



СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ

УДК 330.115

А. ЗАГОРОДНИЙ

Національна академія наук України, Київ, Україна; Інститут теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України, Київ, Україна; Державна установа «Центр оцінювання діяльності наукових установ та наукового забезпечення розвитку регіонів України НАН України», Київ, Україна, e-mail: *Zagorodny@nas.gov.ua*.

В. БОГДАНОВ

Національна академія наук України, Київ, Україна; Державна установа «Центр оцінювання діяльності наукових установ та наукового забезпечення розвитку регіонів України НАН України», Київ, Україна; Інститут механіки ім. С.П. Тимошенка НАН наук України, Київ, Україна; e-mail: *Bogdanov@nas.gov.ua*.

Г.Й. ШЕЛЛНХУБЕР

Міжнародний інститут прикладного системного аналізу (IIASA), Лаксенбург, Австрія, e-mail: *schellnhuber@iiasa.ac.at*.

Т. ЄРМОЛЬЄВА

Міжнародний інститут прикладного системного аналізу (IIASA), Лаксенбург, Австрія, e-mail: *ermol@iiasa.ac.at*.

П. ГАВЛІК

Міжнародний інститут прикладного системного аналізу (IIASA), Лаксенбург, Австрія, e-mail: *havlikpt@iiasa.ac.at*.

Н. КОМЕНДАНТОВА

Міжнародний інститут прикладного системного аналізу (IIASA), Лаксенбург, Австрія, e-mail: *komendan@iiasa.ac.at*.

РОБАСТНІ ПРОЦЕДУРИ ДАУНСКЕЙЛІНГУ ТА ЗВ'ЯЗУВАННЯ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ІНТЕГРОВАНОВОГО МОДЕЛЮВАННЯ Й УПРАВЛІННЯ СИСТЕМНИМИ РИЗИКАМИ, СТІЙКІСТЮ ТА БЕЗПЕКОЮ ВЗАЄМОЗАЛЕЖНИХ СИСТЕМ «ПРОДОВОЛЬСТВО–ЕНЕРГІЯ–ВОДА–ДОВКІЛЛЯ»¹

Анотація. У статті наведено стислий огляд передових методів системного аналізу, моделей та інструментів моделювання, що розробляються в Міжнародному інституті прикладного системного аналізу (IIASA), Лаксенбург, Австрія, а також у межах спільного проекту Національної академії наук України (НАНУ) та IIASA «Інтегроване моделювання для робастного управління безпекою та сталим розвитком у взаємозалежних системах «продовольство–енергія–вода–соціум–довкілля». Системними ризиками, що виникають у взаємозалежних системах «продовольство–енергія–вода–довкілля» (FEWE), можна керувати за допомогою двоетапної узгодженої системи прийняття рішень: ex-ante (випереджувальні рішення) та ex-post (адаптивні рішення), використовуючи інтегровані моделі для балансування проактивного зниження ризиків (наприклад, забезпечення стійкої інфраструктури, диверсифікованих ресурсів) з реактивним реагуванням на кризи (наприклад, за рахунок планування надзвичайних ситуацій, технологічних та фінансових резервних ме-

¹ Розроблення методологій і моделей здійснюється за підтримки спільного проекту Міжнародного інституту прикладного системного аналізу (IIASA) та Національної академії наук України (НАН України) «Інтегроване моделювання для робастного управління безпекою та сталим розвитком у взаємозалежних системах «продовольство–енергія–вода–соціум–довкілля», проекту ЄС PARATUS (CL3-2021-DRS-01-03, SEP-210784020) «Сприяння підвищенню готовності до катастроф і стійкості через спільне розроблення інструментів підтримки зацікавлених сторін для управління системними ризиками комплексних катастроф», а також проекту ЄС SystR «Прискорення системної адаптації до змін клімату в Європі через інтегровані екосистеми рішень з підвищення стійкості» (грантова угода ID: 101212761). Роботу також підтримано Національним фондом досліджень України, грант № 2020.02/0121.

© А. Загородній, В. Богданов, Г.Й. Шеллнхубер, Т. Єрмольєва, П. Гавлік, Н. Комендантова, 2026

ханізмів) для підвищення стійкості, як наголошено у спільному дослідженні IIASA та НАНУ. Цей підхід, що спирається на двоетапну стохастичну оптимізацію, має забезпечити робастне управління за рахунок збереження відкритості варіантів з одночасною підготовкою до неминучих невизначеностей у цих складних, взаємопов'язаних системах. По-справжньому інтегроване моделювання часто потребує перемасштабування (зменшення та збільшення масштабу) даних і результатів моделей. Невідповідність масштабів створює основне джерело невизначеностей, що потребує визначення належних показників, нових мір невизначеностей і ризиків, а також критеріїв якості для дезагрегації та агрегації. Процедури перемасштабування спираються на відповідний принцип оптимізації, наприклад, на максимізацію узагальненої перехресної ентропії, та поєднують доступні вибірки реальних спостережень у місцях розташування з іншими «ап'юріорними» «твердими та м'якими» даними (думками експертів, сценаріями), моделями псевдовибірками, доказами пов'язаних змінних, які є у формі рівнянь та обмежень. Ключовим питанням є оброблення невизначеностей в ап'юріорних значеннях та параметрах доступних обмежень. Окреслено підходи до зменшення масштабу за наявності невизначених ап'юріорних значень. Ці підходи надалі розробляються в IIASA та спільному проєкті НАНУ–IIASA. Методи оптимізації та моделювання зв'язків розподілених моделей дають змогу встановлювати зв'язки та діалоги між окремими моделями систем FEWE для аналізу узгоджених рішень без потреби в обміні або розкритті інформації, специфічної для систем, тобто за умов асиметричної інформації. Проблему проілюстровано прикладом об'єднання моделей окремих виробників, що здійснюють викиди парникових газів (суб'єктів викидів або сторін, що здійснюють викиди), у прототипну модель ринку торгівлі викидами у тому разі, коли інформація про сторони може бути недоступною, а спільні обмеження безпеки щодо викидів (коли викиди окремих сторін є невизначеними) мають бути дотримані. Описані методи та інструменти спрямовані на розроблення та впровадження передових підходів до системного аналізу та інтегрованого моделювання, що уможливають спільне планування систем FEWE за наявності спільних обмежень, асиметричної інформації та невизначеностей щодо секторальних моделей. Явне моделювання зв'язків дає змогу оцінювати та обробляти такі «нечутливі» ризики за стандартного незалежного планування секторів. Отже, метою застосування цих моделей та методів є системний аналіз безпеки взаємозалежних систем FEWE за наявності екзогенних ризиків та ризиків, на які (нависно та не-нависно) впливають рішення різних агентів. Зазначені методи та інструменти спираються на концепцію робастності та робастних рішень, які є в певному сенсі оптимальними для будь-якого сценарію потенційних невизначеностей.

Ключові слова: безпека зв'язку у взаємозалежних системах Food–Energy–Water–Environment, ендегенні системні ризики, притаманні випереджувальні ex-ante та операційні ex-post рішення, двоетапна задача стохастичної оптимізації, обмеження безпеки, надійне зменшення та збільшення масштабу, невизначена ап'юріорна інформація, моделювання зв'язків розподілених моделей, асиметрична інформація, негладка оптимізація, стохастичні квазіградієнтні процедури, інтегроване моделювання та планування розподілених систем.

DOI 10.34229/KCA2522-9664.26.3.6

ВСТУП

У статті розглянуто принципи безпеки взаємозалежних систем «продовольство–енергія–вода–довкілля» (Food–Energy–Water–Environment, FEWE) та підходи до її моделювання, що розробляються в IIASA (Міжнародний інститут прикладного системного аналізу, Лаксенбург, Австрія), а також у межах спільного проєкту НАН України та IIASA «Інтегроване моделювання для надійного управління безпекою та сталим розвитком у взаємозалежних системах «продовольство–енергія–вода–соціум–довкілля» [1–15] (<https://iiasa.ac.at/projects/integrated-modeling-for-robust-management-of-food-energy-water-land-use-nexus-security-and>). Метою є дослідження важливих взаємодійних компонентів у взаємозалежних FEWE-системах з урахуванням компромісів і синергій між цими системами. Основну увагу приділено інтегрованому моделюванню та робастному управлінню взаємозалежними системами FEWE за наявності системних ризиків, робастним підходам до гармонізації даних в умовах невизначеності та неповної інформації, робастному масштабуванню (даунскейлінгу), зв'язуванню розподілених моделей в умовах асиметричної інформації (ASI), а також іншим моделям та засобам моделювання. У роботі узагальнено низку зазначених підходів.

Акцент на надійності, прийнятних ризиках, доступності та можливості отримання ресурсів, зроблений у визначеннях продовольчої, енергетичної, водної

та екологічної безпеки [16–19], означає, що концепція безпеки охоплює мінливість і екстремальні ситуації, зокрема екстремальні опади, посухи, цінові шоки, нормативні вимоги та якість за прийнятних цін для всіх, включно з найбільш уразливими верствами населення. Відповідно, спільну безпеку у FEWE-системах розуміють як спроможність за будь-яких обставин забезпечувати дотримання нормативів і задоволення потреб суспільства у продовольстві, енергії, воді, наданні соціальних благ, екологічних умовах тощо з урахуванням вимог до цін, якості й обсягів, а також неминучих ризиків усіх типів.

Сектори FEWE стають дедалі більш взаємопов'язаними, оскільки вони використовують спільні, часто досить обмежені ресурси — як природні (наприклад, землю, воду, якість повітря), так і соціально-економічні (зокрема інвестиції, робочу силу). Земельні та водні ресурси потрібні не лише для сільськогосподарського виробництва, а й для гідроенергетики, видобутку та перероблення вугілля, охолодження електростанцій, розвитку відновлюваної енергетики та виробництва водню. Енергетичний сектор є одним із найбільших споживачів води, який швидко зростає. Чим більші обсяги води використовує енергетичний сектор, тим більш уразливими стають енергетичне виробництво та виробництво в інших водозалежних секторах [20–22].

Проблеми, пов'язані зі зміною клімату, та швидкий перехід енергетичного сектору до відновлюваних джерел енергії посилюють зв'язки між енергетичним та аграрним ринками. Сільськогосподарська продукція набуває значення важливого енергетичного ресурсу внаслідок вимог щодо використання біопалива. Уразливість урожайності сільськогосподарських культур, зростання попиту на зернові та волатильність цін прямо й опосередковано впливають на ринок транспортного палива та транспортні витрати [23]. Водночас ринки нафти, газу, електроенергії (та відповідні ціни) впливають на витрати й ціни в галузі сільськогосподарського виробництва [23–26]. Обидва сектори також зумовлюють погіршення стану спільного довкілля, зокрема через викиди, деградацію земель і забруднення вод.

Додаткові зв'язки та взаємодії у FEWE-системах виникають через впровадження нових технологій, зокрема періодично роботоздатних відновлюваних джерел енергії, акумуляторів і електромобілів, технологій на основі водню, установок опріснення води. Взаємозалежності можуть спричинити системні збої, якщо у секторних політиках не враховано міжсекторальну взаємопов'язаність і наявні обмеження [26]. Управління безпекою взаємозалежних систем FEWE потребує інтегрованого підходу до осмислення та опрацювання численних взаємодій між FEWE-системами [1–15, 19–26].

У розд. 1 розглянуто виникнення системних ризиків унаслідок системних взаємозалежностей та спільних обмежень [10–14]. У розд. 1.1 представлено просту модель двох систем і показано, що системні ризики можуть бути спричинені екзогенними невизначеними шоками в поєднанні зі спільними обмеженнями ресурсів або попиту. Системними ризиками можна управляти за допомогою двоетапної узгодженої схеми прийняття рішень, тобто *ex ante* (випереджувальної) та *ex post* (операційної), щоб знайти оптимальний баланс між взаємозалежним проактивним зниженням ризиків (стійка інфраструктура, диверсифіковані ресурси) та реактивним реагуванням на кризові ситуації (планування надзвичайних заходів, фінансові резерви) для підвищення стійкості, як наголошено у спільних дослідженнях НАНУ та IIASA [1–15]. Цей підхід, що ґрунтується на двоетапній стохастичній оптимізації, спрямований на прийняття робастних рішень та управління безпекою взаємозалежних систем FEWE за рахунок забезпечення відкритості опцій (гнучкості) з одночасною підготовкою до неминучих невизначеностей у цих та об'єднаних системах.

У розд. 1.2 сформульовано двоетапну модель стохастичної оптимізації (STO) для планування використання земель та розвитку сільськогосподарського сектору. Рішення у межах цієї моделі мають задовольняти різні економічні та біофізичні рівняння балансу, зокрема рівновагу попиту та пропозиції, водні потреби,

продовольчу безпеку, екологічні нормативи, цільові показники викидів парникових газів, вимоги щодо біопалива на різних рівнях агрегування. Обмеження безпеки встановлюють життєво необхідні вимоги до обсягів виробництва продовольства, забезпечення водою, постачання енергії та дотримання стандартів екологічної безпеки.

Є різні детальні моделі сільськогосподарських, енергетичних та водних систем. Задача зв'язування, інтегрування та масштабування цих моделей в єдину інтегровану FEWE-систему за наявності спільних обмежень є складною. Задачу масштабування (даунскейлінгу та апскейлінгу) даних і результатів моделей розглянуто в розд. 2, де описано підходи до даунскейлінгу на основі принципів узагальненої крос-ентропії (GCE) [27–29]. Ці підходи надалі розвивають у межах спільного проєкту ПАСА та НАН України «Інтегроване моделювання для надійного управління безпекою та сталим розвитком у взаємозалежних системах «продовольство–енергія–вода–соціум–довкілля» [1–4].

Робастне системне регулювання у дезінтегрованих розподілених системах FEWE, особливо за наявності різних ризиків та невизначеностей, може спиратися на методи оптимізації та зв'язування розподілених моделей, що дають змогу встановлювати взаємозв'язки та «діалог» між окремими моделями систем FEWE для аналізу узгоджених рішень без потреби у розкритті або обміні інформацією про конкретну систему. У розд. 3 розглянуто задачу зв'язування секторальних і/або регіональних моделей лінійного програмування (LP) у міжсекторальну інтегровану модель (IM) за наявності спільних обмежень, коли конфіденційна інформація про секторальні / регіональні моделі недоступна або не може бути надана командами моделювання (секторальними агентствами), тобто за наявності ASI. Підхід зв'язування розподілених моделей, описаний у розд. 3, ґрунтується на паралельному розв'язанні еквівалентної негладкої оптимізаційної моделі за допомогою простої ітераційної процедури стохастичного квазіградієнта (SQG) [8–10] з використанням субградієнтів або узагальнених градієнтів [30, 31], яка збігається до оптимального розв'язку зв'язування, яке максимізує добробут системи, тобто до розв'язку «жорсткої інтегрованої» моделі. Цей підхід не потребує розкриття деталей специфікації моделей. Задачу проілюстровано прикладом зв'язування розподілених моделей виробників, наприклад, електростанцій енергетичного сектору сільськогосподарських підприємств (емітентів або сторін), у модель-прототип робастного ринку торгівлі викидами за наявності ASI [32, 33]. Ця модель торгівлі викидами дає змогу аналізувати робастність політик зниження викидів за наявності ASI та інших численних антропогенних і природних невизначеностей. Модель накладає відповідні обмеження безпеки (екологічної безпеки) для контролю рівня допустимих викидів та їхньої невизначеності, що гарантує економічну ефективність торгів та виконання цілей зі зниження викидів, забезпечуючи стабільність ринку в умовах невизначеності. Висновки та обговорення наведено у відповідному розділі.

1. СИСТЕМНІ РИЗИКИ У ВЗАЄМОПОВ'ЯЗАНИХ СИСТЕМАХ: СПІЛЬНІ ОБМЕЖЕННЯ

Управління системними каскадними ризиками та безпекою FEWE спрямовано на ризики, що виникають (навмисно або ненавмисно) у взаємозалежних системах унаслідок поєднання екзогенних шоків і неузгоджених рішень інтелектуальних агентів. Ці ризики можуть характеризуватися суттєво різними просторово-часовими залежностями, що обмежує можливості традиційних методів кількісного оцінювання ризиків, прогнозування та аналізу політики. Основною проблемою в цьому випадку стає формування запобіжних та адаптивних стратегій реагування, які забезпечують системам достатню гнучкість і робастність для підтримання їхнього стабільного функціонування незалежно від характеру системного шоку [7–9]. Стратегічні запобіжні випереджувальні дії *ex ante* (інженерне проєктування, формування політики, розподіл ресурсів, технологічні інвестиції, резерви води та зерна) та адаптивні коригування *ex post* (маркетинг,

управління запасами, субсидії) здійснюють після отримання спостережень і додаткової інформації щодо невизначених параметрів системи. Випереджувальні та адаптивні заходи дають змогу зменшити напруженість у різних співвідношеннях попиту та пропозиції та знизити ймовірність критичних дисбалансів і перевищення життєво важливих порогових значень, які в іншому разі могли б призвести до системних збоїв і втрати безпеки. Метод двоетапної STO враховує та оптимізує обидва типи взаємозалежних рішень. Прикладами двоетапної STO є інтегроване управління катастрофічними ризиками [14, 34–37], сільськогосподарськими ризиками [11–13, 38–40], енергетичною безпекою [41, 42], а також робастна експлуатація багатоцільових водосховищ [43, 44], аналіз ризиків зміни клімату [45, 46], робастна метамодель машинного навчання для прогнозування та моніторингу врожайності сільськогосподарських культур і вмісту органічного вуглецю в ґрунті за наявності невизначеностей [47] тощо.

Далі сформульовано двоетапну стратегічно-адаптивну великомасштабну багаторегіональну багатосекторну модель із використанням принципів робастності на основі квантилів, як у [1–9, 11–13, 47, 48]. У цій моделі ключові змінні, зокрема витрати, ціни, виробничий портфель, розподіл системних шоків тощо, ендогенно залежать від складних ланцюгів попиту й пропозиції, включених у модель. Системні збурення можуть бути спричинені невизначеністю та ризиками, пов'язаними з різними сценаріями ω потенційних шоків урожайності сільськогосподарських культур.

1.1. Двоетапна модель для двох регіонів: виникнення системних ризиків, схильність до ризиків та їхній розподіл. Перш ніж сформулювати великомасштабну багаторегіональну двоетапну стратегічно-адаптивну модель, скористаємося її версією для двох регіонів, щоб розглянути аспекти потенційних системних дисбалансів, співпраці та розподілу ризиків. Виробничі потужності регіонів визначаються величинами x_i , а c_i — ціна виробництва, $i=1, 2$. Регіональні виробничі технології включають «резервну» технологію y з ціною b , наприклад, для придбання одиниці продукції. Припустимо, що $c_1 < c_2 < b$, тобто виробництво в першому регіоні є найдешевшим. За відсутності невизначеності скорочення виробництва не відбувається, якщо $a_1, a_2 = 1$. Мету регіону за умови відсутності невизначеності можна сформулювати як визначення таких потужностей / технологій x_i , які мінімізують функцію витрат

$$c_1x_1 + c_2x_2 = by \quad (1)$$

таку, що

$$a_1x_1 + a_2x_2 + y = d, \quad (2)$$

тобто потужності x_1, x_2 повинні задовольняти спільне обмеження на попит (2). Задоволення попиту визначає рівень виробничої безпеки. Оптимальний розв'язок цієї детермінованої задачі має вигляд $x_1^* = d, x_2^* = 0, y^* = 0$, тобто у виробництві бере участь лише найефективніший регіон / сектор / вид діяльності.

За наявності невизначеності рівень виробництва (випуску) x_1, x_2 в обох регіонах може скорочуватися (у залежний або незалежний спосіб) під впливом збурень $a_1, a_2, 0 \leq a_i < 1, i=1, 2$, наприклад, неочікуваного зниження урожайності, (не)ефективності, дефіциту ресурсів (біомаси, води, сонячної чи вітрової енергії). Системні дисбаланси (ризик) виникають через спільні обмеження попиту та пропозиції. Аналогічно до розд. 1.2, цей дисбаланс покривається рішенням $y(\omega)$, залежним від сценарію, наприклад, імпортом. Рішення $y(\omega)$ є операційними рішеннями, що характеризуються витратами b . У більш загальних випадках витрати b можуть залежати від сценарію ω та різних ендогенно визначених витрат і цін, як у загальній моделі.

Робастну двоетапну стратегічно-адаптивну задачу сформульовано як задачу мінімізації сумарних очікуваних витрат

$$c_1x_1 + c_2x_2 + bEy(\omega) \quad (3)$$

за обмежень виробничої безпеки

$$a_1(\omega)x_1 + a_2(\omega)x_2 = y(\omega) = d \quad (4)$$

для всіх сценаріїв ω . Якщо пропозиція $a_1(\omega)x_1 + a_2(\omega)x_2$ не покриває попит d , то дефіцит $y(x, \omega) = d - a_1(\omega)x_1 - a_2(\omega)x_2$ можна покрити за рахунок запозичення, імпорту або вилучення із запасів за витрат b , що призводить до виникнення залежностей від траєкторій і взаємодій між стратегічними та адаптивними рішеннями. Задачу (3) за обмежень (4) можна сформулювати як негладку стохастичну мінімаксну задачу: мінімізувати

$$F(x) = c_1x_1 + c_2x_2 + bE \max \{0, d - a_1(\omega)x_1 - a_2(\omega)x_2\},$$

де $bE \max \{0, d - a_1(\omega)x_1 - a_2(\omega)x_2\}$ — очікувані витрати резервного забезпечення, коли попит d перевищує випадкову пропозицію $a_1(\omega)x_1 + a_2(\omega)x_2$.

Робастні стратегічні рішення x_1^* та x_2^* задовольняють квантильно-орієнтовані обмеження ризику, що визначаються невизначеностями $a_1(\omega)$ та $a_2(\omega)$, рішеннями $x = (x_1, x_2)$, вимогами щодо безпеки (4) та функціями витрат. Припустимо, що під ризиком перебуває лише регіон 1, тобто $a_2 = 1$. Регіон 2 є менш ефективним регіоном, $c_1 < c_2$. Однак за наявності збурень $a_i(\omega)$ цей регіон може стати ключовим учасником, який забезпечуватиме виконання вимог щодо безпеки пропозиції (4). Припустимо, що функція $F(x)$ має неперервні похідні. Оптимальні додатні розв'язки $s_1^* > 0$ та $s_2^* > 0$ можна отримати, коли $F_{x_1}(0, 0) = c_1 - bEa_1(\omega) < 0$ та $F_{x_2}(0, 0) = c_2 - b < 0$. Якщо $c_1 - bEa_1(\omega) > 0$, регіон 1 не братиме участі у виробництві. Вимоги безпеки (4) у цьому випадку забезпечуватимуться лише регіоном 2. Обидва регіони залишатимуться активними лише якщо $c_1 - bEa_1(\omega) < 0$, де $Ea_1(\omega)$ визначає очікуване значення $a_1(\omega)$. Слід зазначити, що менш ефективний регіон 2 завжди бере участь у виробництві, оскільки $c_2 - b < 0$. Його рівень виробництва $x_2^* > 0$ визначається ймовірнісним рівнянням

$$Prob(d - a_1(\omega)x_1^* \geq x_2^*) = c_2 / b. \quad (5)$$

Це означає, що оптимальний обсяг виробництва x_2^* безризикового регіону є квантилем імовірнісного розподілу, визначеного шоками $a_1(\omega)$ регіону 1. Стратегічні рішення *ex ante* x^* першого етапу можуть забезпечити управління лише тією частиною ризиків, яка визначається співвідношенням витрат c_2 / b . Управління рештою ризиків, тобто дефіцитом виробництва, мають забезпечити адаптивні рішення *ex post*. Тому безризиковий регіон 2 стає вразливим до системних ризиків, які характеризуються взаємозалежностями між попитом d , шоками $a_i(\omega)$, функціями витрат c_i , імпортними цінами b , робастними рішеннями x_1^* та x_2^* , а також обмеженням щодо безпеки (4). Ці ризики можна регулювати в імовірнісному рівнянні (5) за рахунок коригування параметрів c_1 та c_2 на локальному (регіональному) рівні, а також b та d на глобальному (національному та міжнародному) рівнях. В інженерних, страхових і фінансових застосуваннях рівняння вигляду (5) відомі як обмеження випадковостей (або ймовірнісні обмеження, обмеження безпеки чи надійності або обмеження типу Value-at-Risk (VaR) [10–15, 20, 27–29, 32, 34–48]. Подібні ймовірнісні рівняння розв'язано для управління системними ризиками у великомасштабній багаторегіональній багатосекторній моделі в розд. 1.2.

1.2. Робастне управління системними ризиками у двоетапній стратегічно-адаптивній багаторегіональній багатосекторній моделі землекористування. Співвідношення попиту та пропозиції в багаторегіональній і багатосекторній моделі планування землекористування та сільського господарства описуються значно складнішими взаємозв'язками попиту та пропозиції, ніж у дворегіональній моделі з розд. 1.1. Обмеження щодо продовольчої безпеки вимагають, щоб енергетична

цінність споживаної їжі (у кілокалоріях на душу населення) не була нижчою за мінімальну кількість кілокалорій, потрібну для дотримання норм харчування за зерновими, овочами, м'ясом та молочними продуктами. Обмеження щодо безпеки кормів передбачає, що корми, вироблені для тваринництва із сільськогосподарських культур, трав та побічних продуктів, не можуть бути нижчими за мінімальні енергетичні потреби поголів'я (у мегакалоріях на голову). Цільові показники виробництва біопалива, тобто обмеження щодо енергетичної (біопаливної) безпеки мають виконуватися за рахунок сільськогосподарських культур, лігноцелюлозної біомаси (деревини) та сільськогосподарських відходів, тобто за допомогою спільного обмеження на виробництво біопалива першого та другого покоління.

Цільова функція двоетапної стратегічно-адаптивної багаторегіональної багатосекторної моделі полягає у максимізації очікуваної суми надлишків виробників і споживачів відносно змінних прийняття рішень $(x, y(\omega))$:

$$F(x) = E_{\omega} f(x, y(\omega), \omega) = \int f(x, y(\omega), \omega) P(d\omega) \quad (6)$$

у разі дотримання обмежень продовольчої, енергетичної, водної та екологічної безпеки:

$$g_i(x, y(\omega), \omega) \leq 0, \quad i = \overline{1, m}. \quad (7)$$

Приклади з описом функцій $F(x)$ та g_i наведено у [25, 26]. Невизначеність ω можна представити як скінченний набір імовірнісних сценаріїв $\omega^s, s = \overline{1, S}$, що дає змогу переформулювати модель (6), (7) як задачу максимізації цільової функції

$$\sum_{s=1}^S p_s f(x, y^s, \omega^s) \quad (8)$$

за обмежень

$$g_i(x, y^s, \omega^s) \leq 0, \quad i = \overline{1, m}, \quad s = \overline{1, S}. \quad (9)$$

Сценарії $\omega^1, \omega^2, \dots, \omega^S$ та відповідні ймовірності $p_1, \dots, p_S, \sum_{s=1}^S p_s = 1$, можна отримати на основі історичних спостережень, результатів імітаційних моделей (наприклад, моделі EPIC [47]) та/або експертних оцінок. За відсутності будь-якої інформації ймовірності $p_s, s = \overline{1, S}$, можуть бути розподілені рівномірно з $p_s = 1/S$.

Обмеження (9) можуть виконуватися лише для деяких сценаріїв. Частка сценаріїв, у яких обмеження виконані, визначає так званий рівень системної безпеки. Введемо множину допоміжних рішень $x_{iz} \geq 0$, що задовольняють рівняння

$$g_i(x, y^s, \omega^s) \leq z_{is}. \quad (10)$$

Змінні z_{is} визначають «нестачу» безпеки. Їх можна інтерпретувати як регіональні (та глобальні $\sum z_{is}$) системні дисбаланси (дефіцити, нестачі), які потребують додаткових рішень, що стосуються використання більш ефективних виробничих ланцюгів, технологій виробництва, інвестицій та механізмів страхування. Отже, адаптивні рішення y^s можна розглядати як уже наявні заходи та дії (адаптивні рішення), тоді як рішення z_s визначають «попит» на нові, можливо, ще не існуючі технології та заходи, які необхідно реалізувати для забезпечення бажаного регіонального та глобального рівня системної безпеки.

Враховуючи можливі нові потужності z_s , можна розглянути максимізацію такої функції:

$$\sum_{s=1}^S p_s f(x, y^s, \omega^s) - \sum_{s=1}^S (\pi_s, z_s), \quad (11)$$

за змінними x, y^s та $z_s = (z_{1s}, \dots, z_{ms})$ за умови дотримання обмежень безпеки (10), де $\pi_s = (\pi_{1s}, \dots, \pi_{ms}) \geq 0$ — вектори масштабування або ваги безпеки

ки, що визначають втрати, пов'язані з недостатньою безпекою, штрафи за перевищення порогів тощо; (\cdot, \cdot) — скалярний добуток векторів. Якщо оптимальний розв'язок x^* , y_s^* , z_s^* моделі (10), (11) містить деякі $z_s^* \neq 0$, то рівняння (9) виконуються лише для деяких сценаріїв.

Рівень безпеки моделі (10), (11) можна регулювати параметрами π_s , які визначають втрати або витрати, пов'язані з недотриманням обмежень безпеки (9). Більші значення π_s накладають жорсткіші вимоги до гарантування безпеки. Аналогічно до моделі з розд. 1.1, вимоги безпеки можна вводити у вигляді ймовірнісних обмежень

$$P \{ \omega : q_i(x, y(\omega), \omega) - g_i^* \geq 0 \} \geq \gamma^i, \quad (12)$$

де g_i^* — цільовий рівень показника $q_i(x, y(\omega), \omega)$, наприклад, мінімальні (або рекомендовані) норми продовольства та кормів, а також цільові показники біоенергетики. Параметр γ^i у правій частині задає бажаний рівень безпеки, визначаючи ймовірність виконання обмеження (12). Ймовірнісні обмеження визначають неопуклу та, можливо, сильно розривну оптимізаційну модель, що потребує специфічних методів розв'язання. Тому їх часто замінюють (див., наприклад, [11–14, 31]) такими функціями ризику:

$$E \max \{ 0, g_i(x, y(\omega), \omega) - g_i^* \}, \quad (13)$$

які характеризують нестачу пропозиції (дефіцити). У цьому випадку вектор $z_s = (z_{1s}, \dots, z_{ms})$ в (11) задають в явному вигляді як $s_{is} = \max \{ 0, g_i(x, y^s, \omega^s) - g_i^* \}$, і задачу (10), (11) можна переформулювати у вигляді максимізації

$$\sum_{s=1}^S p_s f(x, y^s, \omega^s) - \sum_{i=1}^m \sum_{s=1}^S p_s \pi_{is} \max \{ 0, g_i(x, y^s, \omega^s) - g_i^* \} \quad (14)$$

або, що еквівалентно, як максимізацію функції (11), тобто

$$\sum_{s=1}^S p_s f(x, y^s, \omega^s) - \sum_{s=1}^S p_s (\pi_s, z_s) \quad (15)$$

за обмежень

$$z_{is} \geq g_i(x, y^s, \omega^s) - g_i^*, \quad z_{is} \geq 0, \quad i = \overline{1, m}, \quad s = \overline{1, S}. \quad (16)$$

Глобальні системні ризики у загальній багаторегіональній багатосекторній моделі пов'язані з порушенням критичних балансів та обмежень безпеки (9), (10), що регулюються вектором z_s та параметром π_s в (11). Випадкова величина $\pi_s z_s^*$ є мірою ризиків порушення обмеження безпеки (9), тоді як випадкова сума $\sum \pi_s z_s^*$ характеризує загальний (глобальний) системний ризик.

Розглянемо загальне формулювання цільової функції (14):

$$F(x) = E \left[f(x, y(\omega), \omega) - \sum_{i=1}^m \pi_i(\omega) \max \{ 0, g_i(x, y(\omega)) - g_i^* \} \right]. \quad (17)$$

Припускаючи, що $F(x)$ має неперервну частинну похідну $F_{x_j}(x^*)$ та використовуючи формули для градієнтів (якщо вони є) стохастичних мінімакських функцій, отримуємо рівняння рівноваги системного ризику: якщо $x_j^* > 0$, то

$$F_{x_j}(x^*) = c_j - \sum_{i=1}^m \pi_i a_{ij} \text{Prob}[g_i(x, y(\omega), \omega) \geq g_i^*] = 0. \quad (18)$$

Отже, глобальні показники системного ризику $\text{Prob}[g_i(x, y(\omega), \omega) \geq g_i^*]$ та відповідну робастну комбінацію стратегічних розв'язків *ex ante* і адаптивних розв'язків *ex post* $(x, y(\omega), z(\omega))$ визначають у результаті розв'язання системи лінійних рівнянь (18) відносно цих показників (аналогічно до дворегіональних ймовірнісних рівнянь (5)).

Отримати ці показники в аналітичний спосіб не можна. Тому багато-регіональну та багатосекторну модель потрібно розв'язувати у числовий спосіб, зокрема отримуючи гістограми глобальних вилучень із запасів $\sum z_{is}$, які хеджують регіональні та глобальні системні ризики за рахунок послаблення жорстких співвідношень попиту та пропозиції в комплексній багаторегіональній багатосекторній моделі, наприклад, у моделі GLOBIOM.

2. ПІДХОДИ ДО ЗМЕНШЕННЯ МАСШТАБУ (DOWNSCALING)

Щоб поглибити розуміння складних систем FEWE, локально-глобальних та глобально-локальних взаємозалежностей, потрібно інтегрувати моделі, що працюють на різних рівнях деталізації, а отже, розробити нові методи системного аналізу для агрегування (upscaling) та дезагрегування (downscaling) даних і результатів моделювання. Для передавання інформації між моделями у межах підходів до зв'язування моделей зазвичай здійснюють зміну масштабу (rescaling), тобто зменшення та збільшення масштабу [27–29].

Хоча на агрегованих рівнях можуть бути наявні розлогі статистичні та сценарні дані, оцінювання неоднорідностей, зумовлених особливостями розміщення регіону, часто пов'язане з дефіцитом даних і внутрішніми невизначеностями моделей складних систем та процесів у разі високого рівня деталізації. У цьому випадку методи downscaling забезпечують інтеграцію «зверху донизу» (top-down) та «знизу догори» (bottom-up) численних взаємозалежних компонент кількох взаємозалежних системи, які відображають локальні економічні, демографічні, екологічні та біофізичні умови відповідно до агрегованих тенденцій, спираючись на відповідні принципи оптимізації, робастні показники та метрики «якості» результатів агрегування та дезагрегування.

Зокрема, процедури downscaling дають змогу розв'язати проблему дефіциту та неповноти даних, а також забезпечують потрібну просторово-часову роздільність та врахування неоднорідності даних щодо сільськогосподарського виробництва.

Сформулюємо та обговоримо загальну задачу зменшення масштабу для дезагрегації загальної площі керованих земель до більш деталізованих локацій, наприклад, до сіток або одиниць моделювання. Більш складні моделі зменшення масштабу описано в [1–3, 27–29]. Оцінку загальної площі керованих земель a_j в локації j , $j = \overline{1, n}$, можна отримати з карт ґрунтового покриття. Виникає питання, як дезагрегувати загальну площу земель a_j у локації j за видами землекористування i , $i = \overline{1, m}$.

Для кожної комірки сітки j можна отримати географічно деталізовану інформацію про біофізичну придатність та продуктивність земель для різних актуальних та потенційно можливих видів землекористування, наприклад з моделі EPIC. Оцінювання придатності забезпечує інформацію про придатність земель та потенційно досяжну врожайність y_{ij} для видів землекористування i , $i = \overline{1, m}$, наприклад, для земель під посіви, пасовищ, лісів тощо у різних локаціях (комірках сітки) j .

Метою моделі зменшення масштабу є знаходження оцінок x_{ij} площі землекористування i у комірці сітки j , що задовольняють такі рівняння балансу:

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = a_j, \quad j = \overline{1, n}; \quad (19)$$

$$\sum_{j=1}^n y_{ij} x_{ij} \leq d_i, \quad i = \overline{1, m}, \quad (20)$$

де рішення x_{ij} та параметри a_j , y_{ij} , d_i є невід'ємними. Рівняння (19) накладає обмеження на загальну площу земель у локації j , тоді як рівняння (20) встановлює обмеження на загальний обсяг виробництва d_i за видом землекористування i відповідно до врожайності y_{ij} .

Агреговані дані або прогнози попиту d_i , наприклад щодо виробництва зерна чи деревини, генеруються глобальною моделлю. Задача зменшення масштабу включає різноманітні обмеження та рівняння балансу типу (19) та (20), отримані на основі експертних оцінок, результатів інших моделей та даних з усіх джерел спостережуваної та неспостережуваної безпосередньо інформації для різних рівнів роздільності.

Обмеження типу (19), (20) можна переписати за допомогою введення нової змінної z_{ij} , яка характеризує частку площі (розподіл) виду землекористування i у комірках сітки j , у такий спосіб:

$$\sum_{i=1}^m z_{ij} = 1, \quad j = \overline{1, n}; \quad (21)$$

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_{ij} \leq d_i, \quad i = \overline{1, m}, \quad (22)$$

де $x_{ij} = a_j z_{ij}$, $a_{ij} = d_i y_{ij}$. Відповідно до цієї модифікації та рівняння (21) змінні z_{ij} можна розглядати як ймовірності, і задача зменшення масштабу за обмежень (19), (20) набуває ймовірнісного характеру.

Може існувати нескінченна кількість допустимих розв'язків z_{ij} , $i = \overline{1, m}$, $j = \overline{1, n}$, що задовольняють рівняння (21), (22). Щоб забезпечити єдиність розв'язку, потрібно використати деякі «апріорні» знання про правдоподібний розподіл невідомих величин z_{ij} , $i = \overline{1, m}$, $j = \overline{1, n}$. Наприклад, початковий апріорний розподіл може враховувати потенціали земель, прибутковість виробництва або максимальну чисту приведену вартість діяльності у локаціях. Апріорний (еталонний) розподіл можна обчислити на основі кліматичних та біофізичних умов у локаціях, попиту та характеристик систем землеробства, а також скористатися наявними картами землекористування. Наприклад, апріорний розподіл $q_{ij} = \frac{a_{ij} P_i y_{ij}}{\sum_i a_{ij} P_i y_{ij}}$, $\sum_j q_{ij} = 1$,

може надати початкову оцінку частки площі виду землекористування i у локації j , де P_i — ціна продукції виду землекористування i , а y_{ij} визначає потенційну врожайність виду землекористування i у локації j . За відсутності додаткової інформації апріорний розподіл навіть може бути найменш інформативним рівномірним розподілом. Додаткові параметри, що визначають апріорні розподіли для конкретної локації, можна визначити, наприклад, за допомогою проксі-показника доступу до ринку a_{ij} для цієї локації, який за відсутності іншої інформації може вимірюватися відстанню до найближчого ринку або до локації з високою концентрацією попиту (населення). Фактор a_{ij} часто застосовують у теорії просторової економіки для розрізнення локацій за «масштабом» їхньої економічної активності. Отже, локації відрізняються одна від одної з погляду їхньої зручності, привабливості (у певному сенсі) для розміщення виробництва або інших видів діяльності, що не можуть бути безпосередньо спостережуваними. Неспостережувані характеристики можна відновити на основі спостережуваних для конкретної локації показників, даних, експертних оцінок та результатів інших моделей. Загалом апріорні розподіли можуть включати релевантні показники та параметри, характерні для конкретної системи. Наприклад, апріорні розподіли, що характеризують інтенсивні сільськогосподарські виробничі системи з високим рівнем використання ресурсів, можна визначати на основі концентрації цін та попиту, тоді як апріорні розподіли для низьковитратного натурального сільського господарства можуть ґрунтуватися на інформації про щільність сільського населення.

Якщо відомий апріорний розподіл $q_{ij} > 0$, $i = \overline{1, m}$, $j = \overline{1, n}$, часток площі для виду землекористування i у комірках сітки j , то розв'язок можна отримати за допомогою мінімізації функції крос-ентропії

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n z_{ij} \ln \frac{z_{ij}}{q_{ij}} \quad (23)$$

за умов (21), (22), що відповідає підходу GCE. Функція (23) визначає важливу міру відстані Кульбака–Лейблера між z_{ij} та q_{ij} . Тому розв’язок з мінімальним значенням функції GCE є найближчим до апріорного розподілу q_{ij} з-поміж усіх розподілів z_{ij} , які задовольняють всі обмеження допустимості (21), (22). Крос-ентропію можна інтерпретувати як штрафну функцію за відхилення між двома розподілами — апріорним (еталонним) розподілом q_{ij} та невідомим розподілом z_{ij} , підпорядкованим рівнянням допустимості (21), (22). Додаткові обмеження допустимості та цільові показники, задані глобальною (оптимізаційною) моделлю, можна включити у задачу зменшення масштабу (21)–(23).

Зазначимо, що хоча задача зменшення масштабу пов’язана з оцінюванням неспостережуваних змінних, наприклад, у разі оцінювання часток землекористування з урахуванням обмежень (21), (22), значення $z_{ij} > 0$, $\sum_{j=1}^n z_{ij} = 1$, можна розглядати як імовірність (ступінь упевненості) того, що одиниця площі пікселя j виділяється під діяльність i . На відміну від цього, у межах стандартної теорії статистичного оцінювання розглядають ситуацію, коли інформацію про невідомий розподіл можна отримати зі спостережень за базовими випадковими величинами. У такому разі найприроднішим принципом вибору оцінки з наявної вибірки спостережень є принцип максимальної правдоподібності (Maximum Likelihood), запропонований Фішером. Задачу зменшення масштабу за наявності невизначеності в апріорних розподілах описано у [27–29].

3. ПРОЦЕДУРИ ЗВ’ЯЗУВАННЯ РОЗПОДІЛЕНИХ МОДЕЛЕЙ

Посилення взаємозалежностей між секторами продовольства, енергії, води та довкілля (FEWE) зумовлює потребу в інтегрованому узгодженому плануванні та координуванні політик для гарантування сталого розвитку та безпеки цих взаємозв’язків. Проте процеси децентралізації та дерегуляції, що тривають в енергетичних, сільськогосподарських та водних системах, сприяють виникненню різномірних незалежних виробників і постачальників (послуг), які ухвалюють рішення щодо своїх виробничих планів та іншої діяльності з огляду на індивідуальні цілі та поточні ринкові умови. За відсутності відповідної координації системи (сектори, регіони) можуть діяти егоїстично у прагненні максимізувати власну цільову функцію. При цьому вони намагаються забезпечити собі якомога більші квоти ресурсів. Цю ситуацію можна змодельовати на основі теорії некооперативної (некоаліційної) гри. Наприклад, ігри зі спільними обмеженнями (social equilibrium games) [49] були сформульовані з урахуванням спільних обмежень. Розв’язок у вигляді узагальненої рівноваги Неша (Generalized Nash Equilibrium, GNE), якщо він існує, розподіляє виробництво та ресурси між системами (секторами / регіонами) з дотриманням спільного обмеження. Проте рішення ухвалюються незалежно і колективні зусилля з управління спільними ресурсами ігноруються. Слід зазначити, що існування, єдиність та стійкість розв’язків GNE, а також реалістична реалізація цієї концепції у великих масштабах не можуть бути гарантовані, як наголошував Гаркер [49]. Понад це, множина розв’язків GNE рідко є зв’язною. Тому повний аналіз рівноваг у цьому випадку є складною задачею і потребує додаткових припущень [50].

Аналіз може додатково ускладнитися, якщо спільні обмеження ґрунтуються на умовах рівноваги (оптимальності), що виникають із задачі, сформульованої у вигляді гри «принципал–агент» або гри Штакельберга «лідер–послідовник» [20]. Наприклад, у разі негладких цільових функцій, які потрібні для зв’язування систем у межах ASI (оптимізації розподілених моделей), використання умов оптимальності потребувало б задання неявних множин узагальнених градієнтів. Через обчислювальну складність часто застосовують евристичні методи, проте для них немає строгого доведення збіжності.

Ю. Ермольєв та Д. фон Вінтерфельдт [20] показують, що складність ігрових підходів зумовлена доволі нереалістичними припущеннями про те, що ко-

жен гравець (сектор / регіон) має знання про точні та єдині реакції інших гравців. Тому навіть у найпростішому лінійному випадку це припущення призводить до надзвичайно складних розривних задач. Більш реалістичні припущення щодо невизначених функцій відгуку в поєднанні з концепцією робастних рішень дають змогу отримати стійкі великомасштабні рішення.

Зв'язування висхідних (bottom-up) моделей математичного програмування енергетичної системи з нисхідною (top-down) моделлю загальної рівноваги всієї економіки розглянуто в роботі Берінгера та Резерфорда [50]. Показано, що формулювання умов ринкової рівноваги за допомогою рівнянь комплементарності дає змогу інтегрувати моделі, проте збіжність ітераційної процедури, що об'єднує моделі, не може бути гарантована. В окремих випадках моделі загальної рівноваги зводяться до задач оптимізації [51].

Є численні роботи, присвячені важливим проблемам та методам оптимізації розподілених систем за спільних обмежень, наприклад, оптимальному керуванню та економічному розподілу навантаження (economic dispatch) в інтелектуальних мережах [51–53], плануванню сільськогосподарського виробництва систем з кількома фермерами [51], оптимізації мереж та задачам оптимального транспортування [54, 55]. Однак у межах цих підходів розглядають оптимізацію сукупної цільової функції, що являє собою суму індивідуальних цільових функцій залучених систем. Отже, припускають, що соціальний планувальник має повну інформацію про ці системи. Задачі формулюють подібно до традиційного інтегрованого «централізованого» оптимізаційного моделювання, в якому об'єднують цілі, обмеження та дані всіх моделей в єдиному програмному коді.

Розглядувана в цій роботі задача є більш складною, оскільки вона пов'язана з координуванням моделей децентралізованих систем за наявності спільних обмежень та ASI. Інтегроване розв'язання окремих LP-моделей в умовах ASI не можна здійснити за допомогою простих методів лінійного програмування. У цьому випадку основою підходу є спеціальна ітераційна процедура негладкої оптимізації, описана у [8, 9] та стисло викладена у розд. 3.1. Пропонований підхід до зв'язування окремих моделей оптимізації за наявності ASI ґрунтується на паралельному розв'язанні еквівалентної негладкої оптимізаційної моделі за допомогою ітераційної процедури SQG з використанням субградієнтів або узагальнених градієнтів [8–10, 31], яка збігається до оптимального розв'язку, що максимізує суспільний добробут, тобто до розв'язку «жорстко інтегрованої» моделі.

Цей підхід не потребує розкриття деталей специфікації моделей. Можна припустити, що є мережа розподілених комп'ютерів, що об'єднує комп'ютерні моделі «соціального планувальника» (осіб, які приймають рішення або регуляторних органів), які прагнуть досягти найкращого результату для всіх залучених секторів / регіонів (сторін).

Процедуру зв'язування можна тлумачити як своєрідну «децентралізовану ринкову систему» (див. наступний розд. 3.1, де розглянуто робастну модель ринку торгівлі викидами). Згідно з цією процедурою сектори / регіони незалежно та паралельно оптимізують свої цільові функції за індивідуальних обмежень, не враховуючи спільні обмеження. Загалом спільні обмеження накладають ліміти на сукупний обсяг виробництва, використання ресурсів та здійснення викидів усіма секторами / регіонами. Ці обмеження можуть встановлювати співвідношення попиту та пропозиції між системами для визначення оптимальних обсягів виробництва, використання ресурсів і квот на викиди для кожної системи. Баланс між сукупним виробництвом енергії (включно з біопаливом) та попитом визначає енергетичну безпеку; обсяги виробництва та споживання сільськогосподарської продукції відображають продовольчу безпеку; сукупні викиди та обмеження щодо забруднення відповідають екологічній безпеці.

Виконання спільних обмежень FEWE формує взаємопов'язаний комплекс безпеки FEWE. Після незалежної оптимізації з використанням початкових наближень різних квот (наприклад, на виробництво, використання ресурсів, викиди), сектори / регіони надають соціальному планувальнику інформацію про фактичні обсяги

виробництва, використання ресурсів та відповідні тіньові ціни. Планувальник перевіряє, чи виконані спільні обмеження. Якщо ні, тобто є «надмірний попит» або «надмірна пропозиція» (інакше кажучи, сукупне використання ресурсів, виробництво, викиди усіма системами є вищими або нижчими від потрібного рівня), планувальник коригує індивідуальні квоти систем, зсуваючи їхні поточні наближення у напрямку, визначеному відповідними двоїстими змінними (dual variables). Отже, тіньові ціни сигналізують системам про необхідність відповідного коригування їхньої діяльності. Детальний опис процедури наведено у [8, 9].

Процедура зв'язування дає змогу уникнути «жорсткого інтегрування» моделей в єдиному кодї, що часто неможливо тому, що системи не бажають ділитися інформацією, або через те, що окремі моделі є надто деталізованими та складними для «жорсткого» об'єднання.

Цей підхід сприяє заощадженню зусиль на перепрограмування та уможливорює паралельні розподілені (децентралізовані) обчислення секторних моделей замість великомасштабної інтегрованої (централізованої) моделі. При цьому оригінальні моделі зберігаються у початковому вигляді для інших варіантів зв'язування. Використання деталізованих секторних та регіональних моделей замість їхніх агрегованих спрощених версій також дає змогу враховувати критично важливі локальні деталі. Подібні комп'ютеризовані децентралізовані «процеси переговорів» між розподіленими моделями (агентами) були розроблені для проектування робастних ринків квот на викиди вуглецю (див. розд. 3.1 та [32]) та для розподілу лімітів водокористування [33].

Процедуру зв'язування можна розглядати як новий алгоритм машинного навчання, а саме як загальну ендогенну задачу навчання з підкріпленням, де програмні агенти (моделі) ухвалюють рішення для максимізації сумарної винагороди (загальної добробуту) [8, 9, 32, 33]. Збіжність запропонованого алгоритму зв'язування за наявності ASI ґрунтується на теорії (неперервної) недиференційовної оптимізації. Детальні відомості щодо теореми збіжності, критерію зупинки, субградієнтів та обчислення проєкцій наведено у [8, 9].

Проїлюструємо задачу зв'язування окремих моделей в інтегровану систему на прикладі моделі, що симулює ринок торгівлі викидами. У торгівлі викидами беруть участь кілька незалежних учасників, тобто емітентів або джерел викидів. Торгівля викидами є економічним інструментом екологічного регулювання. Рівність вартості заходів зі зниження питомих викидів є необхідною умовою для досягнення будь-якого заданого рівня екологічної якості за мінімальних сукупних витрат, відомою як умова економічної ефективності. Відповідно до [32] розглянемо модель, яка включає невизначеність та регулювання з урахуванням ризиків у схемі торгівлі викидами. Модель досліджує умови стійкості ринку до невизначеностей, накладаючи відповідні обмеження безпеки для контролю рівня допустимої невизначеності, що гарантує економічну ефективність торговельних угод та реалізацію цілей зі скорочення викидів (наприклад, цілей з виконання зобов'язань після Кіотського протоколу). Цей тип обмежень безпеки є характерним для контролю забруднення, фінансових застосувань, регулювання стабільності в галузі страхування та управління катастрофічними ризиками.

Ключова складність пов'язана з асиметричною інформацією щодо функції витрат сторін, тобто сторони можуть не бажати розкривати інформацію про свої витрати на скорочення викидів, а також про внутрішні невизначеності та заходи з їхнього зменшення. Загальну модель розділено на дві взаємозалежні підзадачі.

Оскільки сторони можуть не хотіти розкривати інформацію про свої витрати та невизначеності, вони розв'язують індивідуальні підзадачі.

3.1. Модель сторони. Позначимо $f_i(y_i)$ мінімальні витрати сторони i на виконання встановлених цілей за заданих дозволів y_i та цільового рівня викидів K_i . Позначимо варіабельність заявлених викидів x_i як випадкову величину $\xi_i(x_i, \omega_i)$, де ω_i —

вектор усіх невизначеностей (сценаріїв), що впливають на викиди сторони i . У загальному випадку випадкова величина $\xi_i(x_i, \omega_i)$ залежить від заявлених викидів x_i . Невизначеність ξ_i можна зменшити за рахунок інвестицій у системи моніторингу. Для цього введемо змінну u_i , пов'язану з моніторингом та іншими технологіями, які можуть контролювати варіабельність викидів у межах бажаного рівня безпеки Q_i .

Тепер індивідуальну задачу оптимізації можна записати як мінімізацію функції $f_i(y_i)$, яка визначається як мінімум очікуваних витрат $c_i(x_i, \omega_i)$ на скорочення викидів з урахуванням ризику та витрат на зменшення невизначеності $d_i(x_i, \omega_i)$ для відповідного дозволу на викиди y_i :

$$f_i(y_i) = \min_{x_i, u_i} E[c_i(x_i, \omega) + d_i(u_i, \omega)], \quad (24)$$

за таких квантильних обмежень екологічної безпеки:

$$P[x_i + \xi_i(x_i, \omega) \leq K_i + y_i] \geq Q_i \quad (25)$$

для всіх сторін i . Тут Q_i — рівень безпеки, який гарантує ймовірність того, що всі потенційні викиди x_i та невизначеності $\xi_i(x_i, \omega_i)$ не перевищать цільовий рівень викидів K_i , скоригований на дозволи (квоти) y_i . Рівень безпеки Q_i встановлює контрольний орган для забезпечення робастного функціонування ринку. Невизначеності функцій витрат c_i та d_i можуть виникати через ринкову динаміку, виробничі шоки та технологічні невизначеності, які невідомі заздалегідь.

Обмеження безпеки (25) можна також записати у наведеній нижче формі, яка у разі розподілів, що визначаються аналітично, зводиться до детермінованих нелінійних обмежень. Визначимо квантиль $z_i(x_i)$ як мінімальне z таке, що

$$P[\xi_i(x_i, \omega_i) \leq z] \geq Q_i.$$

Тоді обмеження безпеки (25) можна замінити на еквівалентні обмеження:

$$x_i + u_i \leq K_i + y_i, \quad u_i \leq z_i(x_i). \quad (26)$$

Ці рівняння показують, що заявлені викиди повинні залишатися нижчими за цільові рівні K_i , скориговані з урахуванням невизначеності викидів u_i та дозволів y_i . Обмеження безпеки (26) задають верхні межі $z_i(x)$, пов'язані з ризиком, для інтервалів невизначеності, що залежать від рівня заявлених викидів x_i . Отже, це дає змогу вводити управління ризиками через недовиконання цільових показників щодо викидів, що визначається «критичним» квантилем $z_i(x_i)$.

Функції $f_i(y_i)$ визначають витрати на дозволи y_i для сторін $i = 1, \dots, n_i$. Основна проблема пов'язана з економічно ефективним розподілом дозволів (квот) y_i за наявності асиметричної інформації про функції витрат $f_i(y_i)$, тобто із розв'язанням наведеної нижче задачі.

3.2. Модель соціального планувальника. Соціальний планувальник (орган з охорони довкілля) повинен визначити вектор дозволів на викиди $y = (y_1, \dots, y_n)$ або розподіл дозволів між сторонами, що мінімізує сукупні або суспільні витрати:

$$F(y) = \sum_{i=1}^n f_i(y_i) \quad (27)$$

за умови

$$\sum_{i=1}^n y_i = 0. \quad (28)$$

Це означає, що сукупний обсяг дозволів, які розподіляють, залишається таким самим, як і в початковому стані, тобто

$$\sum_{i=1}^n (K_i + y_i) = \sum_{i=1}^n K_i.$$

Зауваження 1 (ринкова рівновага). Припустимо, що $f_i(y_i)$ — неперервно диференційовна та строго опукла функція. Тоді з умови мінімізації лагранжіана

$\sum_{i=1}^n f_i(y_i) + \lambda \sum_{i=1}^n y_i$ торговельна рівновага визначається як вектор $y = (y_1, \dots, \dots, y_n)$, що задовольняє такі рівняння:

$$f'_i(y_i) = -\lambda, \quad \lambda \sum_{i=1}^n y_i = 0. \quad (29)$$

З умови (29) випливає, що маржинальна вартість дозволу в рівновазі дорівнює λ , яка є однаковою для всіх сторін. На відміну від стандартних моделей оптимізації, умови оптимальності (29) не можна використати безпосередньо, оскільки сторони не розкривають конфіденційну інформацію про свої функції f_i .

3.3. Двосторонні переговори. Модель (27), (28) є стандартною задачею оптимізації, яку соціальний планувальник міг би легко розв'язати за наявності конфіденційної інформації сторін про функції витрат та невизначеності. Відсутність такої інформації потребує розроблення особливих децентралізованих процедур оптимізації, які можна тлумачити як процеси торгівлі викидами. Пропоновані процедури нагадують процес двосторонніх переговорів, коли будь-які дві сторони обмінюються дозволами на викиди у взаємовигідний спосіб. Тут надано лише стислий опис цієї процедури.

Нехай $y^k = (y_1^k, \dots, y_n^k)$ — вектор дозволів на викиди після k торгів. Розглянемо дві сторони i та j на кроці k з дозволами y_i^k та y_j^k . Відповідно до (29), якщо будь-які дві сторони i та j мають різні маржинальні витрати $f'_i(y_i^k) \neq f'_j(y_j^k)$, то вектор дозволів $y^k = (y_1^k, \dots, y_n^k)$ є неефективним за витратами. Припустимо, що $f'_i(y_i^k) - f'_j(y_j^k) < 0$. Обмеження (28) вимагає, щоб допустимий обмін дозволами не змінював сукупний обсяг їхнього розподілу, тобто він має бути таким, що $y_i^{k+1} + y_j^{k+1} = y_i^k + y_j^k$. Якщо прийняти $y_i^{k+1} = y_i^k + \Delta_k$ та $y_j^{k+1} = y_j^k - \Delta_k$, $\Delta_k > 0$, то новий допустимий вектор дозволів y^{k+1} для відповідного Δ_k скорочує сумарні витрати сторін $f_i(y_i^k) + f_j(y_j^k)$, а отже, і сумарні витрати $F(y^k)$, оскільки

$$\begin{aligned} F(y^{k+1}) - F(y^k) &= f_i(y_i^{k+1}) + f_j(y_j^{k+1}) - f_i(y_i^k) - f_j(y_j^k) = \\ &= \Delta_k (f'_i(y_i^k) - f'_j(y_j^k)) + o(\Delta_k) < 0 \end{aligned} \quad (30)$$

для малих Δ_k . Із цього рівняння видно, що двостороння торгівля сприяє скороченню агрегованих витрат для джерел i та j . Із (30) для малих Δ_k також маємо

$$f_i(y_i^{k+1}) - f_i(y_i^k) < f_j(y_j^k) - f_j(y_j^{k+1}), \quad (31)$$

тобто новий розподіл дозволів зменшує витрати сторони j до більшої міри, ніж збільшує витрати сторони i . Як наслідок, сторона j може компенсувати збільшені витрати сторони i у взаємовигідний спосіб.

Сформулюємо схему торгів більш точно. Припустимо, що після вибору (наприклад, у випадковий спосіб) пари сторін i, j ці сторони можуть знайти значення y_i^{k+1}, y_j^{k+1} , мінімізуючи

$$f_i(y_i) + f_j(y_j) \quad (32)$$

за обмежень

$$y_i + y_j = y_i^k + y_j^k, \quad y_i \geq 0, \quad y_j \geq 0. \quad (33)$$

Інакше кажучи, для неперервно диференційовних функцій $f_i(y_i), f_j(y_j)$ сторона j , яка зменшує свій дозвіл на викиди на величину $\Delta_k > 0$, може домовитися зі стороною i про такий рівень Δ_k , який вирівнює маржинальні витрати,

тобто, $f'_i(y_i^k - \Delta_k) = f'_j(y_j^k + \Delta_k) = \lambda_k$, де λ_k можна інтерпретувати як рівноважну ціну на кроці k . Зауважимо, що процес формування ціни λ_k визначається ендогенно за рішеннями сторін, які мінімізують витрати, що принципово відрізняється від стандартних моделей фінансових ринків, де процеси формування ціни задається екзогенно.

Після знаходження λ_k процедуру повторюють з іншою парою і т. д. Послідовні двосторонні торги можуть тривати доти, доки є принаймні дві сторони з різними маржинальними витратами. Двосторонній обмін дозволами на кожному кроці k вирівнює маржинальні витрати, що визначають проміжну «локальну» рівноважну ціну λ_k . Під час цього процесу маржинальні витрати та ціни можуть бути різними для послідовних торгів, проте зрештою торговельна система збігається до рівноваги $y^* = (y_1^*, \dots, y_n^*)$, λ^* , за якої маржинальні витрати всіх сторін дорівнюють рівноважній ціні, як у (29). Доведення збіжності наведено зокрема у [32]. У розд. 3.4 показано, що процедура двосторонньої торгівлі дає змогу досягти так званого core-розв'язку (core solution), за якого сторони не мають стимулів до торгівлі лише в межах меншої за кількістю сторін групи.

3.4. Комп'ютеризована багатоагентна торговельна система: обговорення. Сучасні обчислювальні технології дають змогу організувати децентралізовану систему SOMATS на основі моделей (24)–(28) та процедури двосторонньої торгівлі, описаної в розд. 3.3. Розподілена комп'ютерна мережа з'єднує комп'ютери сторін із комп'ютером центрального агентства. Використовуючи графічний інтерфейс користувача, сторони зберігають конфіденційну інформацію про свої функції витрат та інші характеристики моделі, задані рівняннями (24)–(28), зокрема конкретні ймовірнісні розподіли та генератори сценаріїв, що описують невизначеності викидів та інших параметрів.

Центральне агентство встановлює ринкові регуляторні вимоги у вигляді обмежень безпеки за екологічними цілями. Дотримуючись процедури з розд. 3.3, комп'ютер центрального агентства у випадковий спосіб вибирає пару сторін i, j та в анонімному режимі «веде переговори» з комп'ютерами сторін і визначає Δ_k та вектор y^k , розв'язуючи задачу (32). Далі вибирається інша пара сторін, і переговори повторюються. Такі обчислення легко організувати без розкриття конфіденційної інформації сторін, зокрема завдяки розподілу даних сторін між різними комп'ютерами. Процес триває доти, доки не буде досягнуто рівноваги (λ^*, y^*) . Отриманий рівноважний розв'язок можна проаналізувати та реалізувати на практиці за допомогою схем перерозподілу. Отже, на першому етапі SOMATS оцінює рівноважні ціни та дозволи, тоді як на другому етапі реалізуються рівноважні товарні дозволи y^* . Інформація про рівноважну ціну λ^* також дає змогу ідентифікувати core-розв'язок (див., наприклад [32]), який визначає стійку коаліцію сторін. Це означає, що жодна сторона не має стимулів виходити з коаліції або припиняти участь на будь-якому проміжному кроці.

ВИСНОВКИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

У цій статті представлено низку сучасних методів системного аналізу, моделей та інструментів моделювання, що розробляються в Міжнародному інституті прикладного системного аналізу, Лаксенбург, Австрія (IIASA), а також у межах спільного проєкту НАН України та IIASA «Інтегроване моделювання для робастного управління безпекою та сталим розвитком у взаємозалежних системах «продовольство–енергія–вода–соціум–довкілля» [1–4] (<https://iiasa.ac.at/projects/integrated-modeling-for-robust-management-of-food-energy-water-land-use-nexus-security-and>).

Розглянуто виникнення системних ризиків у взаємозалежних системах FEWE та потребу в розробленні узгоджених двоетапних рішень (двох типів: ex-ante та ex-post) для управління цими ризиками. Рішення цих двох типів можна отримати за допомогою двоетапних підходів STO.

На прикладі багаторегіональної багатосекторної моделі показано, в який спосіб двоетапна STO-схема ухвалення рішень (випереджальна (anticipative) та адаптивна (adaptive)), уведена в цій моделі, дає змогу здійснювати аналіз та управління системними ризиками, що виникають унаслідок системних взаємозалежностей, спільних ресурсних обмежень та обмежень безпеки в системі FEWE.

Задачу зміни масштабу (down-scaling та up-scaling) даних і результатів моделей розглянуто на основі принципів узагальненої крос-ентропії. Основною метою методів дезагрегування та агрегування є скорочення просторово-часової невідповідності між сценаріями, результатами застосування моделей, наявними даними, рішеннями та масштабами, необхідними для аналізу політик та їхньої практичної реалізації. Невідповідність масштабів є суттєвим джерелом невизначеностей, що зумовлює потребу у визначенні відповідних індикаторів, нових метрик невизначеності та ризику, а також критеріїв якості для процедур дезагрегування та агрегування. Ключовою проблемою є врахування невизначеностей в апіорних даних та параметрах наявних обмежень. Підходи до дезагрегування за наявності невизначених апіорних даних описано в [27–29] більш детально. Ці методи й надалі розвивають в ПАСА та в межах спільного проєкту НАНУ–ПАСА.

Методи оптимізації та зв'язування розподілених моделей дають змогу встановлювати взаємозв'язки та організувати діалог між окремими моделями систем FEWE для аналізу узгоджених рішень без потреби в обміні (або розкритті) специфічної для систем інформації, тобто в умовах ASI. Проблему проілюстровано прикладом зв'язування моделей окремих виробників, які здійснюють викиди ПГ, (емітентів або сторін) у прототип моделі ринку торгівлі викидами, коли інформація про сторони може бути недоступною, а спільні обмеження безпеки за викидами (за умов невизначеності індивідуальних викидів сторін) мають бути дотримані. Стохастична модель торгівлі викидами дає змогу аналізувати робастність політики скорочення викидів за наявності асиметричної інформації, а також інших численних антропогенних і природних невизначеностей. Запропоновану багатоагентну інтегровану стохастичну модель торгівлі / обміну квотами на викиди можна встановити на індивідуальних комп'ютерах сторін. Модель знаходить розв'язок у децентралізованій формі, не розкриваючи інформацію окремих сторін.

Описані в роботі методи та інструменти спрямовані на розроблення та впровадження сучасних підходів системного аналізу й інтегрованого моделювання, які забезпечують спільне планування секторів FEWE за наявності асиметричної інформації та невизначеностей щодо секторальних моделей. Детальну інформацію про методи, моделі та підходи зі спільного проєкту ПАСА та НАНУ щодо гарантування безпеки систем FEWE викладено в [1–15]. У межах методів і моделей особливу увагу потрібно приділяти коректному просторово деталізованому представленню системи та врахуванню невизначеностей, оскільки зв'язування моделей у поєднанні з процесами дерегуляції, що тривають, може породжувати взаємозалежні колективні системні ризики із серйозними наслідками. Моделювання зв'язків в явному вигляді дає змогу виявляти та враховувати такі «невідчутні» (insensible) ризики, які залишаються поза увагою в разі стандартного незалежного планування за секторами. Отже, запропоновані моделі та методи спрямовані на системний аналіз безпеки систем FEWE за наявності екзогенних ризиків, а також ризиків, на які (навмисно або ненавмисно) впливають рішення різних агентів. Ці методи та інструменти ґрунтуються на концепції робастності та робастних рішень, які в певному сенсі є оптимальними для будь-якого сценарію можливих невизначеностей [20, 48].

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Zagorodny A., Bogdanov V., Zaporozhets A., Ermolieva T. (Eds.) Nexus of sustainability: Understanding FEWE systems II. SSSC. 2026. Vol 627. Cham: Springer, 2025. XVII, 656 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-032-03616-2>.

2. Zagorodny A.G., Bogdanov V.L., Ermolieva T., Komendantova N., Havlik P. Integrated solutions to food-energy-water-environmental NEXUS security modelling and management: robust downscaling and models' linkage procedures. In: Zagorodny A.G., Bogdanov V.L., Zaporozhets A.O., Ermolieva T.Y. (Eds.). *Nexus of Sustainability: Understanding of FEWSE Systems II*. 2026. P. 1–37. URL: <https://link.springer.com/book/9783032036155>.
3. Zagorodny A., Bogdanov V., Ermolieva T., Komendantova N. Modeling for managing food-energy-water-social-environmental — NEXUS SECURITY: Novel systems' analysis approaches. In: *Nexus of Sustainability. Understanding of FEWSE Systems I*. Zagorodny A., Bogdanov V., Zaporozhets A. (Eds.). *SSDC*. 2024. Vol 559. Cham: Springer, 2024. P. 1–32. https://doi.org/10.1007/978-3-031-66764-0_1.
4. Zagorodny A.G., Ermoliev Y., Bogdanov V.L., Kostyuchenko Y.V., Ermolieva T. Integrated robust management of food-energy-water-land use nexus for sustainable development. In: *Integrated Modeling and Management of Food-Energy-Water NEXUS for Sustainable Development*. Zagorodny A.G., Ermoliev Yu.M., Bogdanov V.L., Ermolieva T. (Eds.). Kyiv: Committee for Systems Analysis at Presidium of NASU — NMO of Ukraine in IIASA, 2020. P. 237–249. URL: <https://pure.iiasa.ac.at/16715>.
5. Zagorodny A.G., Ermoliev Yu.M., Bogdanov V.L., Ermolieva T. (Eds.). *Integrated modeling and management of Food-Energy-Water NEXUS for sustainable development*. Kyiv: Committee for Systems Analysis at Presidium of NASU — NMO of Ukraine at IIASA, 2020. 446 p. URL: <https://pure.iiasa.ac.at/16674>.
6. Zagorodny A.G., Ermoliev Y.M., Bogdanov V.L. (Eds.). *Integrated modeling and management of Food-Energy-Water NEXUS for sustainable development*. Kyiv, Ukraine: National Academy of Sciences of Ukraine, 2014.
7. Zagorodny A.G., Ermoliev Y. (Eds.). *Integrated modeling of food, energy and water security management for sustainable social, economic and environmental developments*. Kyiv: National Academy of Sciences of Ukraine, 2013. 354 p. URL: <https://pure.iiasa.ac.at/10607>.
8. Ermoliev Y., Zagorodny A.G., Bogdanov V.L., et al. Linking distributed optimization models for food, water, and energy security nexus management. *Sustainability*. 2022. Vol. 14, N 3. Article number 1255. <https://doi.org/10.3390/su14031255>.
9. Ermoliev Y., Zagorodny A.G., Bogdanov V.L., et al. Robust food–energy–water–environmental security management: Stochastic quasigradient procedure for linkage of distributed optimization models under asymmetric information and uncertainty. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2022. Vol. 58, N 1. P. 45–57. <https://doi.org/10.1007/s10559-022-00434-5>.
10. Ermolieva T., Ermoliev Y., Zagorodny A., et al. Artificial intelligence, machine learning, and intelligent decision support systems: Iterative “learning” SQG-based procedures for distributed models' linkage. *Artificial Intelligence Journal*. 2022. N 27 (2). P. 92–97. <https://doi.org/10.15407/jai2022.02.092>.
11. Ermolieva T., Havlik P., Frank S., et al. A risk-informed decision-making framework for climate change adaptation through robust land use and irrigation planning. *Sustainability*. 2022. Vol. 14, Iss. 3. Article number 1430. <https://doi.org/10.3390/su14031430>.
12. Ermolieva T., Havlik P., Ermoliev Y., Khabarov N., Obersteiner M. Robust management of systemic risks and food-water-energy-environmental security: Two-stage strategic-adaptive GLOBIOM model. *Sustainability*. 2021. Vol. 13, Iss. 2. Article number 857. <https://doi.org/10.3390/su13020857>.
13. Ermolieva T., Havlik P., Ermoliev Y., et al. Integrated management of land use systems under systemic risks and security targets: a stochastic Global Biosphere Management Model. *Journal of Agricultural Economics*. 2016. Vol. 67, Iss. 3. P. 584–601. <https://doi.org/10.1111/1477-9552.12173>.
14. Ermolieva T., Ermoliev Y., Komendantova N., et al. Linking catastrophe modeling and stochastic optimization techniques for integrated catastrophe risk analysis and management. In: *Modern optimization methods for decision making under risk and uncertainty*. Gaivoronski A., Knopov P., Zaslavskiy V. (Eds.). Boca Raton: Taylor & Francis, 2023. P. 15–50. <https://doi.org/10.1201/9781003260196-2>.
15. Ermoliev Y., Komendantova N., Ermolieva T. Energy production and storage investments and operation planning involving variable renewable energy sources. A two-stage stochastic optimization model with rolling time horizon and random stopping time. In: *Modern Optimization Methods for Decision Making Under Risk and Uncertainty*. Gaivoronski A., Knopov P., Zaslavskiy V. (Eds.). Taylor & Francis, 2023. P. 15–50. <https://doi.org/10.1201/9781003260196-13>.
16. Rome Declaration on World Food Security. World Food Summit Plan of Action. World Food Summit (13–17 November 1996, Rome, Italy). URL: <https://www.fao.org/4/w3613e/w3613e00.htm>.

17. FAO. The state of food insecurity in the world. Report of Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome. 2009. URL: <https://openknowledge.fao.org/items/fdc944c1-1c6e-426a-8f8d-27847d779b4c>.
18. Grey D., Sadoff C.W. Sink or swim? Water security for growth and development. *Water Policy*. Vol. 9, Iss. 6. P. 545–571. <https://doi.org/10.2166/wp.2007.021>.
19. The secretary-general's advisory group on energy and climate change (AGECC). Summary Report and Recommendations. New York, 28 April 2010. 26 p. URL: www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/publications/AGECCsummaryreport.pdf.
20. Ermoliev Y., von Winterfeldt D. Systemic risk and security management. In: *Managing Safety of Heterogeneous Systems*. Ermoliev Y., Makowski M., Marti K. (Eds.). LNE. Vol. 658. Berlin; Heidelberg: Springer, 2012. P. 19–49. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-22884-1_2.
21. Carter N.T. Energy's water demand: Trends, vulnerabilities, and management. CRS (Congressional Research Service) Report for Congress, 7-5700, R41507. Washington D.C.: Library of Congress. Congressional Research Service, 2010. 36 p. URL: <https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc31387/>.
22. Ahmadi E., McLellan B., Ogata S., Mohammadi-Ivatloo B., Tezuka T. An integrated planning framework for sustainable water and energy supply. *Sustainability*. 2020. Vol. 12, Iss. 10. Article number 4295. <https://doi.org/10.3390/su12104295>.
23. Baffes J., Dennis A.C.K. Long term drivers of food prices. Policy research working paper. N WPS 6455. Washington, DC: World Bank, 2013. 37 p. URL: <https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/832971468150565490>.
24. Taghizadeh-Hesary F., Rasoulinezhad E., Yoshino N. Energy and food security: Linkages through price volatility. *Energy Policy*. 2019. Vol. 128. P. 796–806. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.12.043>.
25. van Eyden R., Difeto M., Gupta R., Wohar M.E. Oil price volatility and economic growth: Evidence from advanced economies using more than a century's data. *Appl. Energy*. 2019. Vol. 233–234. P. 612–621. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.10.049>.
26. Grafton R.Q., McLindin M., Hussey K., et al. Responding to global challenges in food, energy, environment and water: Risks and options assessment for decision-making. *Asia & the Pacific Policy Studies*. 2016. Vol. 3, Iss. 2. P. 275–299. <https://doi.org/10.1002/app5.128>.
27. Ermolieva T., Havlik P., Mosnier A., et al. Dynamic linkage of global and local land use models using robust cross-entropy based downscaling procedure under uncertainties in priors. In: *Integrated Modeling and Management of Food-Energy-Water NEXUS for Sustainable Development*. Zagorodny A.G., Ermoliev Yu.M., Bogdanov V.L., Ermolieva T. (Eds.). Kyiv: Committee for Systems Analysis at Presidium of NAS of Ukraine — NMO of Ukraine in IIASA, 2020. P. 179–195. URL: <https://pure.iiasa.ac.at/16718>.
28. Ermolieva T., Ermoliev Y., Havlik P., et al. Dynamic merge of the global and local models for sustainable land use planning with regard for global projections from GLOBIOM and local technical-economic feasibility and resource constraints. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2017. Vol. 53, N 2. P. 176–185. <https://doi.org/10.1007/s10559-017-9917-7>.
29. Ermoliev Y., Ermolieva T., Havlik P., et al. Robust downscaling approaches to disaggregation of data and projections under uncertainties: Case of land use and land use change systems. *Cybernetics and Systems analysis*. 2017. Vol. 53, N 1. P. 26–33. <https://doi.org/10.1007/s10559-017-9904-z>.
30. Ermoliev Y. Two-stage stochastic programming: Quasigradient method. In: *Encyclopedia of Optimization*. Floudas C., Pardalos P. (Eds.). Boston, MA: Springer, 2008. P. 3955–3959. https://doi.org/10.1007/978-0-387-74759-0_690.
31. Ermoliev Y., Wets R.J.-B. Numerical techniques for stochastic optimization. Heidelberg: Springer Verlag, 1988. 571 p.
32. Ermoliev Y., Ermolieva T., Jonas M., et al. Integrated model for robust emission trading under uncertainties: Cost-effectiveness and environmental safety. *Technological Forecasting and Social Change*. 2015. Vol. 98. P. 234–244. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2015.01.003>.
33. Ermoliev Y., Michalevich M., Uteuliev N.U. Economic modeling of international water use (The case of the Aral sea basin). *Cybernetics and Systems Analysis*. 1994. Vol. 30, N 4. P. 523–527. <https://doi.org/10.1007/BF02366562>.
34. Ermolieva T., Filatova T., Ermoliev Y., et al. Flood catastrophe model for designing optimal flood insurance program: Estimating location-specific premiums in the Netherlands. *Risk Analysis*. 2016. Vol. 37, Iss. 1. P. 82–98. <https://doi.org/10.1111/risa.12589>.

35. Ermoliev Y., Ermolieva T., Fischer G., et al. Discounting, catastrophic risks management and vulnerability modeling. *Mathematics and Computers in Simulation*. 2008. Vol. 79, Iss. 4. P. 917–924. <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2008.02.004>.
36. Ermolieva T., Ermoliev Y., Fischer G., Galambos I. The role of financial instruments in integrated catastrophic flood management. *Multinational Finance Journal*. 2003. Vol. 7, N 3–4. P. 207–230, URL: <https://ssrn.com/abstract=2627554>.
37. Amendola A., Ermolieva T., Linnerooth-Bayer J., Mechler R. (Eds.). Integrated catastrophe risk modeling: Supporting policy processes. Dordrecht: Springer, 2013. X, 290 p. URL: <http://link.springer.com/book/10.1007/978-94-007-2226-2>.
38. Borodina O., Borodina E., Ermolieva T., et al. Sustainable agriculture, food security, and socio-economic risks in Ukraine. In: Managing safety of heterogeneous systems. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems. Ermoliev Y., Makowski M., Marti K. (Eds.). Berlin; Heidelberg: Springer, 2012. *LNE*. Vol. 658. P. 169–185, https://doi.org/10.1007/978-3-642-22884-1_8.
39. Borodina O., Kyrzyziuk S., Fraier O., et al. Mathematical modeling of agricultural crop diversification in Ukraine: Scientific approaches and empirical results. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2020. Vol. 56, N 2. P. 213–222. <https://doi.org/10.1007/s10559-020-00237-6>.
40. Fischer G., Ermolieva T., Ermoliev Y., Sun L. Risk-adjusted approaches for planning sustainable agricultural development. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. 2009. Vol. 23, N 4. P. 441–450. <https://doi.org/10.1007/s00477-008-0231-9>.
41. Ermoliev Y., Komendantova N., Ermolieva T. Strategic DSS for robust energy production and storage investments and operation planning involving variable renewable energy sources: A two-stage stochastic optimization models with stopping time and rolling horizon. *Proc. Mathematical Modeling, Optimization and Information Technologies (International Scientific Conference)* (Chişinău, Moldova, 2021). P. 57–59. URL: <https://pure.iiasa.ac.at/18428/>.
42. Cano E.L., Moguerza J.M., Ermolieva T., Ermoliev Y. Energy efficiency and risk management in public buildings: Strategic model for robust planning. *Computational Management Science*. 2014. Vol. 11, N 1–2. P. 25–44. URL: <http://hdl.handle.net/10.1007/s10287-013-0177-3>.
43. Ortiz-Partida J.P., Kahil T., Ermolieva T., et al. A two-stage stochastic optimization for robust operation of multipurpose reservoirs. *Water Resources Management*. 2019. Vol. 33, N 11. P. 3815–3830. <https://doi.org/10.1007/s11269-019-02337-1>.
44. Ermoliev Y., Ermolieva T., Kahil T., et al. Stochastic optimization models for risk-based reservoir management. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2019. Vol. 55, N 1. P. 55–64. <https://doi.org/10.1007/s10559-019-00112-z>.
45. O'Neill, B., Ermoliev, Y., Ermolieva, T. Endogenous risks and learning in climate change decision analysis. In: Coping with Uncertainty. Berlin; Heidelberg: Springer, 2006. *LNE*. Vol. 581. P. 271–284. https://doi.org/10.1007/3-540-35262-7_16.
46. Ermolieva T., Obersteiner M. Global change, catastrophic risks and sustained economic growth: Model-based analysis. IIASA Interim Report. IIASA, Laxenburg, Austria: IR-05-014. 2005. URL: <https://pure.iiasa.ac.at/7821>.
47. Ermolieva T., Ermoliev Y., Havlik P., et al. Connections between robust statistical estimation, robust decision making with two-stage stochastic optimization, and robust machine learning problems. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2023. Vol. 59, N 3. P. 33–47. <https://doi.org/10.1007/s10559-023-00573-3>.
48. Ermoliev Y., Hordijk L. Facets of robust decisions. In: Coping with Uncertainty: Modeling and Policy Issue. Marti K., Ermoliev Y., Makowski M., Pug G. (Eds.). *LNE*. Vol. 581. Berlin: Springer-Verlag, 2006. P. 3–28. URL: <https://pure.iiasa.ac.at/7958>.
49. Harker P.T. Generalized Nash games and quasi-variational inequalities. *European Journal of Operational Research*. 1991. Vol. 54, Iss. 1. P. 81–94. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(91\)90325-P](https://doi.org/10.1016/0377-2217(91)90325-P).
50. Böhringer C., Rutherford T.F. Integrated assessment of energy policies: Decomposing top-down and bottom-up. *Journal of Economic Dynamics and Control*. 2009. Vol. 33, Iss. 9. P. 1648–1661, <https://doi.org/10.1016/j.jedc.2008.12.007>.
51. Alemany M.M.E., Esteso A., Ortiz A., del Pino M. Centralized and distributed optimization models for the multi-farmer crop planning problem under uncertainty: Application to a fresh tomato Argentinean supply chain case study. *Computers and Industrial Engineering*. 2021. Vol. 153. Article number 107048. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.107048>.
52. Yang T., Yi X., Wu J., et al. A survey of distributed optimization. *Annual Reviews in Control*. 2019. Vol. 47. P. 278–305. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2019.05.006>.
53. Prakash R., Nygard K.E. Distributed linear programming models in a smart grid. Cham: Springer, 2017. XXV, 213 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-52617-1>.

54. Liang S., Wang L., Yin, G. Distributed smooth convex optimization with coupled constraints. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2020. Vol. 65, N 1. P. 347–353. <https://doi.org/10.1109/TAC.2019.2912494>.
55. Hughes J., Chen J. Fair and distributed dynamic optimal transport for resource allocation over networks. arXiv:2103.16618v1 [math.OC] 30 Mar 2021. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2103.16618>.

**A. Zagorodny, V. Bogdanov, H. J. Schellhuber,
T. Ermolieva, P. Havlik, N. Komendantova**

ROBUST DOWNSCALING AND MODELS' LINKAGE PROCEDURES FOR INTEGRATED MODELING AND MANAGEMENT OF SYSTEMIC RISKS, RESILIENCE, AND FOOD-ENERGY-WATER-ENVIRONMENTAL NEXUS SECURITY

Abstract. The paper makes a short overview of advanced systems analysis methods, models and modeling tools being developed at IIASA (International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria) and within NASU (National Academy of Sciences, Ukraine) and IIASA joint project “Integrated modeling for robust management of food–energy–water–social–environmental nexus security and sustainable development”. Emerging systemic risks in interdependent Food–Energy–Water–Environment (FEWE) systems can be managed through a two-stage coherent decision-making framework: ex-ante (anticipatory) and ex-post (adaptive), using integrated models to balance proactive risk reduction (e.g., resilient infrastructure, diversified resources) with reactive crisis response (e.g., emergency planning, technological and financial backstops) for increased resilience, as highlighted by IIASA and NASU joint research. This approach, using two-stage stochastic optimization, aims for robust management by keeping options open while preparing for inevitable uncertainties in these complex, interconnected systems, notes researchers in papers like those from Springer Nature book on FEWE nexus security [1-2]. Truly integrated modeling often requires rescaling (down- and up-scaling) of models' data and results. The mismatch of scales creates a major source of uncertainties, which calls for the identification of proper indicators, new measures of uncertainties and risks, and goodness criteria for disaggregation and aggregation. To represent information in locations, the procedures rely on an appropriate optimization principle, e.g., generalized cross-entropy maximization, and combine the available samples of real observations in the locations with other “prior” hard and soft data (expert opinion, scenarios), pseudo-sampling models, evidences on the related variables that exist in the form of equations and constraints. A key issue is treatment of uncertainties in priors and parameters of available constraints. Approaches to down-scaling in the presence of uncertain priors are outlined. The approaches are being further developed at IIASA and the NASU-IIASA joint project. Distributed models' optimization and linkage methods enable to establish relationships and dialogues between separate models of FEWE systems for the analysis of coordinated solutions without requiring to share or reveal systems-specific information, i.e., under asymmetric information (ASI). The problem is illustrated with an example of linking models of individual producers emitting GHGs (emitting entities or parties) into a prototype model of an emission trading market when information about parties may not be available and joint safety constraints on emissions (when individual parties' emissions are uncertain) have to be fulfilled. The outlined methods and tools pursue the goal to develop and implement advanced systems analysis and integrated modeling approaches allowing coherent planning of FEWE systems under joint constraints, asymmetric information and uncertainties about the sectoral models. Explicit modeling of linkages allows evaluation and treatment of such risks under standard independent planning of sectors. Therefore, the models and methods aim for systems analysis of FEWE nexus security under exogenous risks and risks affected (intentionally and unintentionally) by decisions of various agents. The methods and tools involve the concept of robustness and robust solutions, which are, in a sense, optimal for any scenario of potential uncertainties.

Keywords: FEWE nexus security, endogenous systemic risks, inherent anticipating ex-ante and operational ex-post decisions, two-stage STO, safety constraints, robust down- and up-scaling, uncertain prior information, distributed models linkage, asymmetric information, nonsmooth optimization, stochastic quasigradient procedures, integrated modeling and planning of distributed systems.

*Надійшла до редакції 10.01.2026
Затверджена до друку 20.01.2026*