1986. — 239 с.
12. Основы теории оптимального управления: учеб. пособие для экон. вузов / В.Ф. Кротов, Б.А. Лагоша, С.М. Лобанов, Н.И. Данилина, С.И. Сергеев. Под общ. ред. В.Ф. Кротова. — М.: Высш. шк., 1990. — 430 с.
13. Понтрягин А.С. Принцип максимума в оптимальном управлении: учебное пособие. — М.: Едиториал УРСС, 2004. — 64 с.

Стаття надійшла до редакції 12.04.2011 р.