

Онищенко А.М.*

АНАЛІЗ ДИНАМІКИ ВАЛОВОГО ВИПУСКУ ПРОДУКЦІЇ НА РІВНІ МІЖДЕРЖАВНОЇ ВЗАЄМОДІЇ В РАМКАХ РЕАЛІЗАЦІЇ КІЮТСЬКОГО ПРОТОКОЛУ

Summary. The first international agreement about the emission limit of the hot-house – Kyoto Protocol provides for the economically mechanisms (flexibility mechanisms). The author singled out the basic members of this agreement and proposed ecological-economic model of the international cooperation for the realization of the ecological limits.

Ключові слова. Рамкова конвенція ООН зі зміни клімату, Кіотський протокол, механізми гнучкості, еколого-економічне моделювання, моделі системної динаміки.

I. Вступ. Зміна клімату та вплив людської діяльності на клімат приваблюють увагу дослідників протягом десятиліть. Переконливі аргументи на користь існування такого впливу стали основою консенсусу з питань кліматичних змін та ролі людини в цих змінах, досягнутого на початку 90-х років минулого століття і закріпленого Рамковою Конвенцією ООН зі Зміни Клімату в Ріо-де-Жанейро [1]. Незважаючи на невизначеність кількісних оцінок наслідків антропогенного впливу, світове суспільство прийшло до висновку про необхідність широкомасштабних дій спрямованих на скорочення емісій парникових газів. Згідно третій оціночній доповіді Міжурядової групи експертів зі зміни клімату [1], процеси що відбуваються в довкіллі вже сьогодні являють реальну загрозу. За минуле століття середнє підвищення температури досягло 0,6 С. Це підвищення пов'язане зі збільшенням концентрації вуглекислого газу в атмосфері, пов'язане з діяльністю людини. Виходячи зі сказаного вище, діяльність з обмеження емісій парникових газів стала обґрунтованою і такою, що вимагає юридичного закріплення на рівні міжнародної співпраці. Таким документом-доповненням до Рамкової Конвенції ООН зі Зміни Клімату став прийнятий у 1997 році Кіотський протокол (КП) [2].

Цей документ визначив кількісні зобов'язання зі скорочення викидів парникових газів для промислово розвинутих країн на першій звітний період, а також передбачає можливість використовувати механізми гнучкості з метою більш ефективного виконання своїх зобов'язань. Механізми гнучкості включають до свого складу проекти спільного виконання зі скорочення емісій парникових газів, торгівлю квотами та реалізацію механізму чистого розвитку спільно з країнами, що розвиваються, для яких не встановлено кількісних обмежень на викиди [3]. При цьому КП передбачає, що кожна країна сама відпрацьовує внутрішній механізм управління викидами парникових газів. Важливо підкреслити, що встановлені зобов'язання прийняті лише для першого звітного періоду, подальші обмеження повинні стати предметом наступних перемов учасників Конференції Сторін.

* кандидат економічних наук, докторант кафедри математичної інформатики факультету кібернетики Київського національного університету імені Тараса Шевченка

Науковий консультант: д.ф.-м.н., заслужений професор Ляшенко І. М.

II. Постановка завдання. Особливістю КП є спроба розв'язати екологічні проблеми за допомогою економічних важелів, як найефективнішого інструменту впливу. На сьогодні зроблено низку спроб дослідження економічної складової протоколу на концептуальному рівні. В той же час реалізація основних механізмів в цілому залишається справою майбутнього. Необхідно ще досягти ясного розуміння того, які соціальні, екологічні та економічні принципи необхідно втілити на міжнародному рівні, щоб ці механізми запрацювали. Окрім того такі питання як розробка економічної стратегії, мінімізація негативних наслідків, узгоджуючі процедури стануть ефективними лише після того як будуть розвинуті та доопрацьовані. Розв'язання таких завдань необхідно здійснювати на рівні еколого-економічного моделювання, успішне використання апарату якого дозволяє отримати змістовні висновки та розкрити приховані залежності між основними змінними моделей.

Спробу модельного аналізу еколого-економічної взаємодії зроблено в роботі [4], де на основі однопродуктової динамічної балансової моделі побудовано еколого-економічну модель, що враховує виробництво й розподіл валового випуску як економічну складову, а також встановлені Кіотським протоколом норми на обсяги викидів парникових газів як екологічну складову. Основні співвідношення моделі виражаються системою:

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

де $X(t)$ – поточний обсяг валового випуску;
 $\eta(t)$ – коефіцієнт прирістної фондоемності;
 a – коефіцієнт прямих витрат;
 $\gamma(t)$ – норма споживання;
 $b(t)$ – норма працеемності
 Q – встановлена для країни квота викидів парникових газів;
 $R(t)$ – загальний обсяг емісій CO₂ в наслідок дії матеріального виробництва;
 $T(t)$ – обсяг утилізованих викидів парникових газів в наслідок дії екологічного виробництва.

При цьому розглянуто різні сценарні варіанти залежності обсягу дозволених емісій від часу: фіксована квота та спадні залежності. Для кожного з даних варіантів побудовано траєкторії залежності обсягу валового випуску від екологічних параметрів у часі, та проведено їх аналіз. Подальшим кроком стала модифікація запропонованої моделі на випадок участі країни, яка повинна зменшити обсяги емісій парникових газів, в окремих механізмах гнучкості КП.

Аналіз отриманих моделей дозволяє перейти до комплексного моделювання економічної стратегії, яка б враховувала можливість паралельної участі країни як в торгівлі квотами, так і ПСО, МЧР. Лише така політика дозволить здешевити виконання екологічних зобов'язань, встановлених КП для країн, національні можливості економік яких в даному питанні є обмеженими.

III. Результати. Моделюючи процес міжнародної співпраці, в процесі реалізації механізмів гнучкості, очевидно, не можливо описати поведінку кожної окремої країни. Є сенс провести поділ всіх учасників на окремі групи, класифіковані за ключовими ознаками протоколу, тобто спробуємо виділити основних економічних агентів.

Під час перших дискусій навколо кліматичних змін почали формуватися групи країн, об'єднані певними інтересами. За деякими виключеннями склад основних лагерів виявився досить стійким. КП має сенс завдяки введенню чітких лімітів на емісії парникових газів для всіх промислово розвинутих країн, включених до Додатку I Конвенції [2],

зобов'язання яких – досягти сукупного скорочення емісій на 5% у порівнянні з 1990 роком. Ці країни посідають центральну позицію в міжнародних домовленостях по кліматичним змінам не стільки через свою політичну та економічну вагу, скільки через те, що на їх долю припадає найбільша частка викидів парникових газів. Будь-яка угода без їх участі стає абсолютно беззмістовною. Отже, в якості першого економічного агента (ЕА I) будемо розглядати промислово розвинуті країни, які включені до Додатку I КП [2] та повинні скоротити наявні на сьогодні обсяги викидів вуглекислого газу. Складність виконання своїх екологічних зобов'язань примушує ці країни приймати участь в реалізації механізмів гнучкості зокрема у співпраці з іншими країнами, включеними до КП – країнами з перехідною економікою, до яких належать країни Східної Європи та колишнього Радянського Союзу. Практично у всіх країн даної групи на кінець 80-х років економіка мала енергоємний характер, але з початком перехідного періоду об'єм емісій в значній мірі зменшився так що утворився певний надлишок вільних квот. Незважаючи на окремі відмінності між ними, будемо відносити їх до складу другого економічного агента (ЕА II). Іншою можливістю здешевлення виконання зобов'язань по КП для ЕА I є співпраця з країнами, що розвиваються. Особливістю даної групи країн є відсутність будь-яких емісійних зобов'язань, принаймні на першій стадії реалізації протоколу. Отже, їх низка буде складати третій економічний агент (ЕА III). Слід відзначити досить значну різноманітність його учасників, кількість яких складає до 120 країн. Тут присутні і дрібні островні держави, яким особливо загрожують кліматичні зміни, і країни ОПЕК, для яких введення в дію КП в планетарному масштабі загрожує скороченням попиту на нафту, і окремі позиції Китаю та Індії. Основний принцип, який об'єднує зазначені країни – вимога справедливості та права на власний шлях розвитку, оскільки промислово розвинуті країни несуть основну відповідальність за погіршення екологічної ситуації у світі. В центрі їх уваги знаходиться власний економічний розвиток, а їх головний принцип полягає в тому, що будь-які зобов'язання зі зниження шкідливих емісій, взяті на себе країнами, що розвиваються, повинні отримувати підтримку Півночі у вигляді фінансових ресурсів та нових технологій.

Наступною задачею є модифікація запропонованої моделі (1) з врахуванням специфіки кожного виділеного економічного агента.

I. Для ЕА I з метою пом'якшення встановлених екологічних обмежень з мінімальними економічними втратами необхідно є участь в описаних механізмах гнучкості. Останнє вимагає виділення певної частини валового випуску на реалізацію кожного з них. Паралельно з цим вагоме місце посідають внутрішні заходи зі скорочення об'ємів емісій парникових газів, що повинно поділяти внутрішні інвестиції на дві категорії. В зроблених припущеннях перше рівняння моделі (1) запишемо у вигляді:

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

У зв'язку з участю у вказаних проектах ЕА I вдається досягти виконання встановлених КП зобов'язань зі скорочення емісій парникових газів. З точки зору математичного запису нерівність досліджуваної моделі перетвориться на рівність та вимагає включення додаткових складових:

$$Q^1 = R^1(t) - T^1(t) - Z_1(t) - Z_2(t) - Z_3(t) \quad ,$$

де $Z_1(t)$, $Z_2(t)$, $Z_3(t)$ – обсяги додатково залучених квот в наслідок участі в торгівлі квотами, ПСО та МЧР відповідно.

Перші доповіді Міжурядової групи експертів зі зміни клімату, окрім визнання вирішальної ролі впливу на зміну довкілля збільшення концентрації парникових газів в атмосфері Землі, відзначали промислове виробництво як одного з найбільших їх емітентів,

а також стійку пропорційну залежність між обсягами валового випуску продукції та викидів вуглекислого газу. В якості такої залежності будемо розглядати умову:

$$R^1(t) = k_1 X^1(t)$$

Аналогічним чином будемо моделювати залежність між обсягами додатково залучених одиниць скорочень отриманих в наслідок участі в механізмах гнучкості та частиною валового випуску спрямованого на дані цілі:

$$Z_1(t) = k_2^1 \alpha X^1(t), \quad Z_2(t) = k_3^1 \beta X^1(t), \quad Z_3(t) = k_4^1 \gamma X^1(t)$$

Враховуючи введені співвідношення, еколого-економічну модель поведінки ЕА I формалізуємо у вигляді:

$$\begin{cases} X^1(t) = a_1^1 X^1(t) + \eta_1^1 \frac{dX^1(t)}{dt} + \eta_2^1 \frac{dT^1(t)}{dt} + \delta^1 b^1 X^1(t) + \alpha X^1(t) + \beta X^1(t) + \gamma X^1(t) \\ Q^1 = k_1^1 X^1(t) - T^1(t) - k_2^1 \alpha X^1(t) - k_3^1 \beta X^1(t) - k_4^1 \gamma X^1(t). \end{cases}$$

Таким чином, обсяг валового випуску розподілений на виробниче та кінцеве споживання, введення та заміщення основних виробничих фондів в матеріальному виробництві та заходах зі скорочення емісій, купівлю додаткових квот, реалізацію проектів спільного виконання та механізму чистого розвитку. Екологічна складова визначає умову виконання встановлених обмежень як різницю між обсягом викидів парникових газів, спричинених діяльністю матеріального виробництва, та обсягами їх утилізації в наслідок реалізації природоохоронної політики, а також обсягами отриманих за рахунок участі в механізмах гнучкості одиниць скорочень емісій.

II. Реалізація низки зазначених механізмів, а саме торгівлі квотами та проектів спільного виконання згідно їх суті вимагає співпраці з ЕА II. Головною його особливістю є надлишкова квота, якою він може вільно розпоряджатися, наприклад, з метою залучення додаткових фінансових ресурсів. При цьому будемо вважати, що вся вільна частина квоти витрачається з метою максимізації економічного зиску. Поряд з цим внутрішня екологічна політика як і для розвинутих країн має принципове значення, оскільки дозволяє збільшити частину надлишкової квоти, а також з огляду на подальші перспективи посилення екологічних стандартів КП. За рахунок участі в міжнародній торгівлі квотами ЕА II залучає до складу матеріальної складової кошти витрачені ЕА I в обсязі . Структура економічної складової моделі (1) буде визначатись рівнянням:

$$X^2(t) = a^2 X^2(t) + \eta_1^2 \frac{dX^2(t)}{dt} + \eta_2^2 \frac{dT^2(t)}{dt} + \delta^2 b^2 X^2(t) - \alpha^1 X^1(t)$$

При цьому на величину проданої частини надлишкової квоти зменшиться її встановлений для ЕА II обсяг. Аналогічна зміна відбудеться в наслідок участі в проектах спільного виконання. Враховуючи припущення зроблені для відповідних змінних ЕА I, модель екологічного блоку визначатиметься умовою:

$$Q^2 = k_1^2 X^2(t) - T^2(t) + k_2^2 \alpha X^1(t) + k_3^2 \beta X^2(t)$$

Виконання спільних проектів, згідно їх основного змісту, передбачає інвестування коштів у природоохоронні заходи спрямовані на зменшення емісій вуглекислого газу, передачу новітніх технологій, нових економічних форм управління тощо. З огляду на це, знає зміни поведінка змінної обсягу знищених викидів парникових газів. Модель її зміни у часі представимо у вигляді:

$$T^2(t) = a_1^2 X^2(t) + a_2^2 X^1(t) - \xi^2$$

Утилізація емісій відбувається за рахунок власного ресурсу та ЕА I, отриманого в наслідок співпраці в ПСО. ξ_2 – обсяг незнищених викидів.

Остаточно модель еколого-економічної стратегії ЕА II запишемо наступним чином:

$$\begin{cases} X^2(t) = a^2 X^2(t) + \eta_1^2 \frac{dX^2(t)}{dt} + \eta_2^2 \frac{dT^2(t)}{dt} + \delta^2 b^2 X^2(t) - \alpha^1 X^1(t), \\ Q^2 = k_1^2 X^2(t) - T^2(t) + k_2^2 \alpha X^1(t) + k_2^3 \beta X^2(t), \\ T^2(t) = a_1^2 X^2(t) + a_2^2 X^1(t) - \xi^2. \end{cases}$$

III. Альтернативним шляхом виконання встановлених для західних країн емісійних обмежень є їх участь в МЧР. Згідно змісту КП така співпраця здійснюється у взаємодії з ЕА III. За аналогією з розглянутими вище моделями рівняння динаміки обсягів валового випуску продукції запишемо у вигляді:

$$X^3(t) = a_1^3 \cdot X^3(t) + \eta^3 \cdot \frac{dX^3(t)}{dt} + \gamma^3 \cdot b^3 \cdot X^3(t)$$

В порівнянні з розглянутими вище моделями в рівнянні матеріального балансу відсутній доданок обсягу валового продукту спрямованого на введення та заміщення вибухливих основних виробничих фондів екологічної складової в наслідок відсутності цілеспрямованої екологічної політики ЕА III. Як вже зазначено, дана група країн немає встановленої квоти емісій парникових газів, принаймні до ратифікації ними КП. Тому вводити у розгляд змінні пов'язані з певними значеннями вуглекислого газу будемо з метою моделювання цілісної планетарної тенденції їх зміни, що належить до основних завдань протоколу. В певній мірі формальний розгляд обсягу квоти по суті є фактичним значенням-ріницею між об'ємами емісій, їх утилізації та переданої частини ЕА I:

$$Q^3 = k_1^3 \cdot X^3(t) - T^3(t) + k_2^3 \gamma X^1(t)$$

При цьому варто відзначити, що утилізація вуглекислого газу здійснюється за рахунок коштів країни-донора в рамках дії МЧР:

$$T^3(t) = a_2^3 \cdot X^1(t) - \xi^3,$$

де ξ_3 – обсяг незнищених викидів парникових газів.

Описані моделі утворюють еколого-економічну модель поведінки основних виділених показників ЕА III:

$$\begin{cases} X^3(t) = a_1^3 \cdot X^3(t) + \eta^3 \cdot \frac{dX^3(t)}{dt} + \gamma^3 \cdot b^3 \cdot X^3(t), \\ Q^3 = k_1^3 \cdot X^3(t) - T^3(t) + k_2^3 \gamma X^1(t), \\ T^3(t) = a_2^3 \cdot X^1(t) - \xi^3. \end{cases}$$

Окреслена на початку статті мета дослідження еколого-економічної взаємодії в процесі міжнародної співпраці вимагає розгляду розширеної моделі, яка об'єднує поведінку всіх виділених економічних агентів:

$$\begin{cases} X^1(t) = a_1^1 X^1(t) + \eta_1^1 \frac{dX^1(t)}{dt} + \eta_2^1 \frac{dT^1(t)}{dt} + \delta^1 b^1 X^1(t) + \alpha X^1(t) + \beta X^1(t) + \gamma X^1(t), \\ Q^1 = k_1^1 X^1(t) - T^1(t) - k_2^1 \alpha X^1(t) - k_3^1 \beta X^1(t) - k_4^1 \gamma X^1(t), \\ X^2(t) = a^2 X^2(t) + \eta_1^2 \frac{dX^2(t)}{dt} + \eta_2^2 \frac{dT^2(t)}{dt} + \delta^2 b^2 X^2(t) - \alpha^1 X^1(t), \\ Q^2 = k_1^2 X^2(t) - T^2(t) + k_2^2 \alpha X^1(t) + k_2^3 \beta X^2(t), \\ T^2(t) = a_1^2 X^2(t) + a_2^2 X^1(t) - \xi^2, \\ X^3(t) = a_1^3 \cdot X^3(t) + \eta^3 \cdot \frac{dX^3(t)}{dt} + \gamma^3 \cdot b^3 \cdot X^3(t), \\ Q^3 = k_1^3 \cdot X^3(t) - T^3(t) + k_2^3 \gamma X^1(t), \\ T^3(t) = a_2^3 \cdot X^1(t) - \xi^3. \end{cases}$$

Дослідження отриманої системи ускладнюється її розмірністю. Провівши ряд нескладних перетворень, зведемо її до наступного вигляду:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dX^1(t)}{dt} = \frac{(1 - a_1^1 - \delta^1 b^1 - \alpha - \beta - \gamma)X^1(t) + \eta_2^1 \frac{dQ^1}{dt}}{\eta_1^1 + \eta_2^1 k_1^1 - k_2^1 \alpha - k_3^1 \beta - k_4^1 \gamma}, \\ \frac{dX^2(t)}{dt} = \frac{(a_2^2 - k_2^2 \alpha) \left((1 - a^2 - \delta^2 b^2) X^2(t) + \alpha X^1(t) \right) + \eta_2^2 a_2^2 \frac{dQ^2}{dt}}{\eta_1^2 (a_2^2 - k_2^2 \alpha) + \eta_2^2 (k_1^2 a_2^2 - k_2^2 \alpha a_1^2 + k_2^3 \beta a_2^2)}, \\ \frac{dX^3(t)}{dt} = \frac{1 - a_1^3 - \delta^3 b^3}{\eta^3 k_1^3} (Q^3 + (a_2^3 - k_2^3 \gamma) X^1(t) - \xi^3). \end{array} \right. \quad (2)$$

Розв'язки отриманої системи диференціальних рівнянь визначають зміну обсягів валового випуску кожного з введених економічних агентів у часі за умов встановленої квоти дозволених емісій парникових газів. Перш ніж перейти до розв'язання розглянемо можливі сценарії її залежності від часу.

I. Згідно положень КП обсяги дозволених емісій встановлюються на термін звітного періоду – п'ять років. Наступні їх значення визначає чергова Конференція сторін. Таким чином, сталі значення є обґрунтованим в короткотерміновому горизонті дослідження. Дана умова перетворює систему до наступного вигляду:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dX^1(t)}{dt} = \frac{(1 - a_1^1 - \delta^1 b^1 - \alpha - \beta - \gamma)X^1(t)}{\eta_1^1 + \eta_2^1 k_1^1 - k_2^1 \alpha - k_3^1 \beta - k_4^1 \gamma}, \\ \frac{dX^2(t)}{dt} = \frac{(a_2^2 - k_2^2 \alpha) \left((1 - a^2 - \delta^2 b^2) X^2(t) + \alpha X^1(t) \right)}{\eta_1^2 (a_2^2 - k_2^2 \alpha) + \eta_2^2 (k_1^2 a_2^2 - k_2^2 \alpha a_1^2 + k_2^3 \beta a_2^2)}, \\ \frac{dX^3(t)}{dt} = \frac{1 - a_1^3 - \delta^3 b^3}{\eta^3 k_1^3} (Q^3 + (a_2^3 - k_2^3 \gamma) X^1(t) - \xi^3). \end{array} \right.$$

Враховуючи початкові умови $X^1(0)=X_{10}$, $X^2(0)=X_{20}$, $X^3(0)=X_{30}$, розв'язки системи визначають функції:

$$\begin{aligned} X^1(t) &= X_0^1 e^{\frac{A}{B}t}, \\ X^2(t) &= X_0^2 e^{\frac{CD}{E}t} + X_0^1 \alpha \frac{BD}{BCD - AE} \left(e^{\frac{CD}{E}t} - e^{\frac{A}{B}t} \right), \\ X^3(t) &= X_0^3 + \frac{AF(Q^3 - \xi^3)t - BFGX_0^1 \left(1 - e^{\frac{A}{B}t} \right)}{Ak_1^3 \eta^3}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{де} \quad A &= 1 - a_1^1 - \delta^1 b^1 - \alpha - \beta - \gamma; \\ B &= \eta_1^1 + \eta_2^1 k_1^1 - k_2^1 \alpha - k_3^1 \beta - k_4^1 \gamma; \\ C &= 1 - a^2 - \delta^2 b^2; \\ D &= a_2^2 - k_2^2 \alpha; \end{aligned}$$

Аналіз отриманих траєкторій вказує на можливість виконання встановлених емісійних обмежень для ЕА I за умови дотримання продуктивності моделі, тобто не перевищення критичних значень екологічних параметрів. В той же час їх збільшення дозволяє ЕА I та ЕА II збільшити обсяги валового випуску продукції.

II. Подальша перспектива переговорного процесу навколо розвитку положень КП більш за все буде полягати в посиленні екологічних норм. Це вимагає розгляду більш жорстких умов щодо зміни обсягів дозволеної квоти на емісії парникових газів, тобто спадної залежності. В якості такої будемо розглядати умову $Q(t)=Q_0/(1+\lambda t)$. Враховуючи останнє та початкові умови, система (2) має розв'язки:

$$\begin{aligned}
X^1(t) &= X_0^1 e^{\frac{A}{B}t} - \frac{Q_0^1 \eta_2^1}{B(1+\lambda^1 t)} \left((1+\lambda^1 t) e^{\frac{A}{B}t} - 1 \right) - \frac{Q_0^1 \eta_2^1 A e^{\frac{A+A\lambda^1 t}{B\lambda^1}}}{B^2 \lambda^1} \left(Ei\left(-\frac{A}{B\lambda^1}\right) - Ei\left(-\frac{A+A\lambda^1 t}{B\lambda^1}\right) \right), \\
X^2(t) &= X_0^2 e^{\frac{CD}{E}t} + X_0^1 \alpha \frac{BD}{BCD-AE} \left(1 - e^{\frac{A}{B}t} \right) + \frac{Q_0^2 \eta_2^2 \left(BCD^2 \alpha (1+\lambda^2 t) \left(Ei\left(-\frac{CD}{E\lambda^2}\right) - Ei\left(-\frac{CD(1+\lambda^2 t)}{E\lambda^2}\right) \right) \right)}{BE^2(AK-BCD)} - \\
&\quad - \frac{ADE^2 \alpha (1+\lambda^1 t) \left(e^{\frac{A}{B\lambda^1}t} Ei\left(-\frac{A}{B\lambda^1}\right) - e^{-\frac{A+A\lambda^1 t}{B\lambda^1}} Ei\left(-\frac{A+A\lambda^1 t}{B\lambda^1}\right) \right) - a_2^2 B(BCD-AE)E\lambda^2 t -}{BE^2(AK-BCD)} \\
&\quad - \frac{a_2^2 B(BCD-AE)E(1+\lambda^2 t) \left(Ei\left(-\frac{CD}{E\lambda^2}\right) - Ei\left(-\frac{CD(1+\lambda^2 t)}{E\lambda^2}\right) \right)}{BE^2(AK-BCD)}, \\
X^3(t) &= X_0^3 - \frac{BFG}{Ak_1^3 \eta^3} \left(1 - e^{\frac{A}{B}t} \right) \left(X_0^1 - \frac{Q_0^1 \eta_2^1 \left(B\lambda^1 + A e^{\frac{A}{B\lambda^1}t} Ei\left(-\frac{A}{B\lambda^1}\right) \right)}{B^2 \lambda^1} \right) + \frac{F(Q^3 - \xi^3)}{k_1^3 \eta^3 \lambda^1} - \\
&\quad - \frac{FGQ_0^1 \eta_2^1}{Bk_1^3 \eta^3 \lambda^1} \left(e^{\frac{A}{B\lambda^1}t} Ei\left(-\frac{A}{B\lambda^1}\right) - e^{-\frac{A+A\lambda^1 t}{B\lambda^1}} Ei\left(-\frac{A+A\lambda^1 t}{B\lambda^1}\right) \right).
\end{aligned}$$

Складність отриманих розв'язків ускладнює їх аналіз. Однак за умови $\lambda \rightarrow 0$:

$$\lim_{\lambda \rightarrow 0} Q(t) = \lim_{\lambda \rightarrow 0} \frac{Q_0}{1+\lambda t} = Q_0 = const \quad \text{вони наближаються до розв'язків пункту I.}$$

III. В якості іншої залежності обсягу встановленої квоти від часу будемо розглядати експоненціальну залежність характерну для довгострокового періоду дослідження: $Q(t) = Q_0 e^{-\lambda t}$, $\lambda > 0$. Відповідні розв'язки визначаються умовами:

$$\begin{aligned}
X^1(t) &= X_0^1 e^{\frac{A}{B}t} - \frac{Q_0^1 \eta_2^1 \lambda^1}{A+B\lambda^1} \left(e^{\frac{A}{B}t} - e^{\lambda^1 t} \right), \\
X^2(t) &= X_0^2 e^{\frac{CD}{E}t} - \frac{BDe^{\frac{A+B\lambda^1 t}{B}} \left(e^{\frac{A}{B}t} - e^{\frac{CD}{E}t} \right) Q_0^1 \alpha \eta_2^1 \lambda^1}{(BCD-AE)(A+B\lambda^1)} + e^{\frac{CD}{E}t} \frac{De^{-\lambda^1 t} \left(e^{\frac{A}{B}t} - e^{\frac{CD}{E}t} \right) Q_0^1 \alpha \eta_2^1 \lambda^1 \left(-\frac{Be}{A+B\lambda^1} + \frac{e^{1+\frac{A}{B}t}}{CD+E\lambda^1} \right)}{(BCD-AE) \left(-e^{\frac{A}{B}t} - e^{\frac{CD}{E}t} \right)} - \\
&\quad - \frac{BD \left(e^{\frac{A}{B}t} - e^{\frac{CD}{E}t} \right) \alpha \left(X_0^1 - \frac{Q_0^1 \eta_2^1 \lambda^1}{A+B\lambda^1} \right)}{BCD-AE}, \\
X^3(t) &= X_0^3 - \frac{Q_0^1 G \eta_2^1 e^{-\left(\frac{A}{B} + \lambda^1\right)t} \left(B \left(-1 + e^{\frac{A}{B}t} \right) F\lambda^1 - A e^{\frac{A}{B}t} + B \left(-1 + e^{\frac{A}{B}t} \right) \lambda^1 \right)}{Ak_1^3 \eta^3 (A+B\lambda^1)} + \\
&\quad + \frac{FA(Q^3 - \xi^3)t + BFG \left(-1 + e^{\frac{A}{B}t} \right) \left(X_0^1 - \frac{Q_0^1 \eta_2^1 \lambda^1}{A+B\lambda^1} \right)}{Ak_1^3 \eta^3}.
\end{aligned}$$

В порівнянні з попередньо отриманими розв'язками динаміку обсягів валового випуску ЕА I уповільнює окрім вище названих складових темп зменшення встановлених об'ємів дозволених емісій λ . Враховуючи той факт, що даний параметр регулюється ад-

міністративно, важливо звернути на це увагу при відпрацюванні подальших положень КП Міжурядовою групою експертів зі зміни клімату.

IV. Висновки. Незважаючи на низку складностей, як на історичному етапі створення так і на сучасному – впровадження, КП став на сьогодні першою глобальною угодою щодо охорони навколишнього середовища, яка заснована на ринкових механізмах регулювання (механізми гнучкості КП). Вони, зокрема, дозволяють знизити вартість виконання встановлених ним обмежень для промислово розвинутих країн, а решті учасниць залучити додаткові фінансові ресурси. Незважаючи на певні тенденції, які прослідковуються останнім часом, щодо заміни протоколу іншим, можна відзначити, що в будь-якому випадку світове суспільство розглядатиме КП як основу для подальшої модифікації. Перехід від концептуальної моделі до економіко-математичного моделювання досліджуваних задач дозволив визначити оптимальні параметри, як екологічної так й економічної складової, зокрема, залежності обсягів валового випуску від встановлених емісійних обмежень. Кількісні та якісні висновки таких досліджень і повинні стати підґрунтям для подальшої модифікації змісту КП та переходу до системного моделювання глобальної екологічної економіки.

Література

1. Framework Convention on Climate Change, UN FCCC // <http://www.unfccc.int>.
2. Кіотський протокол // http://www.climate.org.ua/int_agr/kyoto
3. Использование механизмов Киотского протокола // <http://www.sustainable-cities-net.org.ua/publicationshow.php?id=504>
4. 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.