

УДК 339.564:330.46:519.86:005.52

JEL F13, F14, C61, C63, L52, Q56

DOI <https://doi.org/10.32782/2786-765X/2026-12-22>**Пузраков А.В.**

аспірант,

Національний університет «Львівська політехніка»

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5129-0234>

МОДЕЛЮВАННЯ СТРАТЕГІЧНИХ НАПРЯМКІВ РАЦІОНАЛІЗАЦІЇ ТОВАРНОЇ СТРУКТУРИ ЕКСПОРТУ УКРАЇНИ НА РИНКИ ЄС В УМОВАХ ГЛОБАЛЬНИХ ВИКЛИКІВ

Проведене моделювання раціоналізації товарної структури експорту України до ЄС сформувало інтегральну аналітичну рамку, у якій поєднано структурні, інституційні, логістичні, технологічні, екологічні та цінові критерії з урахуванням динаміки, мережевої логістики та ризиків. Доведено, що оптимізація експортної структури в напрямі продукції з вищою доданою вартістю досягається через посилення інституційної відповідності вимогам ЄС, розвиток мультимодальної інфраструктури, цифровізацію збуту та впровадження «зелених» виробничих практик. Обґрунтовано, що поєднання інвестицій у логістику й цифровий документообіг знижує витрати та волатильність потоків, тоді як дотримання технічних і екологічних стандартів ЄС розширює простір прийнятних рішень і підвищує стійкість експорту до цінових шоків. Використання робастної оптимізації зі CVaR стабілізує валютні надходження та унеможливує компенсацію системних слабкостей окремими перевагами. У підсумку сформовано практично реалізований план раціоналізації експорту, що підвищує конкурентоспроможність українських товарів на ринку ЄС, зміцнює стійкість до зовнішніх шоків і створює кількісно верифіковану основу для стратегічного управління зовнішньоторговельною політикою.

Ключові слова: товарна структура, експорт, глобальні виклики, конкурентоспроможність економіки, управління зовнішньоторговельною політикою.

Постановка проблеми. Післявоєнне відновлення та інтеграція України до європейського економічного простору потребують науково обґрунтованої раціоналізації товарної структури експорту до ЄС. Існуюча експортна модель залишається вразливою до геополітичних і логістичних збоїв, регуляторних бар'єрів ЄС (стандартизація, сертифікація, СВAM), технологічних розривів, «зелених» вимог та цінової волатильності. Водночас у практиці стратегічного планування бракує інтегрованого інструментарію, який би одночасно: пов'язував структурні зрушення в експортному кошику з інституційною конвергенцією, логістичною спроможністю, цифровізацією та декарбонізацією; враховував динаміку та обмеження потужностей/квот; забезпечував робастність рішень до сценаріїв цін, попиту та логістичних порушень. Це формує наукову проблему побудови динамічної багатокритеріальної моделі, здатної генерувати відтворювані траєкторії політики та структури експорту з вимірюваними критеріями ефективності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У дослідженні раціоналізації та структурної трансформації експорту, зокрема в контексті підвищення доданої вартості, економічної складності та стійкості до зовнішніх загроз,

вагоме теоретичне й емпіричне підґрунтя формують праці, присвячені взаємозв'язку між товарною структурою торгівлі, економічним зростанням, мережевими ефектами та інституційними чинниками міжнародної інтеграції. Серед ключових науковців, які зробили визначальний внесок у розвиток теорії та методології аналізу структури експорту і її впливу на економічну динаміку, доцільно відзначити Baxter M., Kouparitsas M. A. [1], Lederman D., Maloney W. F. [2], Hausmann R., Hwang J., Rodrik D. [3], Hesse H. [4], Barigozzi M., Fagiolo G., Garlaschelli D. [5], Hidalgo C. A., Hausmann R. [6], Basu S. R. [7], Hausmann R., Hidalgo C. A. [8], Shi P., Zhang J., Yang B., Luo J. [9]. Відповідно до аналізу їх праць, ми робимо висновок, що структура експорту є не лише відображенням наявних виробничих можливостей, а й активним чинником довгострокової конкурентоспроможності, стійкості та економічного зростання. Сучасні підходи, які поєднують теорію економічної складності, мережевий аналіз міжнародної торгівлі та інституційні аспекти інтеграції, формують наукове підґрунтя для розробки моделей раціоналізації товарної структури експорту України до ЄС, орієнтованих на зростання частки продукції з високою доданою вартістю, зниження вразливості до зовнішніх шоків

і забезпечення стійкого розвитку у повоєнний період.

Мета статті: розробити й обґрунтувати інтегровану динамічну модель стратегічного керування раціоналізацією товарної структури експорту України до ЄС у повоєнний період, що базується на системі нормованих критеріїв ефективності та їх індексах.

Виклад основного матеріалу дослідження. Стратегічне моделювання раціоналізації ґрунтується на системі критеріїв ефективності та їх формальних індексах [3]. Позначимо плановий горизонт післявоєнного відновлення як $t = T_0, \dots, T$, і використовуємо оцінені за 2020–2024 рр. базові рівні індикаторів як початкові умови. Сукупну мету політики описує інтегральна функція корисності товарного профілю експорту до ЄС

$$\max_{\{s_{c,t}, u_t\}} \sum_{t=T_0}^T \left[\gamma_1 E_t + \gamma_2 E_t^{inst} + \gamma_3 E_t^{geo-log} + \gamma_4 E_t^{soc-tech} + \gamma_5 E_t^{eco} + \gamma_6 E_t^{mp} \right], \quad (1)$$

де E_t – економіко-структурний індекс, E_t^{inst} – інституційно-інтеграційний, $E_t^{geo-log}$ – геополітично-логістичний, $E_t^{soc-tech}$ – соціально-технологічний, E_t^{eco} – екологічно-кліматичний, E_t^{mp} – ринково-ціновий; ваги γ_i задаються пріоритетами політики або оцінюються з факторної моделі за вашою процедурою PCA → регресія.

Рішення приймаються щодо векторів часток $s_{c,t}$ у структурі експорту та керуючих змінних політики u_t , які впливають на динаміку індексів.

Керуючі змінні охоплюють інституційні зусилля з імплементації DCFTA та стандартів, логістичні інвестиції за каналами $m \in \{\text{море, Дунай, залізниця, авто}\}$, цифровізацію збуту і виробництва, програми «зеленого» переходу й переробки, а також інструменти ринкової диверсифікації.

Економіко-структурний ефект відображається у зростанні диверсифікації D_t та частки продукції з доданою вартістю V_t за одночасного зниження сировинної залежності R_t . Інституційний прогрес акумулюється в J_t через нормовані частки виконання DCFTA та стандартизації. Геополітично-логістична стійкість моделюється індексами $W_y, B_y, D_y, R_y, C_y, A_y$. Соціально-технологічна готовність визначається V_t, S_t, Z_t, A_t, P_t «штрафом» за R_t . Екологічна відповідність і декарбонізація агрегуються в E_t^{eco} через $G_t, CI_t, R_t, ZP_t, S_t$. Ринкова стійкість кодується E_t^{mp} через стабільність виручки S_t , диверсифікацію цінкових кластерів $D_t^{(cl)}$, некорельованість U_t зниження експозицій $E_t^{(p)}, E_t^{(d)}$ та портфельного бета $\beta_t^{(G)}$ (міри чутливості

результату портфеля до рухів еталонного індексу).

Еволюцію структури експорту моделюємо як керований марковський перерозподіл часток між товарними групами

$$s_{c,t+1} = s_{c,t} + \sum_{\hat{c} \rightarrow c} \pi_{\hat{c} \rightarrow c,t} s_{\hat{c},t} - \sum_{\hat{c} \leftarrow c} \pi_{c \rightarrow \hat{c},t} s_{c,t}, \quad (2)$$

де швидкості переходів π є функціями інвестицій у переробку та інновації з урахуванням обмежень потужностей і сертифікаційної готовності. Інституційні, логістичні, цифрові та «зелені» індекси мають логістичну динаміку з спадною віддачею

$$\begin{aligned} J_{t+1} &= J_t + \phi_{inst} u_t^{inst} (1 - J_t), \\ A_{t+1} &= A_t + \phi_{cert} u_t^{cert} (1 - A_t) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} Z_{t+1} &= Z_t + \phi_{dig} u_t^{dig} (1 - Z_t), \\ K_{m,t+1} &= K_{m,t} + \phi_m u_{m,t}^{log} \end{aligned} \quad (4)$$

$$W_{t+1} = \min \left\{ 1, \bar{Q}_{t+1} (K_{\cdot,t+1}) / Q^* \right\}, \quad (5)$$

де $K_{m,t}$ – пропускна спроможність каналу, а \bar{Q}_{t+1} – очікуваний середньомісячний потік.

Зменшення вуглецевої інтенсивності та розширення «зеленого» кошика моделюються через

$$CI_{t+1} = CI_t - \Psi_{ener} u_t^{RE} - \Psi_{proc} u_t^{proc} \quad (6)$$

$$G_{t+1} = G_t - \Psi_{org} u_t^{org} - \Psi_{eco} u_t^{eco} \quad (7)$$

що відображає вплив енергоефективності, відновлюваної енергії, сертифікації та екодизайну на відповідні показники.

Політичні та ринкові обмеження формують область припустимих рішень. Для товарних часток виконується $\sum_c s_{c,t} = 1$ та $s_{c,t} \geq 0$ з верхніми межами за тарифними квотами і корпоративними потужностями $s_{c,t} \leq \bar{s}_{c,t}^{kvota}$. Для логістики діють обмеження пропускної здатності $\sum_c q_{c,t} \leq \sum_m K_{m,t}$, для регуляторної відповідності – пороги $R_t \geq \bar{R}$ та обмеження СВМ у вуглецеємних сегментах через $CI_t \leq CI_t^{\max}$. Бюджетна умова задається у вигляді $\sum_i k_i u_{i,t} \leq B_t$, де k_i – одинична вартість інструмента, B_t – річний ресурс. Стійкість до цінкових шоків реалізується як робастна вимога $\min_{\omega \in \Omega} E_t^{mp}(\omega) \geq \underline{E}^{mp}$ для множини сценаріїв Ω з різною траєкторією $P_{c,p}, D_{c,t}$.

Стратегічні напрями випливають із умов оптимальності цієї постановки:

- перша вісь стосується структурного зміщення у бік продукції з доданою вартістю, коли рішення щодо $\pi_{c \rightarrow \hat{c},t}$ забезпечують монотонне зростання V_t і зниження R_t під гарантії стабільності індекса S_t та порогів \underline{V} і \bar{R} ;

• друга вісь полягає в прискоренні інституційної конвергенції через u_t^{inst} , що підвищує J_t і зменшує трансакційні витрати, а відтак підсилює структурні критерії через C_t і частку ЄС у виторзі;

• третя вісь зорієнтована на розбудову мультиканальної логістики, де зростання $K_{m,t}$ для Дунаю, залізниці та автошляхів підвищує W_y, D_y, R_y, C_y і зменшує варіабельність B_y (статистичну мінливість логістичних показників у часі чи між маршрутами, яку можна оцінити дисперсією, стандартним відхиленням або коефіцієнтом варіації, і яка відображає непередбачувані коливання обсягів та часу доставки). Це знижує ризик розривів поставок і підвищує інтегральний $E_t^{geo-log}$;

• четверта вісь концентрується на цифровій трансформації збуту й управління, коли інвестиції u_t^{dig} і u_t^{crm} підвищують Z_t і сприяють зростанню V_t через швидший вихід перероблених товарів на Європейські канали;

• п'ята вісь відповідає «зеленому» переходу та декарбонізації, що підвищує G_t, R_t і CI_t у складі E_t^{eco} , водночас знижуючи ринкові бар'єри у чутливих сегментах;

• шоста вісь стосується керування ринковою експозицією – перерозподіл між цінними кластерами, формування низькокорельованого портфеля U_t та обмеження $|\beta^{(s)}|$ через структуру $s_{c,t}$ і форвардні політики забезпечує стійкість E_t^{mp} у несприятливих сценаріях.

Алгоритм впровадження включає калібрування ваг у середині кожного критерію на основі факторних внесків і регресійних зв'язків, нормування індикаторів за період 2020–2024 рр., оцінювання початкового рівня $E_t, E_t^{inst}, E_t^{geo-log}, E_t^{soc-tech}, E_t^{eco}, E_t^{mp}$ на T_0 , побудову сценаріїв зовнішніх цін та попиту ЄС, а також розв'язання задачі у скаляризованій формі з коваріаційними штрафами (додаткові нарахування у цільовій функції за високу співваріацію потоків і виручки, які зменшують привабливість рішень із підвищеною нестабільністю) на нестабільність потоків. Зміна часток реалізується через послідовні плани переходу між групами з урахуванням обмежень потужностей, сертифікаційних і логістичних лагів (часові затримки на отримання відповідних сертифікатів, проходження процедур та розгортання перевезень, що обмежують швидкість зміни структури експорту за конкретний період), що визначають максимально допустимі $\pi_{c,t}$ за рік.

Очікуваний результат моделі полягає у траєкторіях $s_{c,t}$ та u_t , які забезпечують зростання інтегральної корисності і виконання порогів за кожним критерієм. Структурно це означає підвищення частки перероблених категорій

і машинобудування за стабілізації машинного сегмента, формування стійкої багатоканальної логістики з акцентом на дунайсько-залізничному плечі, досягнення високих рівнів цифрової готовності та відповідності «зеленим» вимогам ЄС, а також зниження чутливості до глобальних цінних коливань через диверсифікацію цінних кластерів і контроль портфельної експозиції. Усі рішення і траєкторії відтворюваними, оскільки кожен критерій має чітко визначені індикатори та залежності, що дозволяє будувати прозорі плани переходу й моніторингу у повоєнному періоді [5].

Інтегральна функція корисності у побудованій моделі виконує роль скаляризації багатовимірної задачі, де кожен критерій ефективності подано у нормованій шкалі [0; 1] і виступає станозалежним аргументом загальної цільової функції. Базова форма

$$U_t = \gamma_1 E_t + \gamma_2 E_t^{inst} + \gamma_3 E_t^{geo-log} + \gamma_4 E_t^{soc-tech} + \gamma_5 E_t^{eco} + \gamma_6 E_t^{mp} \quad (8)$$

є монотонно зростаючою за кожним аргументом і зручна для обчислень, хоча реальна взаємодія блоків відбувається не лише через адитивну суму, а й через множину ендогенних зв'язків між підіндикаторами та обмеженнями. Коректність порівняння забезпечує попереднє нормування всіх індексів на основі даних 2020–2024 рр., що усуває масштабні ефекти й дозволяє інтерпретувати ваги γ_i як відносні пріоритети політики. У межах цієї конструкції кожен критерій виконує подвійну функцію: безпосередньо впливає на корисність та змінює геометрію допустимої множини рішень через обмеження й технологічні зв'язки.

Економіко-структурний індекс E_t узалежнений від часток товарних груп $s_{c,t}$ через диверсифікацію, глибину переробки та сировинну залежність. Будь-який крок політики, що змінює вектор $s_{c,t}$, одночасно впливає на інші критерії, бо саме структура експорту проходить крізь регуляторні вимоги ЄС, логістичні канали, цифрові практики та «зелені» рамки. У похідних $\partial U_t / \partial s_{c,t}$ з'являється сума граничних ефектів

$$\sum_i \gamma_i \partial E_t^{(i)} / \partial s_{c,t} \quad (9)$$

де кожний доданок відбиває, як перерозподіл товарного кошика змінює інституційну відповідність, логістичну стійкість, цифрову готовність, екологічну якість і ринкову експозицію. Така конструкція робить структуру експорту центральним механізмом передавання впливу між критеріями.

Інституційно-інтеграційний індекс E_t^{inst} поєднує частку експорту до ЄС, прогрес DCFTA і гармонізацію стандартів. Його зростання розширює допустиму область вибору $s_{c,t}$, оскільки вищі рівні відповідності знижують трансакційні та нетарифні бар'єри, збільшують квотні стелі та прискорюють проходження сертифікацій. Це означає зсув обмежень з типу $s_{c,t} \leq \bar{s}_{c,t}^{kroma} i r_{c,t} \leq \bar{r}_{c,t}$ на вищі рівні, що підвищує верхні межі для товарів з високою доданою вартістю та експортної складності. Виникає позитивний кросефект $\partial E_t / \partial E_t^{inst} > 0$ через збільшення досяжних V_t і диверсифікації, а також опосередкований вплив на $E_t^{soc-tech}$ та E_t^{eco} , бо узгодженість із технічними регламентами прискорює цифровий документообіг, SE-маркування і впровадження «зелених» норм.

Геополітично-логістичний індекс $E_t^{geo-log}$ відображає пропускну спроможність, безперервність постачань, диверсифікацію маршрутів, наявність альтернативних плечей і логістичні витрати. Його зростання зменшує дисперсію фізичних потоків і скорочує час доставки, що прямо поліпшує стабільність валютного виторгу S_t складі E_t^{mp} . На рівні функціональних залежностей це відповідає позитивному зв'язку $\partial E_t^{mp} / \partial E_t^{geo-log} > 0$ через приріст індикаторів W_y, V_y, C_y . Логістичні інвестиції одночасно підвищують досяжні значення структурних індикаторів, бо розширення дунайсько-залізничного плеча дає змогу збалансувати кошик на користь перероблених і швидкопсувних товарів, для яких час і надійність доставки критичні. У градієнті корисності це проявляється через збільшення $\partial E_t / \partial K_{m,t}$ і зниження штрафів у ринковому блоці на варіабельність та напівдисперсію спадів.

Соціально-технологічний індекс $E_t^{soc-tech}$ агрегує частку доданої вартості, технологічну витонченість кошика, цифрову інтенсивність збуту й інноваційну готовність до сертифікацій. Його зростання змінює віддачу від структурних зрушень, оскільки цифрові канали та CRM/ERP зменшують трансакційні витрати і прискорюють доступ до покупців ЄС, а впроваджені стандарти управління якістю полегшують проходження технічного нагляду [6; 9]. За цією логікою з'являється додатний вплив на E_t через підвищення V_t та на E_t^{inst} через прискорення відповідності, а також на E_t^{eco} через технології енергоефективності й контроль ланцюга постачання. Векторна еластичність $\nabla_{U_t}^{dig} U_t$ отримує вагомий внесок від усіх блоків, бо цифровізація є мультиплікатором для перероблених товарів, логістики й екологічної звітності.

Екологічно-кліматичний індекс E_t^{eco} включає «зелену» частку кошика, інверсію вуглецевої інтенсивності (перетворення показника викидів на одиницю продукції у зручну для порівняння шкалу, де менші викиди відповідають вищій оцінці сталості, що полегшує встановлення порогів і відстеження прогресу), регуляторну відповідність СВAM/SPS/Ecodesign та поширення «зелених» практик виробництва. Його зростання зменшує ризики доступу до ринку та потенційні цінові дисконти, що підвищує стійкість виторгу й покращує ринковий індекс E_t^{mp} . Формально $\partial E_t^{mp} / \partial E_t^{eco} > 0$ через зниження модулю портфельного бета $|\beta^{(G)}|$ та цінових експозицій у чутливих сегментах. Одночасно E_t^{eco} збільшує допустимі межі для часток у високододаній переробці завдяки виконанню екодизайну та маркування, що покращує потенціал E_t і посилює інституційний блок.

Ринково-ціновий індекс E_t^{mp} підсумковим виміром здатності структури зменшувати уразливість до зовнішніх шоків через стабільність виторгу, диверсифікацію цінових кластерів, некорельованість циклів і низьку експозицію до глобальних індексів. Його значення відгукується на зміни у трьох інших блоках:

- підвищення $E_t^{geo-log}$ зменшує волатильність поставок;
- підвищення $E_t^{soc-tech}$ збільшує частку перероблених товарів із більш стабільними цінами й контрактами;
- підвищення E_t^{eco} зменшує регуляторні ризики і цінові знижки. На аналітичному рівні це можна представити як залежність

$$E_t^{mp} = \Phi(E_t^{geo-log}, E_t^{soc-tech}, E_t^{eco}; s_{c,t}) \quad (10)$$

з додатними частковими похідними за кожним із аргументів.

Залишається питання компенсаційності критеріїв. Чиста адитивна форма допускає обмін між блоками, що не завжди бажано, коли необхідне досягнення мінімальних стандартів у кожному вимірі [7]. Для контролю компенсаційності доцільно використовувати змішану агрегаторну конструкцію з помірною мультиплікативністю та взаємодіями:

$$U_t = \sum_i \gamma_i E_t^{(i)} + \frac{1}{2} \sum_{i=j} k_{ij} E_t^{(i)} E_t^{(j)} \quad (11)$$

або геометричну складову

$$G_t = \prod_i (E_t^{(i)})^{\mu_i} \quad (12)$$

з невеликими μ_i . Додатні коефіцієнти k_{ij} слугують для фіксації синергій, насамперед між E_t^{inst} та $E_t^{soc-tech}$, між $E_t^{geo-log}$ та E_t^{mp} , між E_t^{eco}

та E_t^{inst} . Геометрична складова запобігає ситуації, коли високі значення одного блоку маскують провали в іншому, бо низький індекс будь-якого критерію знижує добуток і відповідно інтегральний результат.

Взаємозв'язок критеріїв проявляється і в динаміці. Інституційний прогрес має логістичну траєкторію з убутною граничною віддачею, що передається на темпи зростання цифрового й «зеленого» блоків через прискорення сертифікацій і спрощення процедур. Логістичні інвестиції збільшують пропускну спроможність і скорочують час доставки, що підвищує досяжні рівні структурних і соціально-технологічних індикаторів для товарів, чутливих до швидкості [8]. Екологічні інвестиції зменшують вуглецеву інтенсивність і підвищують «зелену» частку кошика, що знижує ризики CSAM і стабілізує цінову експозицію. Ефект накопичення відображається у системі перехідних рівнянь стану, де кожен критерій впливає на параметри інших блоків і змінює градієнт оптимального перерозподілу товарних часток.

Ваги γ_i задають стратегічний профіль і можуть бути сталими або часозмінними. Емпірично їх зручно калібрувати на основі факторних внесків, що отримані з вашої схеми «РСА \rightarrow регресія», аби зменшити колінеарність і уникнути подвійного рахунку. Для тестування стійкості політики можна застосувати робастну постановку з вимогами до мінімальних порогів кожного індексу $E_t^{(i)} \geq \underline{E}^{(i)}$, що гарантує незамінність критичних блоків, а також з коваріаційними штрафами на надмірну волатильність результатів.

У підсумку інтегральна функція корисності не є простою сумою незалежних оцінок. Вона відтворює сітку причинно-наслідкових зв'язків, у якій інституційна інтеграція розширює простір допустимих структурних рішень, логістична стійкість забезпечує реалізацію цих рішень у фізичних потоках, цифрово-інноваційні практики підвищують віддачу від переробки, екологічна відповідність зменшує регуляторні та цінові ризики, а ринковий блок узагальнює результат у координатах стабільності валютного виторгу [5; 8]. Така взаємопов'язаність дозволяє проектувати політику як узгоджену систему втручань, де кожен критерій одночасно є окремою ціллю і каналом передавання впливу на решту складових інтегральної ефективності.

Запропонована модель будується як ієрархічна динамічна система у просторі станів із мішаною частотою даних, режимними зламами, мережевою логістичною підмоделлю

та робастною цільовою функцією. Усі блоки спираються на критерії ефективності та їх математичні представлення, розгорнуті вище: економіко-структурний E_t , інституційно-інтеграційний E_t^{inst} , геополітично-логістичний $E_t^{geo-log}$, соціально-технологічний $E_t^{soc-tech}$, екологічно-кліматичний E_t^{eco} , ринково-ціновий E_t^{mp} . Усі індекси нормовані до $[0; 1]$ у базовому періоді 2020–2024 рр.

1. Простір рішень і керуючих змінних. Вектори річних часток експорту за товарними групами HS позначимо

$$s_t = (s_{c,t})_{c \in C} \quad (13)$$

де $\sum_c s_{c,t} = 1, s_{c,t} \geq 0$.

Вектор політичних інструментів $u_t = (u_t^{inst}, u_t^{dig}, u_t^{cert}, u_t^{RE}, u_t^{proc}, u_t^{log})$ впливає на інституційну конвергенцію, цифровізацію, сертифікацію, енергоефективність, переробку та логістичні потужності каналів $m \in \{\text{море, Дунай, залізниця, авто}\}$.

2. Латентні стани та їх структура. Головний вектор станів:

$$X_t = (E_t, E_t^{inst}, E_t^{geo-log}, E_t^{soc-tech}, E_t^{eco}, E_t^{mp})^T \in [0, 1]^6, \quad (14)$$

Для кожного критерію існує підвектор підіндикаторів, що вже визначено раніше. Для зручності позначимо зведено:

$$\theta_t^{(E)} = (D_t, V_t, R_t, \dots), \quad (15)$$

$$\theta_t^{(inst)} = (q_t^{EU}, q_t^{DCFTA}, q_t^{STD}, q_t^{CERT}, q_t^{CUST}, \dots)$$

$$\theta_t^{(geo)} = (W_t, B_t, D_t^{route}, R_t^{route}, C_t, A_t, \dots) \quad (16)$$

$$\theta_t^{(soc)} = (\tilde{V}_t, \tilde{S}_t, Z_t, A_t^{cert}, P_t, \tilde{R}_t, \dots) \quad (17)$$

$$\theta_t^{(eco)} = (\tilde{G}_t, \tilde{CI}_t, \tilde{R}_t^{reg}, \tilde{ZP}_t, S_t^{eco}, \dots) \quad (18)$$

$$\theta_t^{(mp)} = (S_t^{rev}, D_t^{(cl)}, U_t, \tilde{E}_t^{(p)}, \tilde{E}_t^{(d)}, \tilde{\beta}_t^{(G)}, \dots) \quad (19)$$

Зв'язок індексів із підіндикаторами подано раніше у вигляді лінійно-адитивних або адитивно-мультиплікативних агрегаторів; у компактній формі:

$$E_t^{(k)} = A_k \left(\theta_t^{(k); (k)} \right), \quad (20)$$

$$k \in \{E, inst, geo, soc, eco, mp\}$$

3. Динаміка станів з режимами. Нехай $z_t \in \{0, 1\}$ – режимний маркер («стрес/відновлення») із матрицею переходів $\Pi = [\pi_{ij}]$. Еволюція індексів описується локально-

лінійною моделлю стан-простір з убутною віддачею:

$$X_{t+1} = \sigma(A_{z_t} X_t + B_{z_t} u_t + G_{z_t}) \quad (21)$$

де $\sigma(\cdot)$ діє поелементно і відображає $(0,1), \eta_t \sim N(0, \sum_{z_t})$. Матриці A_{z_t}, B_{z_t} , дозволяють часово-змінні еластичності та взаємодії, зокрема підсилення зв'язку $E_t^{geo-log} \rightarrow E_t^{mp}$ у стресовому режимі. Ендогенна динаміка часток експорту:

$$s_{c,t+1} = s_{c,t} + \sum_{\acute{c}=c} \pi_{\acute{c} \rightarrow c,t} s_{\acute{c},t} - \sum_{\acute{c}=c} \pi_{c \rightarrow \acute{c},t} s_{c,t} \quad (22)$$

$$\pi_{\acute{c} \rightarrow c,t} = \phi(u_p, X_t)$$

де $\phi_{cc}(\cdot)$ зростає з інвестиціями у переробку, цифровізацію, сертифікацію та логістику і зменшується зі зростанням витрат коригування.

4. Вимірювальна підсистема з мішаною частотою. Вектор спостережень y_t включає річну статистику торгівлі, сертифікацій (дані про наявність і дійсність відповідностей вимогам ЄС: ISO 9001/22000, НАССР, СЕ-маркування, органічні сертифікати, екодекларації, звітність СВМ) і ІКТ (індикатори використання інформаційно-комунікаційних технологій підприємствами: е-комерція, EDI, ERP/CRM, хмарні сервіси, е-документообіг і цифрові паспорти продукції), а також місячні/квартальні ряди логістики та світових цін. Модель спостереження:

$$y_t = H(X_t \theta_t) + \varepsilon_t, \varepsilon_t \sim N(0, R) \quad (23)$$

де θ_t містить під індикатори, що є функціями s_p , потоків і зовнішніх сигналів. Для агрегування місячних логістичних потоків $\{Q_t\}_{\tau \in t}$ у річні індикатори (W_t, B_t, \dots) використано MIDAS-ядра $w(\cdot)$ (вагові функції, що агрегують високочастотні дані (місячні/квартальні) у низькочастотні ряди (річні) для спільного оцінювання в одній моделі):

$$\bar{Q}_t = \sum_{\tau \in t} w(\tau; \Psi) Q_\tau, \sum_{\tau \in t} w(\tau; \Psi) = 1 \quad (24)$$

Оцінювання латентних станів доцільно здійснювати фільтром Калмана. Застосування фільтра Калмана виправдане тим, що модель стан-простір із шумами вимірювань потребує оптимального згладжування та поєднання показників різної частоти, а за помірної нелінійності розширений або несцентований фільтр Калмана дає стійкі оцінки у реальному часі [1]. За виразної нелінійності та наявності режимного компонента z_t доцільно використовувати фільтр частинок із перемиканням

режимів, який коректно відтворює багатомодальні розподіли станів.

5. Логістично-мережева під модель. Транспортна мережа $G = (N, A)$ з ребрами $a \in A$ і пропускними здатностями $K_{a,t}$. Потоки $f_{a,t}$ мінімізують зважені час і вартість із урахуванням місткості:

$$\min_{\{f_{a,t}\}} \sum_{a \in A} (\tau_{a,t} + k_{a,t}) f_{a,t} \quad (25)$$

за умов $Bf_t = d_t(s_t), 0 \leq f_{a,t} \leq K_{a,t}$

Пропускні здатності еволюціонують під дією інвестицій:

$$K_{a,t+1} = K_{a,t} + \varphi_a u_{a,t}^{log} - \delta_a K_{a,t} \quad (26)$$

Зведені показники $(W_t, B_t, D_t^{route}, R_t^{route}, C_t, A_t)$ можна обчислити з оптимальних $f_{a,t}$ і є компонентою $E_t^{geo-log}$.

6. Регуляторно-екологічні та виробничі обмеження. Квоти та технічні рамки ЄС:

$$0 \leq s_{c,t} \leq \bar{s}_{c,t}^{ksova}, R_t^{red} \geq \underline{R}, CI_t \leq CI_t^{max} \quad (27)$$

у вуглецевих групах.

Бюджет політики:

$$\sum_j k_j u_{j,t} \leq B_t, u_{j,t} \geq 0. \quad (28)$$

Витрати коригування структури:

$$C_t^{adj} = \eta_1 \|s_t - s_{t-1}\|_2^2 + \eta_2 \|u_t - u_{t-1}\|_2^2. \quad (29)$$

7. Інтегральна корисність, взаємодії та ризик. Скаляризатор політики поєднує адитивну, мультиплікативну та взаємодійну частину з контролем компенсаційності:

$$U_t = \frac{\gamma^T X_t}{\text{адитивна}} + \frac{1}{2} \frac{X_t^T K X_t}{\text{синергії}} + \frac{\mu \prod_{i=1}^6 (E_t^{(i)} + \int)^{v_i}}{\text{геометрична складова}} \quad (30)$$

$$\sum_i \gamma_i = 1, \sum_i v_i = 1. \quad (31)$$

Параметри γ, K, v оцінюються байєсівськи; $\epsilon > 0$ запобігає виродженню (числовий колапс моделі, коли добуток індексів або ваги наближаються до нуля, втрачається чутливість і з'являються нестабільності обчислень. Додавання невеликого « ϵ » запобігає нульовим значенням у множниках, стабілізує оцінювання і не дає параметрам «залипати» на крайніх значеннях).

Робастизація відносно зовнішньої кон'юнктури $\omega \in \Omega$ (ціни $P_{c,t}$, попит $D_{c,t}$, логістичні

збої) сформуємо через CV_aR (робастні метрики ризику):

$$\max_{\{s_t, u_t\}_{t=T_0}} \sum_{t=T_0}^T \left(-\lambda_{risk} \frac{E_\omega[U_t] - CV_aR_\alpha[L_t(\omega)]}{\alpha} \right) - \sum_{t=T_0}^T C_t^{adj}, \quad (32)$$

де $L_t(\omega) = -U_t(\omega)$, $\alpha \in (0, 1)$, $\lambda_{risk} \geq 0$.

8. Процедура оцінювання параметрів. Оцінювання виконується у два кроки з можливістю спільної байєсівської ідентифікації.

1) Оцінювання станів і внутрішніх ваг критеріїв $\lambda^{(k)}$ у моделі стан-простір із режимами:

$$\{\hat{x}_t, \hat{z}_t, \hat{\theta}_t\} \arg \max L(\{y_t\} | \text{параметри}), \quad (33)$$

де L – правдоподібність із мішаною частотою та MIDAS-агрегаторами.

2) Калібрування γ , K , ν методом «дані → фактори → регресія» з байєсівським усередненням моделей і регуляризацією, щоби знизити чутливість до мультиколінеарності.

Невизначеність параметрів і станів переноситься у рішення через симуляцію сценаріїв Ω і обчислення CV_aR .

9. Задача оптимального керування й спосіб розв'язання. Фінальна задача:

$$\max_{\{s_t, u_t\}_{t=T_0}} \sum_{t=T_0}^T \left(-\lambda_{risk} \frac{E_\omega[U_t] - CV_aR_\alpha[L_t(\omega)]}{\alpha} \right) - \sum_{t=T_0}^T C_t^{adj} \quad (34)$$

За умов динаміки X_{t+1} , часток s_{t+1} , мережевих потоків f_t , бюджетних, квотних, екологічних та логістичних обмежень.

Обчислювальна схема реалізується як керування з прогнозом (MPC) у режимі «ковзного горизонту»:

1) Фільтрація та згладжування латентних індексів на t ;

2) Генерація сцена рійного дерева Ω_t для $P_{c,\tau}$, $D_{c,\tau}$, $K_{c,\tau}$ на $\tau \in [t, t+H]$;

3) Розв'язання стохастичної задачі у змішаній формі: квадратичне програмування для s_t , u_t з вкладеним лінійним мережевим блоком за фіксованою лінеаризацією $\sigma(\cdot)$;

4) Імплементация першого кроку рішення, перехід на $t+1$ і повтор.

10. Пороги політики, валідація та чутливий аналіз. Планові пороги для кожного критерію фіксуються як необхідні умови:

$$\begin{aligned} E_t \geq \underline{E}, E_t^{inst} \geq \underline{E}^{inst}, E_t^{geo-log} \geq \underline{E}^{geo}, E_t^{soc-tech} \geq \\ \geq \underline{E}^{soc}, E_t^{eco} \geq \underline{E}^{eco}, E_t^{mp} \geq \underline{E}^{mp} \end{aligned}$$

Валідація здійснюється за схемою ковзного походження з відкладеною вибіркою, тестами стабільності параметрів і перевіркою прогностичної сили щодо незалежних цілей у пост-2024 періоді. Чутливий аналіз

містить локальні похідні $\partial U_t / \partial \theta$ для всіх ваг та інструментів і глобальні індекси Соболя для декомпозиції дисперсії U_t . Врахування глобальних індексів Соболя є критичним, бо вони розкладають дисперсію цільової функції на внески окремих факторів і їхніх взаємодій, надійно ранжують важелі політики в умовах нелінійності та колінеарності і тим самим спрямовують розподіл ресурсів на параметри з найбільшим глобальним впливом. У прикладному вимірі це дозволяє перерозподіляти обмежені бюджети між, скажімо, модернізацією дунайсько-залізничного плеча, сертифікаційними програмами та цифровою інтеграцією «ERP/EDI» за їхнім реальним внеском у варіацію цільової функції, мінімізуючи витрати «наосліп» і спрямовуючи кошти туди, де глобальний вплив на зростання частки інноваційних товарів і стабільність валютного виторгу є найбільшим.

Зростання E_t^{inst} розширює допустимі області s_t через послаблення нетарифних бар'єрів і підвищення квотних стель, що підсилює потенціал E_t та $E_t^{soc-tech}$. Посилення $E_t^{geo-log}$ стабілізує фізичний потік, поліпшуючи E_t^{mp} і відкриваючи можливості для збільшення частки товарів з високими вимогами до часу доставки. Зростання $E_t^{soc-tech}$ прискорює комерціалізацію перероблених товарів і спрощує відповідність технічним нормам, що впливає на E_t^{inst} та E_t^{eco} . Підвищення E_t^{eco} зменшує цінові дисконти та ризики доступу, знижуючи експозицію E_t^{mp} до глобальних шоків. Системне узгодження цих блоків у U_t забезпечує цілеспрямоване зміщення кошика s_t у бік продукції з доданою вартістю за гарантованих логістичних, інституційних та «зелених» умов входу на ринок ЄС і контрольованої ринкової вразливості.

Модель повертає траєкторії цільових часток s_t , оптимальні програми u_t у бюджетних межах, очікувані значення критеріїв з довірчими інтервалами, карту вузьких місць логістики, а також робастні метрики ризику (CV_aR) для валютного виторгу.

Запропонована інтегрована модель поєднує відтворюваність індикаторів із фізичною здійсненністю логістики, економічним змістом взаємодій між критеріями та робастним урахуванням зовнішніх шоків. Це створює надійне підґрунтя для стратегічного керування раціоналізацією товарної структури експорту України до ЄС у повенний період.

Висновки. Запропонована постановка стратегічного моделювання формує цілісну рамку раціоналізації експорту України до ЄС як задачі оптимального керування з багато-

критеріальною ціллю, динамікою станів і жорсткими політико-економічними обмеженнями. Інтегральна функція корисності забезпечує узгодження шести ключових критеріїв у нормованому просторі та дозволяє налаштувати пріоритети політики через ваги, оцінені емпірично або задані стратегічно. Марковська динаміка часток експорту інтерпретує структурні зрушення як керований процес переходів між товарними групами, обмежений потужностями та сертифікаційною готовністю. Включення логістично-мережевої підмоделі, режимних зламів і мішаної частоти даних підвищує прикладну реалізованість і точність оцінювання латентних індексів у реальному

часі. Робастна компонента (CVaR) переводить модель у режим стійкого планування за несприятливих сценаріїв цін, попиту та логістичних збоїв, знижуючи ризик нестабільності валютного виторгу й провалів виконання порогів. У підсумку модель генерує відтворювані траєкторії політики та структури експорту, що підтримують зростання частки продукції з доданою вартістю за одночасного підсилення інституційної сумісності з ЄС, логістичної стійкості, цифрової готовності та екологічної відповідності, тобто створює кількісно верифіковану основу для стратегічного управління зовнішньоторговельною політикою у повоєнний період.

Бібліографічний список

1. Baxter M., Kouparitsas M. A. Trade structure, industrial structure, and international business cycles. *Boston University*. 2002. URL: <https://www.bu.edu/econ/files/2012/11/dp127.pdf>
2. Lederman D., Maloney W. F. Trade structure and growth (World Bank Policy Research Working Paper No. 3025). *World Bank*. 2003. URL: <https://documents1.worldbank.org/curated/en/409091468741371016/pdf/multi0page.pdf>
3. Hausmann R., Hwang J., Rodrik D. What you export matters (NBER Working Paper No. 11905). *NBER*. 2005. URL: https://www.nber.org/system/files/working_papers/w11905/w11905.pdf
4. Hesse H. Export diversification and economic growth (Commission on Growth and Development Working Paper No. 21). *World Bank*. 2008. URL: <https://documents1.worldbank.org/curated/en/577921468150573677/pdf/577210NWP0Box353766B01PUBLIC10gcwp021web.pdf>
5. Barigozzi M., Fagiolo G., Garlaschelli D. Multinetwork of international trade: A commodity-specific analysis. *arXiv*. 2009. URL: <https://arxiv.org/abs/0908.1879>
6. Hidalgo C. A., Hausmann R. The building blocks of economic complexity. *arXiv*. 2009. URL: <https://arxiv.org/abs/0909.3890>
7. Basu S. R. Export structure and economic performance in developing countries (UNCTAD Discussion Paper No. 149). *UNCTAD*. 2011. URL: https://unctad.org/system/files/official-document/itcdtab49_en.pdf
8. Hausmann R., Hidalgo C. A. The network structure of economic output. *arXiv*. 2011. URL: <https://arxiv.org/abs/1101.1707>
9. Shi P., Zhang J., Yang B., Luo J. Hierarchicality of trade flow networks reveals complexity of products. *arXiv*. 2014. URL: <https://arxiv.org/abs/1401.3103>

References

1. Baxter M. & Kouparitsas M. A. (2002). Trade structure, industrial structure, and international business cycles. *Boston University*. Available at: <https://www.bu.edu/econ/files/2012/11/dp127.pdf>
2. Lederman D. & Maloney W. F. (2003). Trade structure and growth (World Bank Policy Research Working Paper No. 3025). *World Bank*. Available at: <https://documents1.worldbank.org/curated/en/409091468741371016/pdf/multi0page.pdf>
3. Hausmann R., Hwang J. & Rodrik D. (2005). What you export matters (NBER Working Paper No. 11905). *National Bureau of Economic Research*. Available at: https://www.nber.org/system/files/working_papers/w11905/w11905.pdf
4. Hesse H. (2008). Export diversification and economic growth (Commission on Growth and Development Working Paper No. 21). *World Bank*. Available at: <https://documents1.worldbank.org/curated/en/577921468150573677/pdf/577210NWP0Box353766B01PUBLIC10gcwp021web.pdf>
5. Barigozzi M., Fagiolo G. & Garlaschelli D. (2009). Multinetwork of international trade: A commodity-specific analysis (arXiv:0908.1879). *arXiv*. Available at: <https://arxiv.org/abs/0908.1879>
6. Hidalgo C. A. & Hausmann R. (2009). The building blocks of economic complexity (arXiv:0909.3890). *arXiv*. Available at: <https://arxiv.org/abs/0909.3890>
7. Basu S. R. (2011). Export structure and economic performance in developing countries (UNCTAD Discussion Paper No. 149). *United Nations Conference on Trade and Development*. Available at: https://unctad.org/system/files/official-document/itcdtab49_en.pdf
8. Hausmann R. & Hidalgo C. A. (2011). The network structure of economic output (arXiv:1101.1707). *arXiv*. Available at: <https://arxiv.org/abs/1101.1707>
9. Shi P., Zhang J., Yang B. & Luo J. (2014). Hierarchicality of trade flow networks reveals complexity of products (arXiv:1401.3103). *arXiv*. Available at: <https://arxiv.org/abs/1401.3103>

Anatoliy Puzrakov

PhD Student,

Lviv Polytechnic National University

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5129-0234>

MODELING STRATEGIC DIRECTIONS FOR THE RATIONALIZATION OF UKRAINE'S EXPORT COMMODITY STRUCTURE TO EU MARKETS UNDER GLOBAL CHALLENGES

The conducted modeling of the rationalization of Ukraine's export commodity structure to the EU formed a coherent analytical framework in which economic-structural, institutional-integration, geopolitical-logistical, socio-technological, environmental-climatic, and market-price criteria are combined within an integral utility function incorporating state dynamics, network logistics, and robust risk consideration. Based on normalized indicators and latent states, it is shown that optimal trajectories of shifting export shares toward processed goods and mechanical engineering are achieved through the coordinated strengthening of institutional compliance, the development of a multi-channel infrastructure ("sea–Danube–rail–road"), the digitalization of sales processes, and the adoption of "green" production practices. It is argued that the combination of investments in throughput capacity and digital document management reduces the variability of physical flows, lowers logistics costs, and enhances access to the European market for high value-added products. It is substantiated that compliance with EU technical regulations and environmental standards expands the feasible decision space for export structure, reduces regulatory discounts, and strengthens the resilience of the product portfolio to price shocks. It is demonstrated that robust optimization incorporating CVaR under price and logistics disruption scenarios stabilizes foreign-exchange revenues in the medium- and long-term horizon, while the multiplicative component of the integral utility function prevents the masking of structural weaknesses by high values of individual criteria. The coordinated policy derived from the model yields an implementable rationalization plan in which an increasing share of value-added products is accompanied by higher institutional compatibility with the EU market, greater resilience of supply routes, accelerated certification and e-commerce, and reduced carbon intensity of the export basket. The overall outcome implies enhanced competitiveness of Ukrainian exports in European markets in the post-war period, strengthened resilience to external shocks, and the creation of a reproducible, quantitatively verifiable basis for strategic management of foreign trade policy.

Keywords: commodity structure, exports, global challenges, economic competitiveness, foreign trade policy management.

Дата надходження статті: 04.01.2026

Дата прийняття статті: 24.01.2026

Дата публікації статті: 03.02.2026