

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ КІБЕРНЕТИКИ ІМЕНІ В.М. ГЛУШКОВА

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Дунаєвський Максим Сергійович

УДК 519.8

ДИСЕРТАЦІЯ

**МЕХАНІЗМИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ
ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНИХ СИСТЕМ ТА ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ**

Спеціальність 113 – «Прикладна математика»

Галузь знань 11 – «Математика та статистика»

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Дунаєвський М.С.

Науковий керівник:

Горбачук Василь Михайлович
доктор фізико-математичних наук
старший науковий співробітник

Київ – 2023

АНОТАЦІЯ

Дунаєвський М. С. Механізми підвищення ефективності децентралізованих систем та їх застосування. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 113 Прикладна математика. – Інститут кібернетики імені В.М. Глушкова Національної академії наук України, Київ. – 2023.

Загальна проблематика дослідження – ефективність децентралізованих мереж, зокрема, мереж ланцюгів постачання (МЛП), інформаційно-комунікаційних мереж, розвиток регіонів країни за стратегії економічної децентралізації. В роботі увага приділена як теоретико-методологічним основам, так і практичним, прикладним, розрахункам на основі реальних статистичних регіональних даних.

Метою роботи є дослідження децентралізованих систем, аналіз та розробка механізмів підвищення їх ефективності на основі математичних алгоритмів та моделей, застосування запропонованих рішень на реальних економічних даних регіонів України.

Наукова новизна та практичне значення отриманих результатів полягає в розробці новітніх програмно-комп'ютерних засобів поквартального оцінювання економічної ефективності та цільової структури експорту регіонів України, що може бути в основі системи підтримки прийняття макроекономічних рішень. Подібна система має перспективу впровадження в Мінекономіки України, а також може бути використана іншими органами державного управління та місцевого самоврядування для прийняття оптимальних рішень на місцевому рівні. Відповідно до розроблених алгоритмів проведено оцінку економічної ефективності регіонів України та розрахунок оптимальної структури експорту для Тернопільщини (у співавторстві з Горбачук В.М., Неботов П.Г. 2018), Кіровоградщини (у співавторстві з Горбачук В.М., Шпига С.П. 2018) та Луганщини (у співавторстві з Горбачук В.М., Симонов Д.І. 2018).

Зміст дисертації. У **вступі** викладені обґрунтування вибору теми дослідження, мета і завдання дослідження, методи дослідження, а також розкрита практична значущість та наукова новизна отриманих результатів.

В **розділі 1** представлено розробки щодо теорії та методології децентралізованих мереж, зокрема, мережі ланцюгів постачання (МЛП), інформаційно-комунікаційних мереж, економічної децентралізації регіонів.

Розроблено інноваційну ігрову модель мережі ланцюгів постачання, що складається з ряду роздрібних торговців продуктом і ряду ринків збуту даного продукту, де роздрібні торговці некооперативно конкурують, максимізуючи свої сподівані прибутки шляхом визначення своїх оптимальних трансакцій для продукту, а також оптимальних інвестицій у кібербезпеку, які входять у нелінійні бюджетні обмеження. Встановлено що для розв'язання задачі пошуку рівноважних інвестицій у кібербезпеку МЛП можна запропонувати ітеративний алгоритм, який на кожній ітерації дає в явному вигляді співвідношення для трансакцій продукту, рівнів безпеки та множників Лагранжа, пов'язаних з бюджетними обмеженнями.

В **розділі 2** досліджено стохастичні методи підтримки прийняття рішень за умов невизначеності.

Зокрема, вперше обґрунтовано застосування дифузійної моделі інновацій Басса до поширення вакцинацій. Отримано формулу, яка дозволяє оцінити очікувану тривалість часу до моменту первинної закупівлі інноваційного товару (отримання вакцини проти COVID-19) довільно обраним покупцем (громадянином). Враховано вплив покупців-новаторів, які приймають рішення придбати (застосувати) інноваційний продукт відразу з його появою, а також вплив покупців-наслідувачів, які приймають рішення, щодо купівлі (застосування) інноваційного продукту з певним лагом, після того як інноваційний продукт насичує ринок та з'являється більше відгуків щодо нього від покупців-новаторів.

В розділі 3 досліджено математичні методи підтримки прийняття рішень на ринку інформаційно-комунікаційних послуг та в сфері державних макрофункцій.

Встановлено функцію реакції послідовника (провайдера Інтернет сервісу) (ISP) на рішення лідера (контент провайдера). Враховуючи такі основні параметри як ціну послуги, частку доходу контент провайдера, обсяг ринку, витрати на одиницю розширення та обслуговування спроможності мережі провайдер Інтернет сервісу вирішує якою мірою розширити спроможність наявної мережі.

В розділі 4 «Алгоритми оцінки ефективності та цільової структури експорту регіонів України та їх застосування» розроблено алгоритм оцінки ефективності та алгоритм пошуку оптимальної структури експорту регіону. Проведено такий розрахунок для Тернопільщини (співавтори Горбачук В.М., Неботов П.Г. 2018), Кіровоградщини (співавтори Горбачук В.М., Шпиґа С.П. 2018) та Луганщини (співавтори Горбачук В.М., Симонов Д.І. 2018). Запропоновані алгоритми лежать в основі механізмів підвищення економічної ефективності регіонів, зокрема шляхом запозичення кращих практик управління районів лідерів.

Загалом, проаналізовано роботи таких вітчизняних та закордонних вчених: Атоєва К.Л., Бідюка П.І., Богданова В.Л., Возняк Г., Гайворонського А.А., Глушкова В.М., Горбачука В.М., Гуляницького Л.Ф., Єрмольєва Ю.М., Загороднього А.Г., Заславського В.А., Згуровського М.З., Кирилюка В.С., Кльоби Т., Кнопова П.С., Кузьменка В.М., Летичеського О.О., Макаренко О.С., Михалевича В.С., Норкіна В.І., Новосьолової Н.А., Пепеляєва В.А., Семенової Н.В., Сергієнко І.В., Стецюка П.І., Akerlof G.A., Arrow K.J., Basar T., Bass F.M., Costinot A., Daniele P., Ferguson N., Gabay D., Maheswaran R., Mera K., Nagurney A., Nash J., Samuelson P.A., Shetty N.G., Stiglitz J., Vickrey W., Wilson R.

Ключові слова: децентралізація, інвестиції, мережа ланцюгів постачання, регіональна економіка, рівновага Неша, розподіл доходів і факторів, система підтримки прийняття рішень (СППР), стохастичне моделювання, суспільний добробут, фінансові кризи.

ANNOTATION

Dunaievskyi M.S. Mechanisms for improving the efficiency of decentralized systems and their application. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

The dissertation on completion of Philosophy Doctor scientific degree on specialty 113 Applied mathematics. – V.M. Glushkov Institute of Cybernetics of NAS of Ukraine, Kyiv. – 2023.

General scope of research issues – efficiency of decentralized networks, in particular, supply chain networks (SCN), information and communication networks, development of the country's regions according to the strategy of economic decentralization. The paper pays attention to both theoretical and methodological bases, and practical, applied, calculations based on real statistical regional data.

The aim of the work is the study of decentralized systems, analysis and development of mechanisms to increase their efficiency based on mathematical algorithms and models, the application of the proposed solutions to real economic data of the regions of Ukraine.

Scientific novelty and practical significance of the obtained results is the development of innovative software and computer tools for quarterly assessment of economic efficiency and target structure of exports of the regions of Ukraine, which may be the basis of the macroeconomic decision support system. Such system has the prospect of implementation in the Ministry of Economy of Ukraine, and can also be used by other public administration bodies and local governments to make optimal decisions at the local level. According to the developed algorithms, an assessment of the economic efficiency of the regions of Ukraine and the estimation of the optimal structure of exports for Ternopil region (co-authored with Gorbachuk V.M., Nebotov P.G. 2018), Kirovograd region (co-authored with Gorbachuk V.M., Shpyga S.P. 2018) and Luhansk region (co-authored with Gorbachuk V.M., Simonov D.I. 2018).

Dissertation content. The **introduction** presents the rationale for choosing a research topic, the purpose and objectives of the study, research methods, as well as reveals the practical significance and scientific novelty of the results.

Section 1 presents developments regarding the theory and methodology of decentralized networks, in particular, supply chain networks (SC), information and communication networks, and economic decentralization of regions.

An innovative game model of a supply chain network consisting of a number of retailers of a product and a number of markets for that product as developed, where retailers compete non-cooperatively to maximize their expected profits by determining their optimal transactions for the product, as well as the optimal cybersecurity investments included in non-linear budget constraints.

It is established that to solve the problem of finding equilibrium investments in cybersecurity of SC, it is possible to propose an iterative algorithm, which at each iteration gives an explicit relationship for product transactions, security levels and Lagrange multipliers associated with budget constraints.

In **section 2** stochastic methods of decision support under conditions of uncertainty are investigated.

In particular, the application of Bass diffusion model of innovations to the spread of vaccinations is substantiated for the first time. The formula was obtained which allows to estimate the expected length of time until the moment of the initial purchase of an innovative product (receiving a vaccine against COVID-19) by an arbitrarily selected buyer (citizen). The influence of innovative buyers who make a decision to purchase (use) an innovative product immediately upon its appearance, as well as the influence of imitator buyers who make a decision to purchase (use) an innovative product with a certain lag, after the innovative product saturates the market and more information and feedback about it from innovative buyers is available, are taken into consideration.

In **section 3** mathematical methods for supporting decision-making in the market of information and communication services and in state macrofunctions are researched.

The reaction function of the follower (Internet service provider) (ISP) to the decision of the leader (content of the provider) is established. Taking into account such basic parameters as the price of the service, the content provider's share of income, the market volume, costs per unit of expansion and maintenance of network capacity, the Internet service provider decides to what extent to expand the existing network capacity.

In **section 4** «Algorithms for evaluating the efficiency and target export structure of the regions of Ukraine and their application», an algorithm for evaluating the efficiency and an algorithm for finding the optimal structure of the region's exports have been developed. According to the developed algorithms, an assessment of the economic efficiency of the regions of Ukraine and the estimation of the optimal structure of exports for Ternopil region (co-authored with Gorbachuk V.M., Nebotov P.G. 2018), Kirovograd region (co-authored with Gorbachuk V.M., Shpyga S.P. 2018) and Luhansk region (co-authored with Gorbachuk V.M., Simonov D.I. 2018). The proposed algorithms are the basis of the mechanisms for increasing the economic efficiency of regions, in particular, by borrowing the best management practices of leading districts.

The works of the following homeland and foreign scientists were analyzed: Atoiev K.L., Bidiuk P.I., Bohdanov V.L., Voznyak H., Haivoronskyi A.A., Hlushkov V.M., Gorbachuk V.M., Hulianytskyi L.F., Yermoliev Yu.M., Zagorodniy A.H., Zaslavskyi V.A., Zghurovskyi M.Z., Kyryliuk V.S., Kloba T., Knopov P.S., Kuzmenko V.M., Letychevskyi O.O., Makarenko O.S., Mykhalevych V.S., Norikin V.I., Novosolova N.A., Pepeliaiev V.A., Semenova N.V., Serhienko I.V., Stetsiuk P.I., Akerlof G.A., Arrow K.J., Basar T., Bass F.M., Costinot A., Daniele P., Ferguson N., Gabay D., Maheswaran R., Mera K., Nagurney A., Nash J., Samuelson P.A., Shetty N.G., Stiglitz J., Vickrey W., Wilson R.

Key words: decentralization, investments, supply chain network, regional economy, Nash equilibrium, income and factor distribution, decision support system (DSS), stochastic modeling, social welfare, financial crises.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Публікації у наукових виданнях, проіндексованих у базах даних

Web of Science Core Collection та/або Scopus

1. Gorbachuk V., Dunaievskiy M., Suleimanov S.-B. Modeling of agency problems in complex decentralized systems under information asymmetry. *IEEE Conference on Advanced Trends in Information Theory* (December 18–20, 2019, Kyiv, Ukraine). Kyiv: Taras Shevchenko National University of Kyiv, 2019. P. 449–454.

DOI: 10.1109/ATIT49449.2019.9030498

2. Gorbachuk V.M., Dunaievskiy M.S., Syrku A.A., Suleimanov S.-B. Substantiating the diffusion model of innovation implementation and its application to vaccine propagation. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2022, January. Vol. 58. No. 1. P. 84–94.

DOI: 10.1007/s10559-022-00438-1

3. Gorbachuk V., Dunaievskiy M. Nash equilibrium and its modern applications. *Modern optimization methods for decision making under risk and uncertainty*. A.A. Gaivoronski, P.S. Knopov, V.A. Zaslavskiy (eds.) Boca Raton, FL: CRC Press, 2023. P. 196–224.

DOI: 10.1201/9781003260196

Статті у наукових виданнях, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України за спеціальністю 113

4. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Морозов О.О. Рівноважні інвестиції у кібербезпеку мережі ланцюгів постачання. *Вісник Київського університету. Серія: фізико-математичні науки*. 2017. № 2. С. 47–52.

DOI: 10.32626/2308-5916.2019-19.31-37

5. Горбачук В.М., Гавриленко С.О., Голоцуков Г.В., Дунаєвський М.С., Ніколенко Д.І. До інтегрованого менеджменту і фінансового забезпечення інфраструктури охорони здоров'я районів Запоріжчини. *Кібернетика та комп'ютерні технології*. 2020. № 4. С. 87–99.

DOI: 10.34229/2707-451X.20.4.6

6. Дунаєвський М.С., Лефтеров О.В., Большаков В.М. Використання

загальнодоступного програмного забезпечення у моделюванні епідеміологічних трендів. *Кібернетика та комп'ютерні технології*. 2020. № 3. С. 32–42.

DOI: 10.34229/2707-451X.20.3.4

7. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Сулейманов С.-Б. Прогнозування ефективності багатокомпонентних обчислювальних систем. *Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології*. 2021. 32. С. 96–100.

DOI: 10.15407/fmmit2021.32.096

8. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Сулейманов С.-Б., Батіг Л.О., Симонов Д.І. Моделі прийняття рішень на ринку хмарних послуг. *Кібернетика та комп'ютерні технології*. 2021. № 3. С. 53–64.

DOI: 10.34229/2707-451X.21.3.5

9. Гайворонський О.О., Горбачук В.М., Дунаєвський М.С. Стратегічна взаємодія провайдерів диференційованих Інтернет-послуг. *Проблеми керування та інформатики*. 2021. № 6. С. 102–113.

DOI: 10.34229/1028-0979-2021-6-10

10. Горбачук В.М., Голоцуков Г.В., Дунаєвський М.С., Сирку А.А., Сулейманов С.-Б. Теоретико-ігрові та оптимізаційні моделі і методи підвищення безпеки кіберінфраструктур. *Проблеми керування та інформатики*. 2022. № 2. С. 92–105.

DOI: 10.34229/2786-6505-2022-2-6

11. Gaivoronski A., Gorbachuk V., Dunaievskyi M., Suleimanov S.-B. Digital platforms to close the information asymmetry gaps. *Проблеми керування та інформатики*. 2022. № 6. P. 67–82.

<https://jais.net.ua/index.php/files/article/view/64/186>

Розділи у монографіях, виданих у державах ЄС

12. Gorbachuk V., Dunaievskyi M., Suleimanov S.-B. An interdisciplinary approach to the security of modern energy. *Modern approaches to ensuring sustainable development*. V.Smachylo, O.Nestorenko (eds.) Katowice, Poland: University of Technology, Katowice, 2023. P. 142–149.

13. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Сулейманов С.-Б. Управління та адміністрування в сфері послуг охорони здоров'я. *Management and administration in the field of services: selected examples*. T.Pokusa, T.Nestorenko (eds.) Opole: Academy of Management and Administration, 2020. P. 268–279.

14. Dunaievskiy M. Applied mathematics for optimal economic and healthcare benefits trade-off. Improving living standards: current opportunities and limitations. *Improving living standards: current opportunities and limitations*. W.Duczmal, I.Ostopolets (eds.) Opole: Academy of Management and Administration, 2020. P. 266–276.

15. Горбачук В.М., Лупей М.І., Дунаєвський М.С. Підходи до резильєнтності критичних інфраструктур. *Science and education for sustainable development*. A.Ostenda, V.Smachylo (eds.) Katowice, Poland: University of Technology, Katowice, 2022. P. 87–95.

Статті у наукових виданнях, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України за іншими спеціальностями

16. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Морозов О.О. Характеристики рівноваг ланцюгів постачання. *Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: технічні науки*. 2019. Вип. 19. С. 31–37.

DOI: 10.32626/2308-5916.2019-19.31-37

17. Горбачук В.М., Лупей М.І., Ніколенко Д.І., Дунаєвський М.С., Сулейманов С.-Б., Батіг Л.О. Процеси генерації цифрових даних та їх застосування. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І.Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2022. Т. 33 (72). № 5. С. 64–72.

DOI: 10.32782/2663-5941/2022.5/09

18. Горбачук В., Дунаєвський М., Сулейманов С.-Б. Підхід до обчислення рівноважних потоків продукції конкурентних фірм через мережі ланцюгів постачання при ресурсних обмеженнях і ризикованих умовах. *Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології*. 2023. № 36. С. 58–62.

DOI: 10.15407/10.15407/fmmit2023.36.058

19. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Сирку А.А., Сулейманов С.-Б. Вартості досконалої інформації та стохастичного рішення. *Компьютерная математика*. 2017. № 2. С. 108–117. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Koma_2017_2_16
20. Кнопов П.С., Горбачук В.М., Кирилюк В.С., Атоєв К.Л., Дунаєвський М.С., Сирку А.А. Інтелектуальні засоби поквартального оцінювання економічної ефективності й цільової структури експорту у 2017–2018 рр. на прикладі Київщини. *Штучний інтелект*. 2018. 3. С. 111–125. <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/162450>
21. Дунаєвський М.С. Надійна модель контролю забруднення агровиробництвом за невизначених погодних умов. *Компьютерная математика*. 2018. № 1. С. 36–45. <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/161847>
22. Дунаєвський М.С. Моделювання системи оптимального використання водних, енергетичних та продовольчих ресурсів. *Компьютерная математика*. 2019. № 1. С. 3–9. <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/161927>
23. Дунаєвський М.С. Економічне зростання суміжних районів за децентралізації. *Теорія оптимальних рішень*. 2019. № 18. С. 94–99. <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/161680>
24. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Сулейманов С.-Б. Податкова конкуренція і кооперація за світові корпорації. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2018. № 3 (66). Т. 1. С. 45–54.
25. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Сулейманов С.-Б. Інституційні питання розвитку внутрішніх водних шляхів України та сусідніх держав через басейн Дунаю. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Економіка і управління*. 2019. 30 (69). № 6. Ч. 2. С. 121–127.
26. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Сирку А.А., Сулейманов С.-Б. Оптимізаційні питання оцінювання щільності на реальних даних. *Штучний інтелект*. 2017. № 3-4. С. 101–110.
27. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Сулейманов С.-Б. До динамічного

розрахунку цільової структури товарного експорту України та її регіонів. *Інфраструктура ринку*. 2018. Випуск 16. С. 206–215.

28. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Неботов П.Г. До регулювання ринку природного газу. *Східна Європа: економіка, бізнес та управління*. 2018. Випуск 2 (13). С. 266–273.

29. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Неботов П.Г. Алгоритм розрахунку цільової досяжної структури товарного експорту України та її регіонів. *Глобальні та національні проблеми економіки*. 2018. Вип. 22. С. 1023–1033.

30. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Сулейманов С.-Б. Обчислення цільової досяжної структури товарного експорту Закарпаття. *Науковий вісник Ужгородського національного університету. Серія: Міжнародні економічні відносини та світове господарство*. 2018. Випуск 18. Ч. 1. С. 113–124.

31. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Сулейманов С.-Б. Поквартальне оцінювання економічної ефективності та цільової структури експорту Закарпаття у 2017–2018 рр. *Науковий вісник Ужгородського національного університету. Серія: Міжнародні економічні відносини та світове господарство*. 2018. Випуск 22. Ч. 1. С. 61–69.

32. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Сулейманов С.-Б. Організація забезпечення громадських і клубних продуктів для рекреації та охорони здоров'я. *Приазовський економічний вісник*. 2018. Вип. 2. С. 156–162.

33. Горбачук В.М., Шпиґа С.П., Дунаєвський М.С. Поквартальне оцінювання економічної ефективності й структури експорту Кіровоградщини у 2017–2018 рр. *Вісник Одеського національного університету імені І.І.Мечникова. Економіка*. 2018. Т. 23. Вип. 5 (70). С. 177–185.

34. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Сулейманов С.-Б. Поквартальне оцінювання економічної ефективності й цільової структури експорту Запоріжчини у 2017–2018 рр. *Приазовський економічний вісник*. 2018. Вип. 4. С. 165–175.

35. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Сулейманов С.-Б. Поквартальне

оцінювання економічної ефективності й цільової структури експорту Одещини у 2017–2018 рр. *Інфраструктура ринку*. 2018. Вип. 22. С. 269–281.

36. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Скороход Д.А. Моделювання фінансових криз. *Інфраструктура ринку*. 2018. Вип. 23. С. 375–382.

37. Горбачук В.М., Колесник Ю.С., Дунаєвський М.С. Втрати агрегованої ефективності при досягненні міжрегіональної рівності. *Економіка та суспільство*. 2018. Вип. 18. С. 1077–1086.

38. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Сулейманов С.-Б. Поквартальне оцінювання економічної ефективності й структури експорту Миколаївщини у 2017–2018 рр. *Інфраструктура ринку*. 2018. Вип. 25. С. 897–909.

39. Горбачук В.М., Неботов П.Г., Дунаєвський М.С. Поквартальне оцінювання економічної ефективності й структури експорту Тернопільщини у 2017–2018 рр. *Приазовський економічний вісник*. 2018. Вип. 6 (11). С. 574–584.

40. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Сулейманов С.-Б. Модель зростання децентралізованої економіки з виробничими функціями Кобба–Дугласа. *Східна Європа: економіка, бізнес та управління*. 2019. Випуск 6 (23). С. 738–746.

41. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Сирку А.А. Сучасні питання генерування та накопичення енергії в енергосистемі України. *Східна Європа: економіка, бізнес та управління*. 2020. Випуск 1 (24). С. 260–268.

42. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Сулейманов С.-Б. Аналіз невтлених активів на недосконалих ринках. *Приазовський економічний вісник*. 2020. 4 (21). С. 110–117.

43. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Симонов Д.І. Поквартальне оцінювання економічної ефективності й цільової структури експорту Луганщини. *Східна Європа: економіка, бізнес та управління*. 2021. Випуск 3 (30). С. 102–113.

44. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Сулейманов С.-Б. Моделювання самопідтримуваних стратегій для урядової фінансової системи, державної банківської системи та інвестиційної системи відновлюваної енергогенерації. *Економічний простір*. 2022. № 179. С. 146–152.

**Список публікацій здобувача, які засвідчують
апробацію матеріалів дисертації**

45. Дунаєвський М.С. Перспективи використання алгоритмів машинного навчання в системах підтримки прийняття рішень в сфері роздрібної торгівлі. *Штучний інтелект та інтелектуальні системи* (17–18 жовтня 2017 р., Київ, Україна). Київ. 2017. С. 63–66.
46. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Сулейманов С.-Б., Аллахвердієв А. Динаміка індексів виявленої порівняльної переваги Луганщини за групами товарів у 2011–2016 роках. *Глобальні виміри захисту економічної конкуренції* (27 жовтня 2017 р., Київ, Україна). Київ: Центр комплексних досліджень з питань антимонопольної політики, 2017. С. 27–30.
47. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Сирку А.А., Сулейманов С.-Б. Економіка кібербезпеки. *Інформаційні технології та взаємодії* (8–10 листопада 2017 р., Київ, Україна). Київ: КНУ імені Т. Шевченка, 2017. С. 207–208.
48. Горбачук В.М., Макаренко О.С., Самородов Є.Л., Дунаєвський М.С., Сирку А.А., Сулейманов С.-Б. До інтегрованих систем візуалізації, аналізу та застосування часово-просторових даних. *Глушковські читання* (13 грудня 2017 р., Київ, Україна). Київ: НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського», 2017. С. 35–37.
49. Горбачук В.М., Макаренко О.С., Дунаєвський М.С., Новодережкін В.І., Сулейманов С.-Б. Вимірювання економічної ефективності регіонів України за перші квартали 2017 р. *Сучасна інформатика: проблеми, досягнення та перспективи розвитку* (13–15 грудня 2017 р., Київ, Україна). Київ: Інститут кібернетики імені В.М.Глушкова НАН України, 2017. С. 258–260.
50. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Сирку А.А., Сулейманов С.-Б. Особливості державних оборонних замовлень. *Глобальні виміри захисту економічної конкуренції* (28 лютого 2018 р., Київ, Україна). Київ: Центр комплексних досліджень з питань антимонопольної політики, 2018. С. 36–39.
51. Gorbachuk V.M., Dunaievskiy M.S., Suleimanov S.-B. The Golden rule for

overlapping generations. *Nonlinear analysis and applications* (April 12, 2018, Kyiv, Ukraine). Kyiv: NTUU «KPI», 2018. P. 24.

52. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Сулейманов С.-Б. Алгоритми збільшення ефективності та експорту регіонів України. *Інноваційні ідеї в економічній науці: пошуки вирішення сучасних проблем* (19–20 квітня 2018 р., Київ, Україна). Київ: Знання України, 2018. С. 40–44.

53. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Сулейманов С.-Б. Обчислення оптимальної спеціалізованої експортної структури регіону. *Інформаційно-комп'ютерні технології – 2018* (20 квітня 2018 р., Житомир, Україна). Житомир: Житомирський державний технологічний університет, 2018. С. 61–62.

54. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Сулейманов С.-Б. Алгоритми охоплення даних для підвищення економічної ефективності й експорту держави та її регіонів. *Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання* (14–19 травня 2018 р., Івано-Франківськ, Україна). Івано-Франківськ: Прикарпатський національний університет імені В.Стефаника, 2018. С. 109–112.

55. Горбачук В.М., Кошулько А.І., Дунаєвський М.С. Питання асиметрії інформації та несприятливого відбору в організації охорони здоров'я. *Здоров'я і суспільні виміри в академічному просторі та поза ним* (23 травня 2018 р., Київ, Україна). Київ: НаУКМА, 2018. С. 27–29.

56. Gorbachuk V., Dunaievskiy M., Morozov O. The method of finding target export structure. *PDMU* (July 3–8, 2018, Lankaran–Baku, Azerbaijan). Kyiv: Taras Shevchenko University of Kyiv, 2018.

57. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Сулейманов С.-Б. Математичне моделювання міжнародної конкуренції. *Матеріали ХІХ міжнародної конференції з математичного моделювання, присвяченої 250-річчю з дня народження Жана Батиста Жозефа Фур'є* (17–21 вересня 2018 р., Херсон, Україна). Херсон: Херсонський національний технічний університет, 2018. С. 10.

58. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Сулейманов С.-Б. До розв'язання

проблеми ефективності й рівності. *Контроль і управління в складних системах* (15–17 жовтня 2018 р., Вінниця, Україна). Вінниця: ВНТУ, 2018. С. 61.

59. Dunaievskiy M.S., Suleimanov S.-B. Dynamic assessment of economic efficiency in territorial-administrative units. *Modelare matematica, optimizare si tehnologii informationale* (November 12–16, 2018, Chisinau, Moldova). Chisinau, Moldova: Academia de transporturi, informatica si comunicatii, 2018.

60. Горбачук В.М., Кошулько А.І., Дунаєвський М.С. Залежність рівнів безпеки, ціни й вартості ядерної енергії. *Проблеми современной ядерной энергетики* (14–16 ноября, Харьков, Украина). Харьков: Харьковский национальный университет имени В.Н.Каразина, 2018. С. 49–50.

61. Горбачук В.М., Колесник Ю.С., Шпиґа С.П., Дунаєвський М.С. Алгоритм поквартального оцінювання економічної ефективності районів і міст регіону України. *Інформаційні технології та взаємодії* (20–21 листопада 2018 р., Київ, Україна). Київ: КНУ імені Т.Шевченка, 2018. С. 344–345.

62. Дунаєвський М.С. Від ЗДАС до Розумної Держави (smart state). *Історія, сьогодення та перспективи розвитку інформаційних технологій в Україні та світі. Глушковські читання* (21 листопада 2018 р., Київ, Україна). Київ: НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського», 2018. С. 45.

63. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С. Аналіз результатів оцінювання динаміки економічної ефективності та експорту регіонів України за допомогою програмно-комп'ютерних засобів. *Нейронауки та когнітивні системи в економіці* (19 лютого 2019 р., Київ, Україна). Київ: НаУКМА, 2019. С. 7–10.

64. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Сулейманов С.-Б. До ефективності торгівлі високотехнологічною продукцією. *Інноваційні ідеї в економічній науці: пошуки вирішення сучасних проблем* (11–12 квітня 2019 р., Київ, Україна). Київ: НаУКМА, 2019. С. 22–24.

65. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Сирку А.А., Сулейманов С.-Б. До розробки сучасних конкурсів. *Теорія прийняття рішень* (15–20 квітня 2019 р., Ужгород,

Україна). Ужгород: УжНУ, 2019. С. 15–16.

66. Горбачук В.М., Єрмольєв Ю.М., Єрмольєва Т.Ю., Дунаєвський М.С. Застосування квантильної регресії для оцінювання еколого-економічних ризиків. *Обчислювальний інтелект* (15–20 квітня 2019 р., Ужгород, Україна). Ужгород: УжНУ, 2019. С. 188–189.

67. Горбачук В., Гавриленко С., Голоцуков Г., Дунаєвський М. Засади розвитку хмарних технологій. *Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання* (18–19 травня 2020 р., Івано-Франківськ, Україна). Івано-Франківськ: Прикарпатський національний університет імені В.Стефаника, 2020. С. 82–83.

68. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Сулейманов С.-Б. Аналіз ланцюгів вартості на основі нових технологій енергонакопичення. *Удосконалювання енергоустановок методами математичного і фізичного моделювання* (8–10 жовтня 2019 р., Харків, Україна). Секція 3. Харків: Інститут проблем машинобудування імені А.М.Підгорного НАН України, 2019. С. 20–21.

69. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С. До економічної організації децентралізації. *Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем* (20–22 листопада 2019 р., Дніпро, Україна). Дніпро: ДНУ імені О.Гончара, 2019. С. 69–70.

70. Дунаєвський М.С., Таран Л.О. Порівняльний аналіз ролі фактору водних ресурсів для економіки районів Дніпропетровщини та Запоріжчини. *Тенденції розвитку публічних та корпоративних секторів економіки України в умовах макроекономічної нестабільності* (29 січня 2020 р., Київ, Україна). Київ: НаУКМА, 2020. С. 34–36.

71. Дунаєвський М.С. Оцінка готовності Одещини до пом'якшення карантинних антисоvіd-19 заходів. *Проблеми міжнародної міграції: оцінка та перспективи вирішення* (16 травня 2020 р., Одеса, Україна). Одеса: ОНУ імені І.І. Мечникова, 2020. С. 115–119.

72. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Морозов О.О. Лідерство в сучасних ланцюгах постачання. *Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем* (18–

- 20 листопада 2020 р., Дніпро, Україна). Дніпро: ДНУ імені О.Гончара, 2020.
73. Дунаєвський М.С. Кібернетика та методи біоінформатики в сфері охорони здоров'я. *Глушковські читання* (18 грудня 2020 р., Київ, Україна). Київ: КНУ імені Т.Шевченка, 2020. С. 58–61.
74. Gorbachuk V., Dunaievskiy M., Syrku A. Epidemic effects in network industries. *International Conference on Software Engineering* (April 12–14, 2021, Kyiv, Ukraine). Kyiv: National Aviation University, 2021. P. 68–72.
75. Горбачук В., Гавриленко С., Дунаєвський М. До участі України в Європейській хмарі відкритої науки. *Global and regional problems of informatization in society and nature using 2021* (May 13–14, 2021, Kyiv, Ukraine). Kyiv: National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, 2021. P. 169–171.
76. Dunaievskiy M. Suleimanov S.-B. The target function for economic-ecological system at high risk *Modern Stochastics: Theory and Applications V* (June 1–4, 2021, Kyiv, Ukraine). Kyiv: Taras Shevchenko National University of Kyiv, 2021. P. 66.
77. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Сулейманов С.-Б., Симонов Д.І., Батіг Л.О. Обчислення рівноважного внеску до мережевої громади. *Actual problems of fundamental science* (June 1–5, 2021, Lutsk, Ukraine). Lutsk: Lesya Ukrainka Volyn National University, 2021. P. 160–163.
78. Горбачук В., Голоцуков Г., Дунаєвський М., Ніколенко Д. Машинне навчання та прийняття рішень. *Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання* (5–10 липня 2021 р., Івано-Франківськ, Україна). Івано-Франківськ: Прикарпатський національний університет імені В.Стефаника, 2021. С. 92–93.
79. Горбачук В., Дунаєвський М., Батіг Л. Нова енергетика й економічні зміни. *Економіка. Фінанси. Бізнес. Парадигмальні зрушення в економічній теорії XXI ст.* (28 вересня – 1 жовтня 2021р., Київ, Україна) А.І. Ігнатюк (ред.) Київ: КНУ імені Т.Шевченка, 2021. С. 45–47.
80. Дунаєвський М.С. Емпіричні середні в задачах стохастичного програмування. *Інтелектуальні рішення* (29 вересня 2021 р., Київ, Україна). В.Є. Снитюк (ред.).

Київ – Ужгород: КНУ імені Т.Шевченка, 2021. С. 111–112.

81. Dunaievskyi M.S. Optimal inventory management in condition of uncertainty. *Mathematical Modeling, Optimization and Information Technologies* (November 15–19, 2021, Chisinau (Moldova), Kyiv (Ukraine), Batumi (Georgia)). Chisinau: Moldova State University; Kyiv: V.M.Glushkov Institute of Cybernetics of the NAS of Ukraine; Batumi: Batumi Shota Rustaveli State University, 2021. P. 47–50.

82. Дунаєвський М.С. Оптимальне управління запасами як складова автоматизованого організаційного управління. *Глушковські читання* (2 грудня 2021, Київ, Україна). Київ: НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», 2021. С. 80–83.

83. Gorbachuk V.M., Dunaievskyi M.S., Suleimanov S.-B., Batih L.O. To advanced technologies of modern conflict. *Nonlinear analysis and applications. applications* (April 4–6, 2022, Kyiv, Ukraine). Kyiv: NTUU «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», 2022. P. 23.

84. Горбачук В.М., Бардадим Т.О., Лупей М.І., Ніколенко Д.І., Дунаєвський М.С., Сулейманов С.-Б., Батіг Л.О., Симонов Д.І. Інноваційні технології великих даних для підвищення безпеки АЕС. *Перспективи впровадження інновацій у атомну енергетику* (30 вересня 2022 р., Київ, Україна). Київ: Українське ядерне товариство, 2022. С. 15–16.

85. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С. Математичні моделі підвищення ефективності децентралізованих систем та їх застосування. *Проблеми вищої математичної освіти: виклики сучасності* (11–12 жовтня 2022 р., Вінниця, Україна). Вінниця: Вінницький національний політехнічний університет, 2022. 13 с.

86. Gaivoronski A., Gorbachuk V., Dunaievskyi M., Suleimanov S.-B. Digital platforms to deal with the information asymmetry problem. *Information Technology and Implementation* (December 01, 2022, Kyiv, Ukraine). V.Snytyuk (ed.). Kyiv: Taras Shevchenko National University of Kyiv, 2022. P. 44–45.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	23
РОЗДІЛ 1. ЕВОЛЮЦІЯ ПОНЯТТЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНИХ СИСТЕМ	34
1.1 Огляд літератури	34
1.2 Децентралізовані мережі	37
1.3 Прийняття рішень, невизначеність і хмарні технології	44
1.4 Прийняття рішень в системах економіки, екології, охорони здоров'я	49
1.5 Рівноважні інвестиції у кібербезпеку мережі ланцюгів постачання	56
1.6 Характеристики рівноваг ланцюгів постачання	63
1.7 Алгоритми оцінки ефективності та цільової структури експорту регіонів України	69
РОЗДІЛ 2. СТОХАСТИЧНІ МЕТОДИ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ЗА УМОВ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ.....	74
2.1 Застосування квантильної регресії для оцінювання еколого-економічних ризиків	74
2.2 Вартості досконалої інформації та стохастичного рішення.....	76
2.3 Моделювання фінансових криз	87
2.4 Обґрунтування дифузійної моделі впровадження інновацій та її застосування до поширення вакцинацій	101
2.4.1 Постановка проблеми	102
2.4.2. Математична модель	104
2.4.3 Очікувана тривалість входу нового продукту в ринок	109
2.4.4 Оцінювання параметрів моделі	111

РОЗДІЛ 3. МАТЕМАТИЧНІ МЕТОДИ ДЛЯ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ НА РИНКУ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ПОСЛУГ ТА В СФЕРІ ДЕРЖАВНИХ МАКРОФУНКЦІЙ	117
3.1 Стратегічна взаємодія провайдерів диференційованих Інтернет-послуг	117
3.1.1 Аналітична модель взаємодії провайдерів контенту та Інтернет-послуг	118
3.1.2 Чисельне моделювання взаємодії провайдерів диференційованих Інтернет-послуг	122
3.1.3 Моделювання кількох диференційованих Інтернет-послуг	126
3.2 Втрати агрегованої ефективності при досягненні міжрегіональної рівності	129
3.3 Алгоритм розрахунку цільової досяжної структури товарного експорту України та її регіонів	141
РОЗДІЛ 4. АЛГОРИТМИ ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА ЦІЛЬОВОЇ СТРУКТУРИ ЕКСПОРТУ РЕГІОНІВ УКРАЇНИ ТА ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ	160
4.1 Динаміка індексів виявленої порівняльної переваги Луганщини за групами товарів у 2011–2016 роках	160
4.2 Поквартальне оцінювання економічної ефективності й цільової структури експорту Луганщини.....	163
4.3 Поквартальне оцінювання економічної ефективності й структури експорту Кіровоградщини у 2017–2018 рр.	173
4.4 Поквартальне оцінювання економічної ефективності й структури експорту Тернопільщини у 2017–2018 рр.	186
ВИСНОВКИ.....	197
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	199
ДОДАТКИ.....	224

Додаток 1. Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації.....	224
Додаток 2. Порівняльна ефективність районів Луганщини	240
Додаток 3. Порівняльна ефективність районів Кіровоградщини	241
Додаток 4. Порівняльна ефективність районів Тернопільщини	242

ВСТУП

Актуальність теми. Термін «Децентралізація» у «Великому тлумачному словнику сучасної української мови» визначається як система управління, за якої частина функцій центральної влади переходить до місцевих органів самоуправління. Під економічною ефективністю та ефективністю управління тут і надалі в дисертації мається на увазі ступінь досягнення максимально можливого рівня виробництва та послуг при наявних обмеженнях на фактори праці та капіталу. Ефективність децентралізованої системи визначається додатковими перевагами більш детального аналізу економічної системи країни на рівні регіонів, пошуку кращих стратегій розвитку, виявлення незадіяних та недовикористаних ресурсів, створення нових або посилення існуючих слабких факторів виробництва, досягнення збалансованої економіки загалом на протигагу менш гнучкому узагальнюючому централізованому підходу на основі агрегованих даних.

В останнє десятиліття Україна активно перебудовує міжнародну структуру експорту зміщуючи пріоритет як на Європейський так і на Азійський регіони, та зменшуючи частку міжнародної торгівлі з країнами СНД. В більш висококонкурентному економічному середовищі зростає роль якості, інновацій, оптимального задіяння факторів праці та капіталу не тільки на рівні країни загалом, але й на рівні регіонів зокрема. Більшої ваги набуває ефективність взаємодії корпоративного сектору з державними інституціями. Україна з відносно високим індексом людського капіталу, демократичним устроєм, відкритістю до найкращих практик ведення бізнесу, прагненням до модернізації та застосування сучасних технологій має відповідний потенціал економічного зростання.

Новітню реформу децентралізації розпочато 2014 року з прийняттям концепції реформи місцевого самоврядування та територіальної організації влади в Україні, відповідних змін до Податкового та Бюджетного кодексів в частині фінансової децентралізації, прийняття законів України про співробітництво та

добровільне об'єднання територіальних громад. Прийняті нормативно-правові акти та зміни до існуючих законів відповідають рамковим положенням Європейської хартії місцевого самоврядування (1985р.) та закладають фундамент формування об'єднаних територіальних громад (ОТГ). Зміст місцевого самоврядування полягає у гарантованому державою праві та можливостях самих ОТГ вирішувати в межах законодавства частину громадських повноважень.

ОТГ отримали повноваження та ресурс, які мають міста обласного значення, зокрема – зарахування до місцевих бюджетів ОТГ 60% податку на доходи фізичних осіб на власні повноваження. Також, на місцях залишаються 100% надходження від податків: єдиного, на прибуток підприємств і фінансових установ комунальної власності та податку на майно (нерухомість, земля, транспорт). ОТГ мають прямі міжбюджетні відносини з державним, для виконання делегованих державою повноважень їм надаються відповідні трансферти (дотації, освітня та медична субвенції, субвенція на розвиток інфраструктури громад тощо). Власні доходи місцевих бюджетів з 2014 по 2019 рік збільшилися на 200 млрд. грн. (з 68,6 млрд. грн. до 267 млрд. грн) (<https://www.kmu.gov.ua/>).

Над реформою децентралізації працюють Президент України, Офіс Президента України, Головний департамент регіонального та кадрового розвитку та Департамент місцевого самоврядування та децентралізації, Комітет Верховної Ради України з питань державного будівництва, регіональної політики та місцевого самоврядування, Міністерство розвитку громад та територій України, Асоціація сільських, селищних рад та об'єднаних громад, Українська асоціація районних та обласних рад, Асоціація об'єднаних територіальних громад, Асоціація міст України, Обласні державні адміністрації, Районні ради, Районні державні адміністрації, Програма "U-LEAD з Європою".

Враховуючи вищенаведене, актуальність дослідження децентралізованих систем, аналізу та розробки механізмів підвищення їх ефективності на основі

математичних алгоритмів та моделей, застосування запропонованих рішень на реальних економічних даних регіонів України виглядає цілком обґрунтованою.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Частина досліджень, що представлені в дисертаційній роботі виконано в рамках проектів Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України:

проект «Розробка програмно-комп'ютерних засобів поквартального оцінювання економічної ефективності та цільової структури експорту регіонів України» (номер державної реєстрації 0118U001706) 2018 р.;

міжнародний проект Норвегії, України, Грузії, Молдови «Поглиблена спільна освітньо-наукова програма з управління ризиками в промисловості та сервісах в умовах глобальних економічних, технологічних та екологічних змін: розширена версія» СРЕА-LT-2016/10003 (номер державної реєстрації 0118U006686) з 2018 р.;

проект «Розробити методи трансформації документоорієнтованих інформаційних систем в хмарні сервіси» (номер державної реєстрації 0118U001111) у 2020–2022 рр.;

проект Національного фонду досліджень України «Аналітичні методи та машинне навчання в теорії керування і прийнятті рішень за умов конфлікту та невизначеності» (номер державної реєстрації 0120U105242) у 2020 р.;

проект Національного фонду досліджень України «Аналітичні методи та машинне навчання в теорії керування і прийнятті рішень за умов конфлікту та невизначеності» (номер державної реєстрації 0121U111617) у 2021 р.;

проект «Розроблення проектних рішень та плану заходів по їх реалізації щодо модернізації та розвитку АІС Президія з урахуванням сучасних та перспективних інформаційних технологій» (номер державної реєстрації 0121U112884) у 2021 р.;

проект Відділення цільової підготовки Київського національного університету імені Тараса Шевченка при НАН України «Моделі і методи підтримки прийняття рішень для кіберінфраструктур та інтелектуальних інфраструктур» (номер державної реєстрації 0122U002465) з 2022 р.;

проект Національного фонду досліджень України «Аналітичні методи та машинне навчання в теорії керування і прийнятті рішень за умов конфлікту та невизначеності» (номер державної реєстрації 0123U102943) у 2023 р.;

проект «Розробити математичні моделі архітектури цифровізованих інфраструктурних реєстрів у хмарному середовищі» (номер державної реєстрації 0123U100813) з 2023 р.;

проект «Розробити моделі підвищення корисності та самопідсилення для децентралізованих систем аналізу великих даних» (номер державної реєстрації 0123U103045) з 2023 р.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є дослідження децентралізованих систем, аналіз та розробка механізмів підвищення їх ефективності на основі математичних алгоритмів та моделей, застосування запропонованих рішень на реальних економічних даних регіонів України. Серед основних завдань:

1. Дослідити поняття децентралізованої системи та розробити ігрову модель мережі ланцюгів постачання з урахуванням інвестицій учасників у кібербезпеку.

2. Дослідити стохастичні методи підтримки прийняття рішень за умов невизначеності та проаналізувати перспективність застосування дифузійної моделі інновацій Басса до поширення вакцинацій.

3. Дослідити математичні методи для підтримки прийняття рішень на ринку інформаційно-комунікаційних послуг та в сфері державних макрофункцій.

3.1 Зокрема, застосувати модель Штакельберга для моделювання ринкової взаємодії контент провайдера та провайдера Інтернет-послуг. Встановити особливість прийняття рішень на такому ринку.

3.2 Розробити алгоритм розрахунку цільової досяжної структури товарного експорту України та її регіонів.

4. Розробити алгоритм оцінки ефективності регіону та застосувати його на реальних економічних даних Тернопільщини, Кіровоградщини та Луганщини.

Виділити кластери лідери кожної із областей. Оцінити експортний потенціал відповідно алгоритму розрахунку цільової досяжної структури експорту.

Об'єкт дослідження – децентралізована економічна система, мережа ланцюгів постачання, ринок інформаційно-комунікаційних послуг, ефективність регіонів та їх розвиток за стратегії децентралізації.

Предмет дослідження – моделі та методи прийняття рішень в децентралізованих системах (зокрема модель зростання економіки з виробничими функціями Кобба–Дугласа)

Методи дослідження – математично-економічне моделювання, статистичний метод дослідження, емпіричний аналіз, порівняння, ідеалізація, формалізація, абстрагування, індукція та дедукція.

Наукова новизна отриманих результатів. Запропоновано нові алгоритми оцінки ефективності та алгоритм динамічного розрахунку оптимальної цільової досяжної структури товарного експорту. Вперше для ряду регіонів України, відповідно до запропонованих алгоритмів, виконано обчислення на реальних статистичних даних.

Запропоновано новий ітеративний алгоритм для розв'язання задачі пошуку рівноважних інвестицій у кібербезпеку МЛП, який на кожній ітерації дає в явному вигляді співвідношення для трансакцій продукту, рівнів безпеки та множників Лагранжа, пов'язаних з бюджетними обмеженнями.

Вперше обґрунтовано застосування дифузійної моделі інновацій Басса до поширення вакцинацій.

Практичне значення отриманих результатів полягає в розробці програмно-комп'ютерних засобів поквартального оцінювання економічної ефективності та цільової структури експорту регіонів України, що може бути в основі системи підтримки прийняття макроекономічних рішень. Подібна система має перспективу впровадження в Мінекономіки України, а також може бути використана іншими органами державного управління та місцевого

самоврядування для прийняття оптимальних рішень на місцевому рівні. **Особистий внесок здобувача.** Автором самостійно отримано основні результати дисертаційного дослідження. У співавторстві опубліковано ряд статей, в яких проведено оцінку економічної ефективності використання факторів праці та капіталу, розраховані цільові структури експорту Тернопільщини (Горбачук В.М., Неботов П.Г. 2018), Кіровоградщини (Горбачук В.М., Шпиґа С.П. 2018) та Луганщини (Горбачук В.М., Симонов Д.І. 2018).

Особистим внеском в публікаціях 1, 3, 4, 6–13, 15–19, 24–26, 28, 29, 32, 36, 37, 40–42, 44 з наведеного в анотації списку публікацій здобувача є частина досліджень та розробки концепції. Особистим внеском в публікаціях 2, 5, 20, 27, 30, 31, 33–35, 38, 39, 43 є аналіз та інтерпретація даних досліджень.

Публікації. Результати досліджень та проведених емпіричних оцінок опубліковані в 86 наукових працях. Серед них три публікації внесені до міжнародної наукометричної бази Scopus, 8 публікацій у фахових виданнях за спеціальністю, 4 розділи у монографіях виданих у державах ЄС, 29 публікацій в інших фахових виданнях, 42 тез доповідей та матеріалів конференцій.

Публікації [1–3] проіндексовані наукометричною базою Scopus. В [1] досліджено досвід успішної економічної децентралізації країни. Проаналізовано механізм знаходження оптимальних рівнів факторів праці та капіталу регіону на основі моделі Кобба-Дугласа, зазначено фактори динамічного формування міжрегіональних співвідношень. В [2] обґрунтовано застосування дифузійної моделі інновацій Басса до поширення вакцинацій. Ринок нових продуктів є прикладом децентралізованої системи, оскільки до конкуренції активно залучаються нові виробники товару. В [3] досліджено алгоритм пошуку рівноваги Неша, – узагальнене поняття рівноваги Курно на кількох гравців (учасників ринку), кожний з яких діє виключно у своїх власних інтересах, тобто некооперативно. Рівновага Неша дозволила розв’язати задачу пошуку рівноважних інвестицій у кібербезпеку децентралізованої за своєю природою

мережі ланцюгів постачання (МЛП) [4]. Дослідження в сфері охорони здоров'я надалі досліджуються в публікаціях [5] (в аспекті регіональної політики) та [6] (в аспекті використання програмного забезпечення для моделювання). В публікаціях [7–11] досліджена тематика еволюції обчислювальних потужностей, хмарних технологій, взаємодії учасників ринку інформаційно-комунікаційних послуг. Зокрема в публікації [9] встановлено аналітичну функцію реакції послідовника (провайдера Інтернет сервісу) (ISP) на рішення лідера (контент провайдера) (CP). Вагомий вплив на дослідницький світогляд здобувача мали публікації [12–27]. Публікація [12] під час дослідження та моделювання механізму виникнення фінансових криз. Публікації [13–16], [18], [20–26] при дослідженні моделей прийняття рішень за умов невизначеності та відповідних систем підтримки прийняття рішень.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертації були представлені, обговорювалися та доповідалися на таких міжнародних та вітчизняних науково-практичних конференціях:

«IEEE Conference on Advanced Trends in Information Theory» (December 18–20, 2019, Kyiv, Ukraine) [1];

«Штучний інтелект та інтелектуальні системи» (17–18 жовтня 2017 р., Київ, Україна) [28];

«Глобальні виміри захисту економічної конкуренції» (27 жовтня 2017 р., Київ, Україна) [29];

«Інформаційні технології та взаємодії» (8–10 листопада 2017 р., Київ, Україна) [30];

«Глушковські читання» (13 грудня 2017 р., Київ, Україна) [31];

«Сучасна інформатика: проблеми, досягнення та перспективи розвитку» (13–15 грудня 2017 р., Київ, Україна) [32];

«Глобальні виміри захисту економічної конкуренції» (28 лютого 2018 р., Київ, Україна) [33];

«Nonlinear analysis and applications» (April 12, 2018, Kyiv, Ukraine) [34];

«Інноваційні ідеї в економічній науці: пошуки вирішення сучасних проблем» (19–20 квітня 2018 р., Київ, Україна) [35];

«Інформаційно-комп'ютерні технології – 2018» (20 квітня 2018 р., Житомир, Україна) [36];

«Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання» (14–19 травня 2018 р., Івано-Франківськ, Україна) [37];

«Здоров'я і суспільні виміри в академічному просторі та поза ним» (23 травня 2018 р., Київ, Україна) [38];

«PDMU-2018» (July 3–8, 2018, Lankaran–Baku, Azerbaijan) [39];

«Міжнародна конференція з математичного моделювання, присвячена 250-річчю з дня народження Жана Батиста Жозефа Фур'є» (17–21 вересня 2018 р., Херсон, Україна) [40];

«Контроль і управління в складних системах» (15–17 жовтня 2018 р., Вінниця, Україна) [41];

Modelare matematica, optimizare si tehnologii informationale. (November 12–16, 2018, Chisinau, Moldova) [42];

«Проблемы современной ядерной энергетики» (14–16 ноября 2018 г., Харьков, Украина) [43];

«Інформаційні технології та взаємодії» (20–21 листопада 2018 р., Київ, Україна) [44];

«Глушковські читання» (21 листопада 2018 р., Київ, Україна) [45];

«Нейронауки та когнітивні системи в економіці» (19 лютого 2019 р., Київ, Україна) [46];

«Інноваційні ідеї в економічній науці: пошуки вирішення сучасних проблем» (11–12 квітня 2019 р., Київ, Україна) [47];

«Обчислювальний інтелект» (15–20 квітня 2019 р., Ужгород, Україна) [48];

«Теорія прийняття рішень» (15–20 квітня 2019 р., Ужгород, Україна) [49];

«Norwegian-Eurasian workshop on new resilience challenges in ecological-economic problems at the digital era» (Київ, вересень 23-25, 2019);

«Удосконалювання енергоустановок методами математичного і фізичного моделювання» (8–10 жовтня 2019 р., Харків, Україна) [50];

«Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем» (20–22 листопада 2019 р., Дніпро, Україна) [51];

«Тенденції розвитку публічних та корпоративних секторів економіки України в умовах макроекономічної нестабільності» (29 січня 2020 р., Київ, Україна) [52];

«Проблеми міжнародної міграції: оцінка та перспективи вирішення» (16 травня 2020 р., Одеса, Україна) [53];

«Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання» (18–19 травня 2020 р., Івано-Франківськ, Україна) [54];

«International Conference High Performance Computing HPC-UA 2020» (6–7 November 2020, Kyiv, Ukraine) [55];

«Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем» (18–20 листопада 2020 р., Дніпро, Україна) [56];

«Глушковські читання» (18 грудня 2020 р., Київ, Україна) [57];

«International Conference on Software Engineering» (April 12–14 2021, Kyiv, Ukraine) [58];

«Global and regional problems of informatization in society and nature using 2021» (13–14 May 2021, Kyiv, Ukraine) [59];

«Modern Stochastics: Theory and Applications V» (June 1–4 2021, Kyiv, Ukraine) [60];

«Actual problems of fundamental science» (1–5 June 2021, Lutsk, Ukraine) [61];

«Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання» (5–10 липня 2021р, Івано-Франківськ, Україна) [62];

«Економіка. Фінанси. Бізнес. Парадигмальні зрушення в економічній теорії XXI ст.» (28 вересня – 1 жовтня 2021 р., Київ, Україна) [63];

«Інтелектуальні рішення – Симпозіум» (29 вересня 2021 р., Київ – Ужгород, Україна) [64];

«Mathematical Modeling, Optimization and Information Technologies» (November 15–19 2021, Chisinau (Moldova), Kyiv (Ukraine), Batumi (Georgia)) [65];

«Глушковські читання» (2 грудня 2021 р., Київ, Україна) [66];

«Nonlinear analysis and applications» (April 4–6 2022, Kyiv, Ukraine) [67];

«Перспективи впровадження інновацій у атомну енергетику» (30 вересня 2022 р., Київ, Україна) [68];

«Проблеми вищої математичної освіти: виклики сучасності» (11–12 жовтня 2022 р., Вінниця, Україна) [69];

«Information Technology and Implementation» (December 01 2022, Kyiv, Ukraine) [70];

Штучний інтелект (17–19 жовтня 2017 р., Київ, Україна) [71];

Штучний інтелект (18–19 жовтня 2018 р., Київ, Україна) [72];

«Питання оптимізації обчислень» (24 –27 вересня 2019 р., Київ, Україна) [73].

Інші публікації. Публікації [74–103] містять результати суміжних досліджень або є іншими фаховими публікаціями, зокрема за технічними та економічними спеціальностями. Публікації економічного напрямку [83–90], [92–99], [101–103] розкривають алгоритм розрахунку цільової досяжної структури товарного експорту України та її регіонів, а також алгоритм оцінки ефективності регіону. Здійснено такий розрахунок для Закарпаття, Кіровоградщини, Запоріжчини, Одещини, Миколаївщини, Тернопільщини, Луганщини. Публікації [75] та [76] є розділами монографій присвячених сфері охорони здоров'я, увага до якої значно зросла на фоні поширення вірусу Covid-19. Використання математичних моделей дозволяє значно покращити рівень адміністрування у цій сфері, а також знайти оптимальний баланс між ризиками в сфері охорони здоров'я

та ризиками економічного спаду. В публікаціях [81] та [82] досліджується тематика оптимального природокористування.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 223 найменувань, та додатків. Містить 40 таблиць. Повний обсяг дисертації становить 242 сторінки.

РОЗДІЛ 1. ЕВОЛЮЦІЯ ПОНЯТТЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНИХ СИСТЕМ

1.1 Огляд літератури

В багатьох технологічних галузях важливою є проблема розробки ефективних децентралізованих механізмів розміщення деякого подільного ресурсу. Прикладами є менеджмент Інтернет-трафіку, розподіл пропускнуої здатності для учасників бездротових спеціальних мереж, розміщення капіталу серед елементів децентралізованої системи, вибір (експортної) спеціалізації регіонів держави тощо. Серед подібних механізмів відомі ефективні механізми розміщення пропорційного сигналам [104], які максимізують суспільний добробут [105] з мінімальними вимогами до ресурсу щодо сигналізувань і обчислень. За певних умов джерелом сигналів може слугувати динаміка спостережуваних характеристик подібних систем, наприклад, економічних систем регіонального розвитку сусідніх держав [106]. Для класу таких механізмів отримуються межі вигравів, будується послідовність схем, яка наближається до цих меж з довільною точністю, пропонується локальна стійка схема узгодження для всього класу, моделюються виграти та міри ефективності [104].

Засади та майбутнє інформаційно-комунікаційних технологій (ІКТ), особливо мереж і систем зв'язку, спираються на синтез незалежних компонентів, що потребують децентралізованого управління, оскільки масштаб подібних систем і неоднорідність структури власності їх елементів унеможливають прийняття своєчасних децентралізованих рішень [107]. Тому клієнти, які бажають отримувати доступ до таких систем, мають використовувати локальну інформацію для переговорів про надання послуг, часто опосередковано через електронні служби. Якість обслуговування (quality-of-service, QoS), отримувана кінцевими споживачами, визначається поведінкою популяції клієнтів (або їхніх електронних

агентів (proxies)), які одночасно звертаються для отримання частки дефіцитного спільного ресурсу. Хоча наявні протоколи (наприклад, протокол управління передачею (transmission control protocol, TCP)) не налаштовуються до конкретних потреб користувача, поява однорангових (peer-to-peer, P2P) застосунків, застосунків для голосу і відео передбачає еволюцію до інтелектуальніших служб (агентів), які чіткіше враховують уподобання користувача чи переваги застосунку й адаптують свої дії для кращого задоволення потреб кінцевих користувачів. Така взаємодія між егоїстичними агентами, які конкурують за спільний продукт, уможливорює застосування економічних і теоретико-ігрових принципів як основних засобів аналізу і проектування розміщення мережевих ресурсів.

Ключові компоненти більшості комунікаційних мереж (пропускна здатність на ланці (link) Інтернету чи супутника, буферний простір, обсяг хмарного сховища даних) разом з іншими життєво важливими компонентами ІКТ (завантаженість процесора, обсяг оперативної пам'яті, дисковий простір) можна охарактеризувати як довільно подільний ресурс в силу величини їхньої ємності та гнучкості, яку можна змінювати для кожної підсистеми чи кожного елемента системи. Постає потреба в обґрунтуванні механізмів розміщення подільних ресурсів, залежного від метрик обчислень і сигналізувань у технологічних галузях. Аукціони акцій [108] (автор роботи – Нобелівський лауреат 2020 р., три аспіранти якого теж стали Нобелівськими лауреатами) та узагальнений аукціон Вікрі (Нобелівський лауреат 1996 р.) [109], який є прикладом механізму Вікрі–Кларка–Гроувза [109–111], потребують від кожного агента подавати сигнал, що характеризує всю структуру оцінювання цим агентом, передбачаючи нескінченновимірність результуючих задач. Поділ ресурсу на пакети прийнятних розмірів вестиме до NP-повної задачі у великому комбінаторному просторі [112]. Для ціноутворення в Інтернеті введено поняття інтелектуальних (smart) ринків, де пакети переноситимуть ціни попиту (bids), які визначають відповідний рівень обслуговування [113]. Хоча модель таких ринків може вести до того, що ресурс використовуватиметься не на повну

потужність, і вимагати обчислень для впорядкування ставок або заявок, поняття застосування управління, ґрунтованого на даних ринку, для комунікаційних мереж зберігалось і поширювалось. Узагальнюючи аукціон Вікрі, було запропоновано аукціон прогресивної другої ціни, який вимагає двовимірного сигналізування та обсягу обчислень $O(N^2)$ для визначення розміщення ресурсів, де N – число конкуруючих агентів [114]. Хоча такий аукціон має майже оптимальну ефективність і бажані властивості розкриття інформації, на практиці він не дає результату протягом деякого часу перед закриттям аукціону, що суттєво обмежує його застосування у багатьох високодинамічних середовищах реального часу.

Більшість робіт з розміщення мережевих ресурсів ґрунтована на механізмі пропорційно справедливого (proportionally fair, PF) механізму ціноутворення [107, 115]. Однак ефективність цього механізму ціноутворення (відносно максимізації суспільного добробуту) втрачається при конкуренції чи кооперації агентів, коли вони включають у свої стратегії взаємозв'язок між ціною та заявками, перетворюючи механізм на аукціон [116, 117]. Водночас ефективність відповідного аукціону не менша 75% ефективності оптимального аукціону [117]. Запропоновано механізм підвищення ефективності до 87.5% від ефективності оптимального аукціону для $N = 2$, але ефективність цього механізму дещо спадає при збільшенні N [118].

Уваги заслуговують механізми з одновимірним сигналізуванням та вартістю $O(N)$ обчислень для пошуку розміщень N сигналів, оскільки ці механізми задають мінімальні рівні кожного довільного розбиття подільного ресурсу. Хоча PF-аукціон (з PF-механізмом ціноутворення) є оптимальним при початковому розширенні, коли вартості є відомими апіорі, а схема розміщення є пропорційною сигналам, цей аукціон загалом не буває ефективним. Можна отримати нескінченний підклас ефективних механізмів пропорційного сигналам розміщення (efficient signal proportional allocation, ESPA), які завжди максимізують суспільний добробут для довільного набору агентів з квазілінійними

корисностями [119]. Отже, ESPA-механізми є оптимальними засобами для розміщення подільних мережевих ресурсів, коли цільовими метриками є ефективність (суспільний добробут для стратегічних агентів), обчислювальна вартість і простір сигналізування. Враховуючи нескінченність підкласу, можна оптимізувати таку вторинну метрику, як генерування виручки, зберігаючи ефективність. Для класу ESPA-механізмів можна оцінити межі виручки і запропонувати способи досягнення цих меж з довільною точністю. Також можна представити локально стійкий децентралізований протокол узгодження та результати імітаційного моделювання, які ілюструють ефективність ESPA-механізмів і різні властивості генерування виручки [119].

1.2 Децентралізовані мережі

Змішану економічну структуру, де уряд продовжує відігравати головні ролі в економіці, в якій ринок стає дедалі більшою рушійною силою, можна вбудувати у стандартну модель економічного зростання, враховуючи проблему агентства між центральним і місцевими урядами. Щоб стимулювати місцевих керівників, центральний уряд запроваджує економічне змагання, яке генерує не лише задумані стимули для розвитку місцевих економік, але й короткострокові проекти для отримання швидких результатів. У складній урядовій системі, де центральний уряд співпрацює з регіональними урядами на рівнях провінції, міста, району, селища, регіональні уряди є головними гравцями в економічному розвитку, здійснюючи переважну більшість фіскальних витрат, відповідають за розвиток таких економічних інститутів та об'єктів інфраструктури на регіональних рівнях, як відкриття нових ринків і побудова доріг, магістралей та аеропортів; незважаючи на свою автономію в економічних і податкових питаннях, керівники регіональних урядів призначаються центральним урядом, а не обираються місцевими виборцями. Ключовим механізмом стимулювання регіональних

керівників є встановлене центральним урядом змагання між чиновниками різних регіонів однакового регіонального рівня, яке заохочує тих, хто досягає швидкого економічного зростання, і карає тих, у кого темпи економічного зростання виявляються найменшими. Ця система фіскального федералізму суттєво стимулювала економічне зростання великих держав, надаючи місцевим чиновникам як фіскальні бюджети, так і кар'єрну мотивацію. Однак таке стимулювання може вести також до поведінки місцевих керівників, орієнтованої на швидкі (тактичні) результати за рахунок досягнення стратегічних цілей.

Нехай економіка складається з M регіонів, а регіон $i = 1, \dots, M$ у період $t = 0, 1, 2, \dots$ має інфраструктуру G_{it} як громадський продукт, створений місцевим урядом і застосований для збільшення місцевої продуктивності. Цим продуктом можна вважати електроенергетику, мости, порти і магістралі. У ширшому сенсі можна інтерпретувати G_{it} як заходи і стратегії, вжиті урядом для підтримування і стимулювання місцевих ринку й економіки. Можна показати, що фірма вибирає капітал і працю, виходячи з рівня місцевої інфраструктури. Тому G_{it} служить прямим каналом для впливу урядових інвестицій на економіку. Враховуючи рішення фірм щодо використання праці та капіталу, регіональна економіка виявляє постійний рівень віддачі відносно G_{it} , що відповідає моделі ендогенного економічного зростання, за яку Пол Ромер удостоєний Нобелівської премії 2018 р.

У стандартній постановці місцевий випуск регіону i визначається виробничою функцією репрезентативної фірми $Y_{it} = A_{it}(K_{it})^\alpha(L_{it}G_{it})^{1-\alpha}$, де A_{it} – місцева продуктивність, K_{it} – обсяг використаного для виробництва капіталу, L_{it} – місцеві витрати праці, α – частка капіталу у випуску, $(1-\alpha)$ – частка праці у випуску [1]. Можна припустити, що місцева продуктивність A_{it} є однаково і незалежно розподіленою в часі. Ця продуктивність може мати певну міжрегіональну структуру, наприклад, структуру, залежну від здібностей

місцевого керівництва, залежних, у свою чергу, від кар'єрних стимулів, а також від спільного для всіх регіонів шоку продуктивності.

У кожний період $t = 0, 1, 2, \dots$ репрезентативна фірма регіону $i = 1, \dots, M$ спочатку спостерігає поточну продуктивність A_{it} , а потім обирає такі обсяги K_{it} , L_{it} , які максимізують її прибуток

$$Y_{it} - \Phi_{it} L_{it} - R K_{it}, \quad (1.1)$$

де Φ_{it} – конкурентна зарплата, а R – орендна ставка капіталу, рівна відсотковій ставці. Застосовуючи умови першого порядку максимізації функції 1.1 отримуємо:

$$0 = \frac{\partial Y_{it}}{\partial L_{it}} = (1 - \alpha) A_{it} (K_{it})^\alpha (L_{it})^{-\alpha} (G_{it})^{1-\alpha} - \Phi_{it}, \quad \Phi_{it} = (1 - \alpha) A_{it} (K_{it})^\alpha (G_{it})^{1-\alpha} \quad (1.2)$$

$$0 = \frac{\partial Y_{it}}{\partial K_{it}} = \alpha A_{it} (K_{it})^{\alpha-1} (L_{it} G_{it})^{1-\alpha} - R, \quad K_{it} = \left(\frac{\alpha A_{it}}{R} \right)^{\frac{1}{1-\alpha}} G_{it} \quad (1.3)$$

Підставивши отримане значення K_{it} у функцію 1.1 дістаємо оптимальний обсяг випуску фірми

$$Y_{it} = A_{it} (K_{it})^\alpha (L_{it} G_{it})^{1-\alpha} = A_{it} \left(\frac{\alpha A_{it}}{R} \right)^{\frac{\alpha}{1-\alpha}} (G_{it})^\alpha (1 \times G_{it})^{1-\alpha} = G_{it} (A_{it})^{\frac{1}{1-\alpha}} \left(\frac{\alpha}{R} \right)^{\frac{\alpha}{1-\alpha}},$$

який є прямо пропорційним обсягу G_{it} ; в силу рівняння 1.3 оптимальний обсяг капіталу є прямо пропорційним обсягу G_{it} , а в силу рівняння 1.2 оптимальний обсяг зарплати теж є пропорційним G_{it} :

$$\Phi_{it} = (1 - \alpha) A_{it} \left(\frac{\alpha A_{it}}{R} \right)^{\frac{\alpha}{1-\alpha}} (G_{it})^\alpha (G_{it})^{1-\alpha} = (1 - \alpha) \left(\frac{\alpha}{R} \right)^{\frac{\alpha}{1-\alpha}} G_{it} (A_{it})^{\frac{1}{1-\alpha}} = (1 - \alpha) Y_{it}.$$

Якщо праця є мобільною між регіонами, то обсяг зарплати підвищуватиметься внаслідок міграції трудових ресурсів до регіонів з вищими показниками G_{it} , а також внаслідок змагання між керівниками регіонів.

Створюючи більшу інфраструктуру регіону, місцевий уряд може сприяти продуктивності місцевої фірми. Тому інфраструктурні інвестиції служать ключовим каналом прямого стимулювання місцевої економіки від місцевого уряду. Проте місцевий уряд зіштовхується з питанням розподілу свого фіскального бюджету між інвестиціями (у місцеву інфраструктуру) та споживанням (урядові витрати).

У роботі [73] розробляється базова теорія глобальних ланцюгів постачання. Нехай світова економіка складається з довільної кількості країн, які мають один виробничий фактор (фактор праці) і виробляють один кінцевий продукт, що потребує континуум проміжних продуктів. Кінцевий продукт є результатом послідовних стадій виробництва проміжних продуктів, у процесі якого трапляється брак. Можна довести, що існує єдина рівновага вільної торгівлі, в якій країни з нижчими ймовірностями браку на всіх стадіях спеціалізуються на пізніших стадіях виробництва. Спираючись на цю просту теоретичну базу, можна запропонувати форму вертикальної спеціалізації взаємозалежних країн.

Явище вертикальної спеціалізації привертає в однаковій мірі увагу розробників стратегій, ділових лідерів, економістів. Можливість транскордонної фрагментації виробничих процесів впливає на обсяги, риси і наслідки міжнародної торгівлі. Залишаються відкритими питання механізмів впливу глобальних і локальних технологічних змін на участь різних країн в одному й тому самому ланцюгу постачання, а також механізмів впливу вертикальної спеціалізації на взаємозалежність держав.

Оскільки в моделях загальної рівноваги з довільною (великою) кількістю товарів і країн, незалежно від наявності послідовного виробництва, важко отримати зрозумілі передбачення порівняльної статистики, то потрібна проста теорія торгівлі з послідовним виробництвом. Для цього потрібні деякі ідеї щодо ієрархій у моделях часткової рівноваги для закритої економіки. Зосередимося на середовищі, в якому виробництво є послідовним і може містити брак. Моделі

ієрархій застосовувалися до вивчення питань міжнародної торгівлі. Наприклад, модель економіки знань використовується для дослідження транскордонних паросполучень між агентами з неоднорідними здібностями і відповідних наслідків для нерівності у даній державі. Нерівність у державі внаслідок ієрархій при торгівлі досліджувалася також в інших моделях. Припускається, що все населення даної держави має однакові здібності. Нехай організаційна проблема фірми при виробництві кінцевого товару полягає у виконанні виробничих стадій $j \in [0,1]$, де більший індекс відповідає більшій близькості до кінцевого продукту (нижчій стадії течії ланцюга постачання). Позначимо $x(j)$ вхідний обсяг (вхід) сумісних (з фірмою) проміжних послуг, які надає фірмі постачальник на стадії j (якщо ці послуги несумісні, то $x(j)=0$). Тоді обсяг випуску кінцевого товару з урахуванням його якості становить

$$q(m=1) = \theta \left(\int_0^{m=1} [x(j)]^\alpha I(j) dj \right)^{\frac{1}{\alpha}},$$

де θ – параметр продуктивності, $\alpha \in [0,1]$ – параметр симетричного ступеня заміни серед входів стадій, $I(j)$ – індикаторна функція, значення якої дорівнює 1 при виконанні всіх попередніх стадій $i \in [0, j]$ і дорівнює 0 в решті випадків. Хоча виробництво вимагає виконання всіх стадій, додатність α гарантує додатність випуску при несумісності входів на деяких стадіях: незважаючи на важливість усіх стадій з інженерної точки зору, можна допускати їх деяку замінюваність через те, що характеристики входів формують обсяг кінцевого продукту з урахуванням його якості. Наприклад, виробництво автомобіля вимагає чотири колеса, дві фари, одне кермо тощо, але цінність цього автомобіля для споживачів типово залежатиме від послуг, отриманих від цих різних компонентів, де вища якість певних частин означатиме гіршу якість інших.

Стимул фірми до інтеграції постачальників виявляє систематичну мінливість залежно від відносного положення (вище чи нижче течії ланцюга постачання)

постачальника у виробництві. Така залежність визначається еластичністю попиту на кінцевий товар. Можна враховувати різні джерела асиметрії поміж виробників кінцевих товарів і постачальників.

Переваги споживачів на ринках збуту відображають функції ціни попиту, які залежать від обсягу попиту на продукт і середнього рівня кібербезпеки у мережі ланцюгів постачання (МЛП). Тоді можна оцінювати вразливість до кібератак як МЛП, так і кожного торговця окремо. Відповідні умови рівноваги Неша можна визначати за допомогою задачі розв'язання певної варіаційної нерівності.

Для розв'язання задачі пошуку рівноважних інвестицій у кібербезпеку МЛП можна запропонувати ітеративний алгоритм, який на кожній ітерації дає в явному вигляді співвідношення для трансакцій продукту, рівнів безпеки та множників Лагранжа, пов'язаних з бюджетними обмеженнями. Цей алгоритм можна застосувати до обчислення розв'язків широкого кола чисельних прикладів інвестицій у кібербезпеку МЛП.

Чисельні приклади, скажімо, для кібератаки на Україну 27 червня 2017 р., сприятимуть глибшому розумінню впливу додаткових роздрібних торговців, бюджетних змін, функцій ціни попиту, фінансових збитків на рівноважні трансакції продукту та інвестиції у кібербезпеку, а також на вразливість МЛП чи роздрібного торговця при бюджетних обмеженнях.

У роботі [4] розробляється теоретико-ігрова модель МЛП інвестицій у кібербезпеку, яка складається з роздрібних торговців і ринків попиту. Роздрібними торговцями можуть бути продавці споживчих товарів, високотехнологічних або фінансових продуктів. Суттєво, щоб такі торговці працювали в одній галузі та своїми рішеннями могли впливати на рішення інших торговців галузі стосовно обсягу постачання та рівня інвестицій у кібербезпеку. При цьому важливо вірно оцінювати інвестиції у кібербезпеку, формуючи уявлення про справжню цінність активів інтелектуальної власності. Розроблено ігрову модель мережі ланцюгів постачання, що складається з ряду роздрібних

торгівців продуктом і ряду ринків збуту даного продукту, де роздрібні торговці некооперативно конкурують, максимізуючи свої сподівані прибутки шляхом визначення своїх оптимальних трансакцій для продукту, а також оптимальних інвестицій у кібербезпеку, які входять у нелінійні бюджетні обмеження.

Невід’ємний рівень s_i кібербезпеки роздрібногo торговця i обмежений зверху заданим значенням u_{si} : $0 \leq s_i \leq u_{si} < 1$, де $s_i = 1$ відповідає повній безпеці (яка може не досягатися), а $s_i = 0$ – відсутності безпеки. Набуття рівня безпеки пов’язується з функцією інвестиційних витрат: $h_i(s_i) = \alpha_i[(1-s_i)^{-0.5} - 1]$ де множник α_i дозволяє розрізняти масштаби і потреби роздрібних торговців. Припустимо, що ймовірність успішної кібератаки на роздрібногo торговця i становить $p_i = (1-s_i)(1-\bar{s})$, де $\bar{s} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m s_k$ – рівень кібербезпеки МЛП, $\bar{v} = 1 - \bar{s}$ – рівень вразливості МЛП, $v_i = 1 - s_i$ – рівень вразливості роздрібногo торговця i . Визначимо функцію ціни попиту на продукт на ринку збуту j : $\hat{\rho}_j(Q, s) = \rho_j(d, \bar{s})$, де $Q \in R_+^{mn}$ – матриця трансакцій Q_{ij} на всіх n ринках збуту всіх m роздрібних торговців, $d \in R_+^n$ – вектор обсягів d_j попиту на продукт на всіх n ринках збуту, $s \in R_+^m$ – вектор рівнів s_i безпеки всіх m торговців. Вважаємо, що всі роздрібні торговці некооперативно конкурують і кожний з них максимізує свою сподівану корисність, обираючи свої значення $Q_i = (Q_{i1}, \dots, Q_{in})$, s_i . Бажано знайти такий набір значень $(Q^*, s^*) \in K \equiv \prod_{i=1}^m K_i$, при яких m роздрібних торговців перебувають у стані рівноваги у сенсі Курно–Неша. Лауреат Нобелівської премії 1994 р. Джон Неш (John Nash) узагальнив поняття рівноваги Курно на кількох гравців, кожний з яких діє виключно у своїх власних інтересах, тобто некооперативно. Набір значень $(Q^*, s^*) \in K$ називають рівновагою Неша для МЛП, якщо для кожного роздрібногo торговця $i = 1, \dots, m$ має місце $\forall (Q_i, s_i) \in K_i$ нерівність

$$E(U_i(Q^*, s^*)) \geq E(U_i(Q_1^*, \dots, Q_{i-1}^*, Q_i, Q_{i+1}^*, \dots, Q_m^*, s_1^*, \dots, s_{i-1}^*, s_i, s_{i+1}^*, \dots, s_m^*)),$$

тобто будь-який торгівець i не може в односторонньому порядку збільшити свій очікуваний прибуток. Припустимо, у кожного роздрібного торгівця $i = 1, \dots, m$ сподівана корисність неперервно диференційована й увігнута відносно змінних Q_i, s_i . Тоді рівні трансакцій продукту і безпеки $(Q^*, s^*) \in K$ є рівноважними за Нешем для МЛП тоді й тільки тоді, коли задовольняється варіаційна нерівність

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \frac{\partial E(U_i(Q^*, s^*))}{\partial Q_{ij}} (Q_{ij} - Q_{ij}^*) + \sum_{i=1}^m \frac{\partial E(U_i(Q^*, s^*))}{\partial s_i} (s_i - s_i^*) \leq 0 \quad \forall (Q, s) \in K. \quad (1.4)$$

Оскільки нелінійні обмеження у допустимій множині K можуть ускладнювати чисельне розв'язання варіаційної нерівності (1.4) використовується множник Лагранжа $\lambda_i \geq 0$ для кожного такого обмеження. Вектор (Q^*, s^*, λ^*) є розв'язком варіаційної нерівності 1.4 тоді й тільки тоді, коли є розв'язком альтернативної варіаційної нерівності

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \frac{\partial L_i(Q^*, s^*, \lambda^*)}{\partial Q_{ij}} (Q_{ij} - Q_{ij}^*) + \sum_{i=1}^m \frac{\partial L_i(Q^*, s^*, \lambda^*)}{\partial s_i} (s_i - s_i^*) + \sum_{i=1}^m \frac{\partial L_i(Q^*, s^*, \lambda^*)}{\partial \lambda_i} (\lambda_i - \lambda_i^*),$$

де використано лагранжіан (Lagrangian):

$$L_i = E(U_i(Q, s)) + \lambda_i [h_i(s_i) - B_i], \quad \frac{\partial L_i(Q^*, s^*, \lambda^*)}{\partial \lambda_i} = h_i(s_i) - B_i.$$

1.3 Прийняття рішень, невизначеність і хмарні технології

Стохастичне програмування має застосування в різноманітних галузях, потребуючи від розробника інтуїції, розуміння моделювання невизначеності та використання структури проблеми. Кожна модель стохастичного програмування характеризується цілями, процесами рішення та їхніми обмеженнями, взаємозв'язками цілей та обмежень з випадковими елементами. Можна показати, що модель стохастичного програмування має певну перевагу порівняно з

аналогічною моделлю детерміністичного математичного програмування. Така перевага є вимірюваною і досить великою для того, щоб вивчати властивості та методи розв'язання задач стохастичного програмування. Хоча загальні моделі стохастичного програмування можна застосовувати до практично всіх задач прийняття рішень з невідомими параметрами, ці моделі залишаються узагальненнями детерміністичних моделей математичного програмування, в яких частина даних не є точно відомою. Типові риси таких даних – множинність допустимих значень багатьох змінних рішення, дискретність часових періодів для рішення, застосування функціоналів математичного сподівання як цільових функцій чи обмежень на основі інформації про ймовірнісні розподіли невідомих параметрів. Проте ці риси не є характерними для суміжних областей прийняття рішень – статистичної теорії прийняття рішень, аналізу рішень, динамічного програмування, марковських або напівмарковських процесів рішень, стохастичного керування. Задачу стохастичного програмування можна задавати як у розширеній формі (коли кожній можливій реалізації випадкового вектора відповідає певний вектор рішення на другому етапі), так і в неявній формі. Показано, що моделі стохастичного програмування дають певні переваги порівняно з моделями детерміністичного математичного програмування [80].

Бачення обчислювальних послуг, основане на моделі надання послуг, передбачало масштабну трансформацію всієї обчислювальної галузі у XXI столітті, завдяки чому обчислювальні послуги стануть доступними на вимогу, як інші комунальні послуги сучасного суспільства – послуги водопостачання, електропостачання, газопостачання, телефонного зв'язку. Аналогічно користувачі мають платити провайдерам лише тоді, коли отримують доступ до обчислювальних послуг. Також, споживачам більше не потрібно вкладати великі кошти чи мати труднощі при побудові та підтримці складної ІТ-інфраструктури.

Використання такого підходу є доцільним, коли пошук оптимального розв'язку прямими методами є складною проблемою як в теоретичному сенсі, так

і в сенсі необхідного об'єму розрахунків для задач з конкретними даними. У такій моделі користувачі отримують доступ до послуг, виходячи зі своїх вимог, незалежно від місця базування послуг. До 2007 р. ця модель була відома як службові обчислення, а згодом – як хмарні обчислення (ХО). ХО часто означає інфраструктуру як хмару, з якої фізичні та юридичні особи можуть отримувати доступ до застосунків як сервісів у будь-якій точці світу на вимогу. ХО можна класифікувати як нову парадигму для динамічного забезпечення обчислювальних послуг, що підтримуються найсучаснішими центрами обробки даних, які застосовують технології віртуалізації для консолідації та ефективного використання ресурсів. ХО надають не лише надзвичайно гнучке середовище для побудови нових систем і застосунків, але й можливість інтеграції додаткової спроможності чи функції в існуючі системи. Використання динамічно забезпечених ІТ-ресурсів є економічно вигіднішою можливістю, ніж придбання додаткових інфраструктури і ПЗ, потреби в яких є обмеженими в часі, а розмір яких непросто оцінювати: саме це стало вирішальною перевагою ХО і сприяло швидкому поширенню ХО у світі [8].

Розуміння ролі провайдерів хмарних послуг у ланцюгу вартості, визначення ієрархії потрібних об'єктів доходів і витрат, розробка структури моделі, відображення відповідних фінансових даних вимагало первинних даних від спілкування як з керівництвом телекомунікаційних компаній (менеджерами і спеціалістами продуктів), так і з провайдерами хмарних послуг (бізнес-менеджерами, фінансовими керівниками, проектувальниками послуг). Модель брокера хмарних послуг вимагає вторинних даних, що містять технічні характеристики продукції, річні звіти, відкриті дані веб-сайтів учасників ланцюга вартості. Різні хмарні брокери по-різному ставляться до вибору важливих рішень для свого бізнесу. Рішення можуть стосуватися ціноутворення, планування і використання потужностей. По мірі того, як обчислення та Інтернет-з'єднання стають технологіями і послугами загального призначення, спрямованими на

широкі глобальні ринки, виникають питання ефективності таких ринків з точки зору суспільного добробуту, участі в них провайдерів диференційованих послуг і кінцевих користувачів. Проект Iridium глобального зв'язку фірми Motorola завершився у 1990-х роках внаслідок подібних питань, вперше досягши мети технологічної спроможності такого зв'язку. Оскільки Інтернет-послуги характеризуються високою інноваційністю, диференційованістю та динамічністю, то для них можна застосовувати відомі моделі диференційованих продуктів. Проте функції попиту у таких моделях є гіперболічними, а не лінійними. Крім того, подібні моделі є стохастичними та включають провайдерів з різними способами конкуренції. В екосистемі Інтернету важливими є зв'язки між постачальниками Інтернет-послуг (Internet service providers, ISPs) як операторами телекомунікаційної мережі та провайдерами послуг контенту, особливо потужними провайдерами відеоконтенту, що передбачає високу пропускну здатність. Оскільки підвищення пропускну здатності потребує нових інвестицій у спроможність мережі, то мотивація до таких інвестицій має бути як у провайдерів відеоконтенту, так і у ISPs. Для аналізу взаємозв'язків між провайдерами Інтернет-послуг і контент-провайдерами в Інтернет-екосистемі запропоновано обчислювані моделі, основані на побудові функцій виграшу всіх учасників цієї екосистеми. Введення платного перегляду контенту мотивуватиме провайдерів Інтернет-послуг до інвестицій у підвищення спроможностей мережі, яка має тренд експоненціального зростання. Водночас такий перегляд порушуватиме принципи нейтральності мережі, що дає підстави для розробки нових задач мінімізації порушень умов нейтральності мережі та максимізації суспільного добробуту Інтернет-екосистеми. Моделі вказують на важливість ефективності провайдерів Інтернет-послуг, передбачуваності попиту та високої цінової еластичності інноваційних послуг. Для взаємодії CP та ISPs скористаємося моделлю Штакельберга, де лідер повідомляє своє рішення послідовнику, який оптимізує свою цільову функцію на основі отриманої інформації. CP максимізує свій

прибуток – дохід від надання контенту мінус частка платного перегляду з витратами [9], тобто

$$P_{CP} = [p(1-x) - c]E_{\omega} \min\{W_0 + W; D(p, \omega)\} - eE_{\omega} \max\{0; D(p, \omega) - W_0 - W\},$$

де p – ціна послуги, c – витрати на надання послуг, x – частка доходу CP, перерахована до ISP, W_0 – існуюча спроможність мережі, W – можливе розширення спроможності, $D(p, \omega)$ – (випадковий) попит на послугу за ціною p для випадкової величини ω , e – альтернативна вартість незадоволеного попиту, E_{ω} – оператор математичного сподівання.. ISP максимізує свій прибуток – дохід від фіксованої абонплати від клієнтів плюс частка доходу CP, перерахована до ISP через платний перегляд, мінус витрати на обслуговування і розширення мережі, тобто $P_{ISP} = C + px E_{\omega} \min\{W_0 + W; D(p, \omega)\} - rW - q(W_0 + W)$, де C – абонентська плата (вважаємо, що вся популяція користувачів підписана до Інтернету за фіксовану плату), r – витрати на одиницю розширення спроможності мережі, q – витрати на одиницю обслуговування спроможності мережі.

Припустимо, що CP є лідером з ринковою владою у даній системі. Тоді рішення в системі приймаються у такій послідовності:

1) CP обирає ціну p послуги та частку x свого доходу від надання контенту, яка перераховуватиметься до ISP у рамках угоди про перегляд контенту;

2) користувачі, знаючи ціну p , формують попит на послугу за співвідношенням $D(p, \omega) = \frac{M(1 + \omega)}{(a + p)^{\gamma}}$;

3) ISP, знаючи свою частку x і попит $D(p, \omega)$ на послугу для випадкової змінної ω з відомим розподілом H , приймає рішення про обсяг W розширення спроможності мережі, максимізуючи свій сподіваний прибуток;

4) CP, знаючи поведінку користувачів та ISP, обирає такі значення p та x , які максимізують сподіваний прибуток.

З цих умов впливає функція реакції послідовника (ISP) на рішення лідера (CP):

$$W^*(p, x) = \max \left\{ 0; \frac{M}{(a+p)^\gamma} \left[1 + H^{-1} \left(1 - \frac{r+q}{px} \right) \right] - W_0 \right\}.$$

1.4 Прийняття рішень в системах економіки, екології, охорони здоров'я

Оцінювання щільності є головною задачею класичної статистики і статистичної теорії навчання. На практиці спостерігається мало вибірок, причому вибірки зсуваються, а шукана щільність пов'язується з іншими щільностями. Це свідчить про важливість ефективного використання навчальних даних. Наприклад, при малій кількості вибірок у багатовимірному просторі слід використовувати інформацію для всіх вимірів, хоча багатьом класичним методам це не вдається. Отже, потрібні методи, які використовують велику кількість вимірів для малих наборів даних. Якщо дані збираються зі зсувом, то будь-які знання про цей зсув поліпшуватимуть ефективність передбачення.

Коли оцінюються декілька щільностей на наборах даних (сигналів), що перетинаються чи впорядковуються, то спільний для щільностей сигнал поліпшуватиме точність окремих оцінок. Таким чином, потрібні методи множинного оцінювання, що збалансовують окрему інформацію про набір даних та спільну інформацію про набори даних.

Якщо питання максимізації ентропії (чи застосування розподілів Гіббса) вивчало багато авторів, то питання вибору підходящих обмежень для шуканого розподілу потребує окремого дослідження.

Для широкого класу методів максимізації ентропії та вірогідності розвивається єдиний підхід, що гарантує їхню збіжність і статистичну ефективність. Наприклад, можна обґрунтувати статистичну ефективність відомих методів регуляризації з цільовими функціями у стандартних нормах, а також із спеціальними цільовими функціями, які мають кращі статистичні властивості, використовуючи інформацію про структуру простору ознак, про зсув отримання

вибірки, про інші способи оцінювання щільності. Крім того, для розв'язання загальної задачі про максимальну ентропію можна запропонувати нові алгоритми й довести їхню збіжність, узагальнюючи методи, основані на теорії компактності, інформаційній геометрії та оптимізації [71].

Загалом проблема максимізації вірогідності полягає у тому, що емпіричні середні ознак майже завжди не дорівнюватимуть їхнім істинним очікуванням, а тому цільовий розподіл не задовольнятиме обмеженням, які накладаються на результуюче обмеження. Крім того, проблема ускладнюється малими розмірами вибірок. При інтерпретації максимізації ентропії як максимізації вірогідності та звуженні шуканих розподілів до класу експоненціальних розподілів можлива надлишковість оцінок.

Розроблено інтегровану динамічну модель, що об'єднала в собі аспекти агрономії, гідрології та економіки та вказує на найкращі практики агровиробництва, які варто застосувати відповідно до місцевих умов [81].

Агросектор України має суттєвий потенціал росту, викликаючи відповідний інтерес серед іноземних інвесторів і вітчизняних політиків, та є локомотивом української економіки, де його частка у валовому внутрішньому продукті України зростає. Більш того, інвестиційна привабливість та інтерес до агровиробництва посилюються з інтенсифікацією євроінтеграційних процесів. Оскільки виробництво може мати негативний вплив на навколишнє середовище, то виникає питання соціальної відповідальності агробізнесу.

Перенасичення водойм поживними речовинами (включаючи фосфор та нітрати), що викликає їх цвітіння, дедалі більше привертає до себе увагу в Україні та світі з огляду на відчутний вплив на всю екосистему, рибальство, туризм, якість питної води.

Забруднення фосфором або його надлишок у водній екосистемі є першопричиною евтрофії. Локальні (точкові) джерела забруднення відносно легко ідентифікувати та взяти під контроль. Основним джерелом забруднення

залишався змив з полів. Щонайменше 60% фосфорного забруднення Чорного моря – це вимитий фосфор, донесений річковою системою.

Однак детерміністичні моделі не враховують стохастичну природу екосистем. Представлена інтегрована динамічна стохастична модель відображає вплив різних бізнес-практик агровиробництва на рівень фосфорного забруднення за невизначених погодних умов. Модель має досить узагальнений характер і може модифікуватися під умови конкретної місцевості. Просте порівняння з детерміністичною моделлю свідчить про те, що врахування у моделі стохастичності може суттєво впливати на отримувані результати чи рекомендації.

Аналіз результатів моделі свідчить про можливість досягнення значного зниження рівня забруднення тільки за суворіших заходів порівняно із заходами, які пропонують детерміністичні моделі: стохастична модель пропонує зниження рівня застосування фосфорних добрив на принаймні 14%, а також додаткове обов'язкове більш раннє та тривале вирощування захисних культур. Більш того, якщо брати до уваги зміну клімату, суворість заходів повинна бути ще вищою. Стохастична модель суттєво вдосконалює детерміністичну з точки зору соціального добробуту, який вона намагається максимізувати. Загалом застосування стохастичних оптимізаційних методів в економіці природокористування може надавати надійніші управлінські рішення за умов невизначеності та ризику порівняно з детерміністичними моделями, в яких домінує підхід сценарного аналізу. У роботі [81] представлено стохастичну оптимізаційну модель, що пропонує збалансоване управлінське рішення для агровиробництва як щодо рівня прибутковості, так і щодо рівня забруднення навколишнього середовища викидами фосфору. На відміну від широко відомих детерміністичних моделей, враховується фактор невизначеності погодних умов.

У роботі [2] докладно вивчаються передумови та припущення класичної моделі Басса поширення інновацій з метою її застосування до моделювання актуальних стохастичних процесів, пов'язаних з пандемією. Модель Басса довела

свою універсальність і застосовність до різних середовищ. У статті наведені ретельні математичні обґрунтування властивостей моделі з метою її подальшого розвитку, пошуку параметрів невизначеності та спостережуваних змінних, ґрунтуючись на теоріях еволюційних рівнянь і стохастичних процесів. У статті отримано реалістичні результати оцінювання параметрів моделі Басса для вакцинацій у Білорусі та України на тижневих даних першого півріччя 2021 р. і запропоновано проведення подібних досліджень для інших держав, а також областей і районів України.

Основне припущення у дифузійній моделі Басса попиту першої покупки: ймовірність $P(T)$ того, що первинні закупівлі здійснюватимуться у момент часу T за умови, що до цього закупівлі не здійснювалися, є лінійною функцією числа $Y(T)$ попередніх покупців, тобто $P(T) = p + \frac{q}{m} Y(T)$, де $Y(0) = 0$, $P(0) = p$ – константа, (відображає важливість новаторів у соціальній системі), $\frac{q}{m}$ – коефіцієнт нахилу лінійної функції, параметр q називають коефіцієнтом імітації. Якщо довільно вибрати покупця серед m покупців, який здійснюватиме первинну закупівлю продукту в деякий момент часу свого життя, то очікувана тривалість T часу до такої закупівлі, становитиме

$$E(T) = \int_0^{\infty} t f(t) dt = \int_0^{\infty} \frac{t p (p+q)^2 \exp[t(p+q)]}{\{p \exp[t(p+q)] + q\}^2} dt =$$

$$= \int_1^{\infty} \frac{\ln z}{p+q} \times \frac{p(p+q)^2 z}{(pz+q)^2} \times \frac{dz}{(p+q)z} = p \int_1^{\infty} \frac{\ln z}{(pz+q)^2} dz = \frac{1}{p} \int_1^{\infty} \frac{\ln z}{(z+p^{-1}q)^2} dz,$$

де $z = \exp[t(p+q)]$, $dz = (p+q)z dt$, $\ln z = t(p+q)$.

Застосовуючи вираз $\int \frac{\ln x}{(x+a)^2} dx = -\frac{\ln x}{x+a} + \frac{1}{a} \ln \frac{x}{x+a}$ для $a = p^{-1}q$,

$$\text{отримуємо } E(T) = \frac{1}{p} \left\{ \ln \frac{1}{1+p^{-1}q} - \frac{p}{q} \ln \frac{1}{1+p^{-1}q} \right\} = \frac{1}{q} \ln(1+p^{-1}q) = \frac{1}{q} \ln \left(\frac{p+q}{p} \right).$$

В роботі [82] досліджено модель інтегрованих взаємозв'язків, яка дозволяє отримувати кількісну оцінку щодо збалансованості потенційної пропозиції ресурсів і суспільного запиту, приймати відповідні оптимальні рішення щодо використання обмежених ресурсів. Розроблено інтегровану динамічну модель, що об'єднала в собі не тільки доволі складні взаємозв'язки систем забезпечення водними, енергетичними та продовольчими ресурсами, а й вплив прийнятих рішень в цих системах на економічні, політичні, соціальні, технологічні та екологічні аспекти суспільства. Модель дозволяє розробляти оптимальну стратегію управління WEF-ресурсами, розуміти, як рішення, прийняті в одній системі, впливатимуть на інші системи, як потенційна шкода довкіллю обмежуватиме пропозицію цих ресурсів. Ця модель інтегрованих взаємозв'язків дозволяє отримувати кількісну оцінку збалансованості пропозиції водних, енергетичних та продовольчих ресурсів, а також суспільного запиту на них, приймати відповідні оптимальні рішення щодо використання обмежених ресурсів.

Водні, енергетичні та продовольчі ресурси є базовими ресурсами, наявність, якість та ефективність використання яких визначає добробут нації. Системи їх забезпечення та використання є надзвичайно пов'язаними. Так, гідроресурси потрібні в енергогенерації практично впродовж всього циклу виробництва, – починаючи від видобутку корисних копалин і закінчуючи очисними заходами. Ті ж водні ресурси необхідні в сільськогосподарській діяльності (головним чином для зрошування полів, виробництва добрив, збереження урожаю). Знову ж таки енергоресурси є необхідними для водопостачання та є ключовими у створенні та збереженні продовольства. Також, до цієї системи варто додати вплив на соціоекономічні процеси в суспільстві та навколишнє середовище. Вищенаведені взаємозв'язки в науковій літературі визначаються як WEF (water-energy-food) nexus. Забезпечення згаданими ресурсами особливо актуальне в сучасному глобалізованому світі з понад 7,6 млрд. населення, яке продовжує швидко зростати: за оновленими оцінками ООН, до 2050 р. населення зросте на 30%.

Спалахи інфекційних хвороб та пандемія COVID-19 зокрема є надзвичайно серйозним викликом в сфері охорони громадського здоров'я. Станом на 8 вересня 2020 р., за даними Університету Джона Хопкінса, в світі було інфіковано коронавірусною хворобою понад 27 млн. осіб, та зафіксовано понад 890 тис. летальних випадків. За даними Національної служби охорони здоров'я України (НСЗУ), в Україні було інфіковано понад 140 тис. осіб і зафіксовано понад 3 тис. летальних випадків.

Зворотною стороною викликів завжди є можливості: на сьогодні такими можливостями є інформаційні технології, системи прийняття рішень, найкращі практики проактивного управління і контролю на основі сучасних методик аналізу даних (data driven decision making) та моделювання.

При цьому системний підхід має передбачати взаємовплив рішень в сфері охорони здоров'я та рішень щодо стратегічного економічного розвитку: наприклад, подолання сьогоднішніх наслідків COVID-19 шляхом суттєвого пом'якшення монетарної політики може вести до зростання боргового навантаження на майбутні покоління.

Для початкового аналізу епідеміологічної ситуації можливо скористатися загальнодоступним програмним забезпеченням, яке має достатньо потужний функціонал. Еволюційний розвиток розробки програмного забезпечення (ПЗ) спільнотами ентузіастів соціально відповідальних інституцій з усього світу на сьогодні забезпечує доступність розробок з відкритим доступом і різних технологій, на додаток до комерційних продуктів. Розробки ПЗ в галузі охорони здоров'я не є винятком.

Відносно широке коло ПЗ у вільному доступі спочатку розроблялося епідеміологічними інституціями для внутрішнього службового використання при прийнятті рішень, а далі було відкрито для широкої громадськості. Загалом дане ПЗ було адаптовано для поліпшення його практичного застосування, зосереджуючись на викликах з можливостями адаптивного використання.

ПЗ групи детерміністичних методів характеризується достатньою інформативністю та зручністю використання і вузьким функціоналом. Стохастичні моделі надають більше функціоналу, проте дещо втрачають в зручності використання. Максимальну функціональність дають агентно-орієнтовані моделі, але їх ефективніше використання потребує володіння відповідними навичками написання програмного коду. Досить потужною є сервісна архітектура для підтримки інтерактивного епідеміологічного моделювання Indemics (Interactive Epidemic Simulation), що базується на високопродуктивних обчисленнях. В роботі [6] здійснено огляд перспектив використання загальнодоступного ПЗ у моделюванні епідеміологічних трендів. Розглянуто сильні та слабкі сторони, основні характеристики та можливі аспекти застосування такого ПЗ.

Технології, що є рушійною силою застосувань обчислювальних ресурсів, мають передбачувані тренди. Наприклад, за законом Мура, швидкість процесора подвоювалася кожні півтора роки в минулому столітті. Зазначені тренди важливі для передбачення технологічних спроможностей майбутніх обчислювальних систем, які проектуються та програмуються. З розвитком інформаційно-комунікаційних технологій закони ефективності обчислювальних систем потребують перевірки і перегляду, враховуючи новітні можливості збору й обробки великих даних [7].

1.5 Рівноважні інвестиції у кібербезпеку мережі ланцюгів постачання

Теоретико-ігрова модель МЛП інвестицій у кібербезпеку складається з роздрібних торгівців $i = 1, \dots, m$ і ринків попиту $j = 1, \dots, n$. Роздрібними торгівцями можуть бути продавці споживчих товарів, високотехнологічних або фінансових продуктів. Суттєво, щоб такі торгівці працювали в одній галузі та своїми рішеннями могли впливати на рішення інших торгівців галузі стосовно обсягу постачання та рівня інвестицій у кібербезпеку. При цьому важливо вірно оцінювати інвестиції у кібербезпеку, формуючи уявлення про справжню цінність активів інтелектуальної власності.

Роздрібні торгівці і ринки збуту формують двочастинну структуру МЛП. Спочатку визначимо обмеження кожного роздрібного торгівця, а потім – його цільову функцію. Попит d_j на продукт на ринку збуту j має задовольняти рівнянню збереження потоку

$$d_j = \sum_{i=1}^m Q_{ij}, j = 1, \dots, n, \quad (1.5)$$

де Q_{ij} – невід’ємний обсяг продукту у трансакції між роздрібним торгівцем i та споживачами ринку збуту j , обмежений зверху заданою величиною \bar{Q}_{ij} :

$$0 \leq Q_{ij} \leq \bar{Q}_{ij}. \quad (1.6)$$

На відміну від моделі [120], тут кожний торгівець характеризується своєю межею \bar{Q}_{ij} . Невід’ємний рівень s_i кібербезпеки роздрібного торгівця i обмежений зверху заданим значенням u_{si} :

$$0 \leq s_i \leq u_{si} < 1, \quad (1.7)$$

де $s_i = 1$ відповідає повній безпеці (яка може не досягатися), а $s_i = 0$ – відсутності безпеки. На відміну від моделі [120], тут кожний торгівець характеризується своїм значенням $u_{si} < 1$.

Набуття рівня s_i безпеки пов'язується з функцією $h_i(s_i)$ інвестиційних витрат, яка припускається неперервно диференційованою й опуклою. Тоді для роздрібного торговця i повна безпека відповідає його інвестиціям $h_i(1) = \infty$, а відсутність безпеки – його інвестиціям $h_i(0) = 0$. Такою функцією є, наприклад, нелінійна функція

$$h_i(s_i) = \alpha_i[(1-s_i)^{-0.5} - 1], \quad (1.8)$$

де множник α_i дозволяє розрізняти масштаби і потреби роздрібних торговців [120–122]. У моделях [120–122] функції інвестиційних витрат на кібербезпеку входили лише в цільові функції осіб, які приймають рішення (ОПР), але не входили у бюджетні обмеження.

Нехай для кожного роздрібного торговця $i = 1, \dots, m$ його бюджет (budget) на інвестиції у кібербезпеку обмежений зверху заданою величиною B_i :

$$h_i(s_i) \leq B_i. \quad (1.9)$$

Нехай, ймовірність успішної кібератаки на роздрібного торговця i становить

$$p_i = (1-s_i)(1-\bar{s}), \quad (1.10)$$

де $\bar{s} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m s_k$ – рівень кібербезпеки МЛП, $\bar{v} = 1 - \bar{s}$ – рівень вразливості МЛП,

$v_i = 1 - s_i$ – рівень вразливості роздрібного торговця i . З урахуванням співвідношення (1.5) визначимо функцію ціни попиту на продукт на ринку j

$$\hat{\rho}_j(Q, s) = \rho_j(d, \bar{s}),$$

де $Q \in R_+^{mn}$ – матриця трансакцій Q_{ij} на всіх n ринках збуту всіх m роздрібних торговців, $d \in R_+^n$ – вектор обсягів d_j попиту на продукт на всіх n ринках збуту, $s \in R_+^m$ – вектор рівнів s_i безпеки всіх m роздрібних торговців. Споживчі переваги щодо продукту виражаються обсягами попиту, а також безпекою відповідної МЛП: мабуть, споживачі готові платити за вищу мережеву безпеку, але така готовність може бути різною для різних споживачів. До того ж, існує

інформаційна асиметрія між роздрібними торговцями та споживачами [123] (автор роботи [123] – Нобелівський лауреат 2001 р.): кожний роздрібний торговець i знає свої інвестиції $h_i(s_i)$ у кібербезпеку, а кожний споживач уявляє середній рівень \bar{s} кібербезпеки.

За відсутності кібератаки та інвестицій у кібербезпеку, прибуток роздрібного торговця i дорівнює різниці між його виручкою та витратами

$$f_i(Q, s) = \sum_{j=1}^n Q_{ij} \hat{p}_j(Q, s) - \left(c_i \sum_{j=1}^n Q_{ij} + \sum_{j=1}^n c_{ij}(Q_{ij}) \right), \quad (1.11)$$

де c_i – витрати роздрібного торговця i , пов'язані з поводженням та обробкою продукту, $c_{ij}(Q_{ij})$ – витрати, пов'язані з транзакцією між роздрібним торговцем i та ринком збуту j .

Враховуючи співвідношення 1.10, очікувана фінансова шкода роздрібного торговця i від кібератаки становить

$$E(D_i) = p_i D_i, \quad (1.12)$$

де $0 < D_i$ – фінансова шкода, яку зазнає роздрібний торговець i при успішній кібератаці.

Тоді, враховуючи співвідношення 1.10 – 1.12, сподівана корисність роздрібного торговця i становить

$$E(U_i) = (1 - p_i) f_i(Q, s) + p_i [f_i(Q, s) - D_i] - h_i(s_i) = f_i(Q, s) - p_i D_i - h_i(s_i), \quad (1.13)$$

де $h_i(s_i)$ – інвестиційні витрати цього торговця на кібербезпеку. Враховуючи нерівності (1.6), (1.7), (1.9), допустиму множину для торговця i позначимо

$$K_i \equiv \{(Q_i, s_i) : 0 \leq Q_{ij} \leq \bar{Q}_{ij} \forall j; 0 \leq s_i \leq u_{si}; h_i(s_i) \leq B_i\}. \quad (1.14)$$

Вважаємо, що всі роздрібні торговці некооперативно конкурують у постачанні однорідного продукту (продукт може бути диференційованим [124]), а кожний з них максимізує свою сподівану корисність, обираючи свої значення

$Q_i = (Q_{i1}, \dots, Q_{in}), s_i$. Бажано знайти такий набір значень $(Q^*, s^*) \in K \equiv \prod_{i=1}^m K_i$, при

яких m роздрібних торгівців перебувають у стані рівноваги у сенсі Курно–Неша. Лауреат Нобелівської премії 1994 р. Неш узагальнив поняття рівноваги Курно на кількох гравців (ОПР), кожний з яких діє виключно у своїх власних інтересах, тобто некооперативно.

Набір значень $(Q^*, s^*) \in K$ називають рівновагою Неша для МЛП, якщо для кожного роздрібного торгівця $i = 1, \dots, m$ має місце $\forall (Q_i, s_i) \in K_i$ нерівність

$$E(U_i(Q^*, s^*)) \geq E(U_i(Q_1^*, \dots, Q_{i-1}^*, Q_i, Q_{i+1}^*, \dots, Q_m^*, s_1^*, \dots, s_{i-1}^*, s_i, s_{i+1}^*, \dots, s_m^*)), \quad (1.15)$$

тобто будь-який роздрібний торгівець i не може в односторонньому порядку збільшити свій очікуваний прибуток порівняно з рівновагою Неша, обираючи свої допустимі значення Q_i, s_i .

Щоб нерівності (1.15) звести до варіаційної нерівності, спочатку доведемо, що допустима множина K опукла. В силу співвідношень (1.8) і (1.9) ця множина містить нелінійні обмеження, на відміну від допустимої множини багатьох мережевих рівноважних задач, пов'язаних з перенавантаженням мереж міського транспорту, ланцюгами постачання чи фінансовими послугами [125–127].

Лема 1. Якщо $h_i(s_i)$ – опукла функція, $i = 1, \dots, m$, то допустима множина K теж опукла.

Доведемо спочатку опуклість множини $\bar{K}_i \equiv \{s_i \in R : h_i(s_i) \leq B_i\}$.

Справді, для $s_i^1, s_i^2 \in \bar{K}_i$, $\lambda \in [0, 1]$ маємо $h_i(s_i^1) \leq B_i \leq h_i(s_i^2)$, звідки в силу опуклості $h_i(s_i)$ випливає

$$h_i[\lambda s_i^1 + (1 - \lambda) s_i^2] \leq \lambda h_i(s_i^1) + (1 - \lambda) h_i(s_i^2) \leq \lambda B_i + (1 - \lambda) B_i = B_i,$$

тобто $\lambda s_i^1 + (1 - \lambda) s_i^2 \in \bar{K}_i$.

Оскільки множина K_i є перетином опуклих множини \bar{K}_i , множини двосторонніх обмежень (1.7) і множини двосторонніх обмежень (1.6), то є опуклою.

Тоді декартовий добуток опуклих множин $K \equiv \prod_{i=1}^m K_i$ також є опуклою множиною.

Оскільки для функції $h_i(s_i)$ інвестиційних витрат, що визначається формулою (1.5), за умови (1.7) мають місце нерівності

$$\begin{aligned} \frac{\partial h_i(s_i)}{\partial s_i} &= \alpha_i[-0.5(1-s_i)^{-0.5-1} \times (-1)] = \frac{\alpha_i}{2}(1-s_i)^{-1.5} < 0, \\ \frac{\partial^2 h_i(s_i)}{\partial^2 s_i} &= (-1.5)\frac{\alpha_i}{2}(1-s_i)^{-1.5-1} \times (-1) = \frac{3\alpha_i}{4}(1-s_i)^{-2.5} > 0, \end{aligned} \quad (1.16)$$

то ця функція опукла.

Теорема 1. Припустимо, у кожного роздрібного торговця $i = 1, \dots, m$ сподівана корисність неперервно диференційована й увігнута відносно змінних Q_i, s_i . Тоді рівні трансакцій продукту і безпеки $(Q^*, s^*) \in K$ є рівноважними за Нешем для МЛП тоді й тільки тоді, коли задовольняється варіаційна нерівність

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \frac{\partial E(U_i(Q^*, s^*))}{\partial Q_{ij}} (Q_{ij} - Q_{ij}^*) + \sum_{i=1}^m \frac{\partial E(U_i(Q^*, s^*))}{\partial s_i} (s_i - s_i^*) \leq 0 \quad \forall (Q, s) \in K \quad (1.17)$$

де в силу співвідношень (1.10), (1.11), (1.13) мають місце рівності

$$\begin{aligned} \frac{\partial E(U_i(Q^*, s^*))}{\partial Q_{ij}} &= \frac{\partial f_i(Q^*, s^*)}{\partial Q_{ij}} = \hat{\rho}_j(Q^*, s^*) + \sum_{k=1}^n Q_{ik}^* \frac{\partial \hat{\rho}_k(Q^*, s^*)}{\partial Q_{ij}} - c_i - \frac{\partial c_{ij}(Q_{ij}^*)}{\partial Q_{ij}}; \\ \frac{\partial E(U_i(Q^*, s^*))}{\partial s_i} &= \frac{\partial f_i(Q^*, s^*)}{\partial s_i} - \frac{\partial [p_i(s^*)D_i]}{\partial s_i} - \\ &- \frac{\partial h_i(s_i^*)}{\partial s_i} = \sum_{k=1}^n Q_{ik}^* \frac{\partial \rho_k(Q^*, s^*)}{\partial s_i} - \frac{\partial h_i(s_i^*)}{\partial s_i} + D_i \left(\bar{s}^* - 1 - \frac{1-s_i^*}{m} \right); \\ \frac{\partial f_i(Q^*, s^*)}{\partial s_i} &= \sum_{k=1}^n Q_{ik}^* \frac{\partial \rho_k(Q^*, s^*)}{\partial s_i}; \end{aligned}$$

$$\frac{\partial [p_i(s^*)D_i(Q^*)]}{\partial s_i} = D_i \frac{\partial p_i(s^*)}{\partial s_i} = D_i \left[-(1-\bar{s}^*) - \frac{1-s_i^*}{m} \right],$$

$$\frac{\partial p_i(s^*)}{\partial s_i} = \frac{\partial [(1-s_i)(1-\bar{s})]}{\partial s_i} = (1-s_i^*) \frac{\partial (1-\bar{s})}{\partial s_i} - (1-\bar{s}^*),$$

$$\frac{\partial (1-\bar{s})}{\partial s_i} = \frac{\partial \left(1 - m^{-1} \sum_{k=1}^m s_k \right)}{\partial s_i} = -\frac{1}{m}.$$

Скористаємося опуклістю допустимої множини K за лемою 1. За умов теореми 1 розв'язання задачі рівноваги Неша рівносильне розв'язанню відповідної варіаційної нерівності [128]. Перепишемо варіаційну нерівність (1.15) у стандартній формі скалярного добутку

$$\langle F(X^*), X - X^* \rangle \geq 0 \quad \forall X \in K, \quad (1.18)$$

де $F: K \rightarrow R^n$ – деяка задана неперервна функція, K – замкнута опукла множина. Для цього визначимо вектор-стовпці $X = (Q, s)$ та $F(X) = (F^1(X), F^2(X))$ вимірності $(mn + m)$, що при $X \in K = K$ задовольняють рівнянням

$$\frac{\partial E(U_i(Q^*, s^*))}{\partial Q_{ij}} = F_{ij}^1(X), \quad \frac{\partial E(U_i(Q^*, s^*))}{\partial s_i} = F_i^2(X).$$

Такі рівняння задовольняються, коли оператор $F(X)$ має властивості потенційності [129].

За умов (1.16) та $B_i = \infty = \bar{Q}_{ij}$, $u_{si} \leq 1$ [120] задача (1.17) зводиться до подібної задачі [120], що має значно простішу допустиму множину.

Теорема 2. Варіаційна нерівність (1.18) має розв'язок $X^* = (Q^*, s^*) \in K$.
Дійсно, варіаційна нерівність (1.18) має розв'язок, якщо функція $F(X)$ неперервна, а допустима множина K компактна [130].

Теорема 3. Варіаційна нерівність (1.18) має єдиний розв'язок $X^* = (Q^*, s^*) \in K$.
Достатньо показати, що функція $F(X)$ строго монотонна на K [130]:

$$\langle F(X^1) - F(X^2), X^1 - X^2 \rangle > 0 \quad \forall X^1, X^2 \in K, X^1 \neq X^2.$$

У свою чергу, функція $F(X)$ є строго монотонною на K , якщо її якобіан $\nabla F(X)$ є позитивно визначеним на K .

Оскільки нелінійні обмеження 1.9 у допустимій множині K можуть ускладнювати чисельне розв'язання варіаційної нерівності 1.17, то введемо альтернативну варіаційну нерівність, яка використовує множник Лагранжа $\lambda_i \geq 0$ для кожного такого обмеження. Позначимо $\lambda \in R_+^m$ вектор усіх цих множників. Тоді замість допустимої множини (1.14) використовуватимемо множину

$$K_i^1 \equiv \{(Q_i, s_i) : 0 \leq Q_{ij} \leq \bar{Q}_{ij} \quad \forall j; 0 \leq s_i \leq u_{si}\},$$

а замість множини K – множину $K^2 = R_+^m \times \prod_{i=1}^m K_i^1$.

Теорема 4. Вектор $(Q^*, s^*, \lambda^*) \in K^2$ є розв'язком варіаційної нерівності (1.17) тоді й тільки тоді, коли є розв'язком альтернативної варіаційної нерівності

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \frac{\partial L_i(Q^*, s^*, \lambda^*)}{\partial Q_{ij}} (Q_{ij} - Q_{ij}^*) + \\ & + \sum_{i=1}^m \frac{\partial L_i(Q^*, s^*, \lambda^*)}{\partial s_i} (s_i - s_i^*) + \sum_{i=1}^m \frac{\partial L_i(Q^*, s^*, \lambda^*)}{\partial \lambda_i} (\lambda_i - \lambda_i^*) \leq 0 \\ & \quad \forall (Q, s, \lambda) \in K^2, \end{aligned}$$

де використано лагранжіан (Lagrangian)

$$L_i = E(U_i(Q, s)) + \lambda_i [h_i(s_i) - B_i], \quad \frac{\partial L_i(Q^*, s^*, \lambda^*)}{\partial \lambda_i} = h_i(s_i) - B_i.$$

Таким чином, для розв'язання задачі пошуку рівноважних інвестицій у кібербезпеку МЛП можна запропонувати ітеративний алгоритм, який на кожній ітерації дає в явному вигляді співвідношення для трансакцій продукту, рівнів безпеки та множників Лагранжа, пов'язаних з бюджетними обмеженнями.

1.6 Характеристики рівноваг ланцюгів постачання

У базовій теорії глобальних ланцюгів постачання світова економіка складається з довільної кількості країн, які мають один виробничий фактор (фактор праці) і виробляють один кінцевий продукт, що потребує континуум проміжних продуктів. Кінцевий продукт є результатом послідовних стадій виробництва проміжних продуктів, у процесі якого трапляється брак. Можна довести, що існує єдина рівновага вільної торгівлі, в якій країни з нижчими ймовірностями браку на всіх стадіях спеціалізуються на пізніших стадіях виробництва. Спираючись на цю просту теоретичну базу, можна запропонувати форму вертикальної спеціалізації взаємозалежних країн.

Явище вертикальної спеціалізації привертає в однаковій мірі увагу розробників стратегій, ділових лідерів, економістів. Можливість транскордонної фрагментації виробничих процесів впливає на обсяги, риси і наслідки міжнародної торгівлі. Залишаються відкритими питання механізмів впливу глобальних і локальних технологічних змін на участь різних країн в одному й тому самому ланцюгу постачання, а також механізмів впливу вертикальної спеціалізації на взаємозалежність держав.

Оскільки в моделях загальної рівноваги з довільною (великою) кількістю товарів і країн, незалежно від наявності послідовного виробництва, важко отримати зрозумілі передбачення порівняльної статистики, то потрібна проста теорія торгівлі з послідовним виробництвом. Для цього потрібні деякі ідеї щодо ієрархій у моделях часткової рівноваги для закритої економіки. Зосередимося на середовищі, в якому виробництво є послідовним і може містити брак. Моделі ієрархій застосовувалися до вивчення питань міжнародної торгівлі. Наприклад, модель економіки знань використовується для дослідження транскордонних паросполучень між агентами з неоднорідними здібностями і відповідних наслідків для нерівності у даній державі. Нерівність у державі внаслідок ієрархій при

торгівлі досліджувалася також в інших моделях. Припускається, що все населення даної держави має однакові здібності.

Нехай організаційна проблема фірми при виробництві кінцевого товару полягає у виконанні виробничих стадій $j \in [0,1]$, де більший індекс відповідає більшій близькості до кінцевого продукту (нижчій стадії течії ланцюга постачання) [131]. Позначимо $x(j)$ вхідний обсяг (вхід) сумісних (з фірмою) проміжних послуг, які надає фірмі постачальник на стадії j (якщо ці послуги несумісні, то $x(j) = 0$). Тоді обсяг випуску кінцевого товару з урахуванням його якості становить

$$q(m=1) = \theta \left(\int_0^{m=1} [x(j)]^\alpha I(j) dj \right)^{\frac{1}{\alpha}}, \quad (1.19)$$

де θ – параметр продуктивності, $\alpha \in (0,1)$ – параметр симетричного ступеня заміни серед входів стадій, $I(j)$ – індикаторна функція, значення якої дорівнює 1 при виконанні всіх попередніх стадій $i \in [0, j]$ і дорівнює 0 в решті випадків. Хоча виробництво вимагає виконання всіх стадій, додатність α гарантує додатність випуску при несумісності входів на деяких стадіях: незважаючи на важливість усіх стадій з інженерної точки зору, можна допускати їх деяку замінюваність через те, що характеристики входів формують обсяг кінцевого продукту з урахуванням його якості. Наприклад, виробництво автомобіля вимагає чотири колеса, дві фари, одне кермо тощо, але цінність цього автомобіля для споживачів типово залежатиме від послуг, отриманих від цих різних компонентів, де вища якість певних частин означатиме гіршу якість інших.

Виробнича функція 1.19 схожа на звичайну функцію з постійною еластичністю заміни (constant elasticity of substitution, CES) з нескінченною кількістю входів, але індикаторна функція $I(j)$ породжує, по суті, послідовну

технологію виробництва тому, що нижчі стадії течії є марними при невиконанні вищих стадій.

Технологію (1.19) можна виразити у диференціальній формі, застосовуючи правило Лейбніца:

$$\begin{aligned} \alpha [q(m)]^{\alpha-1} q'(m) &= \frac{d}{d m} [q(m)]^\alpha = \frac{d}{d m} \theta^\alpha \left(\int_0^m [x(j)]^\alpha I(j) dj \right) = \\ &= \theta^\alpha [x(m)]^\alpha I(m), \\ q'(m) &= \frac{1}{\alpha} \theta^\alpha [x(m)]^\alpha [q(m)]^{1-\alpha} I(m). \end{aligned}$$

Отже, граничне підвищення випуску, внесене постачальником на стадії m процесу виробництва, задається простою функцією Кобба–Дугласа, залежною від сумісного входу цього постачальника й обсягу випуску з урахуванням якості, виробленого до цієї стадії (проміжного входу до стадії m).

Припускаємо, що є велика кількість постачальників, які максимізують свої прибутки [132]. Вони можуть залучатися до виробництва проміжних входів фірми або альтернативної діяльності, що не стосується кінцевого товару фірми. Нехай кожному проміжному входу (продукту) взаємно однозначно відповідає свій постачальник, з яким фірма повинна укласти контракт. Кожний постачальник має здійснити певну інвестицію у взаємозв'язки ланцюга постачання для виробництва сумісного входу. Якщо вхід налаштований виключно під виробника кінцевого товару, то цінність цього входу для альтернативних покупців рівна 0. Хоча послідовність виробництва породжує асиметрії, всі стадії виробництва (всіх постачальників) вважаємо симетричними за граничними витратами на інвестиції, рівними c : одиниця інвестицій генерує одиницю послуг сумісного входу стадії j для поєднання з входами постачальників вищих стадій течії. Несумісні входи можуть вироблятися всіма учасниками (включаючи фірму) з нульовими граничними витратами, без вартості для виробництва кінцевого товару і без шкоди для продовження виробничого процесу.

З точки зору споживачів кінцевий товар є диференційованим, бо належить до галузі, в якій фірми виробляють континуум товарів, а споживчі переваги мають властивість CES з еластичністю $\frac{1}{1-\rho}$ поміж цих товарів ($\rho \in (0,1)$). Нехай нарахована субкорисність (sub-utility) від споживання товарів галузі дорівнює

$$U = \left(\int_{\omega \in \Omega} [\varphi(\omega) \tilde{q}(\omega)]^\rho d\omega \right)^{\frac{1}{\rho}}, \quad (1.20)$$

де $\tilde{q}(\omega)$ – обсяг споживання товару ω (у фізичних одиницях) якості $\varphi(\omega)$, Ω – множина товарів. Можна довести, що максимізація функції (1.20) при бюджетному обмеженні

$$\int_{\omega \in \Omega} p(\omega) \tilde{q}(\omega) d\omega = E$$

дає споживчий попит, який має властивість CES з еластичністю $\frac{1}{1-\rho}$ (E позначено витрати (expenditure), а $p(\omega)$ – ціну товару). Крім того, неявна функція виручки фірми, що продає товар, є увігнутою за обсягом випуску $q(\omega) = \tilde{q}(\omega)\varphi(\omega)$ з урахуванням якості. Тоді виручка від виробництва кінцевого товару рівна

$$r = A^{1-\rho} [q(m=1)]^\rho = A^{1-\rho} \theta^\rho \left(\int_0^{m=1} [x(j)]^\alpha I(j) dj \right)^{\frac{\rho}{\alpha}},$$

де A – деякий параметр зсуву попиту галузі, екзогенний для фірми.

Спочатку розглянемо повні контракти, в яких фірма має повний контроль над усіма інвестиціями, а відтак над вхідними послугами на всіх стадіях: для кожного входу $j \in [0,1]$ фірма здійснює контрактну пропозицію $[x(j), s(j)]$, за якою постачальник зобов'язаний надати обсяг $x(j)$ сумісних входів, як передбачено у контракті, в обмін на платіж $s(j)$. Оскільки фірма має стимул дотримуватися природної послідовності виробництва, то $I(j) = 1 \quad \forall j$, а фірма, шукаючи

оптимальний повний контракт, максимізує за всіма допустимими контрактними пропозиціями $[x(j), s(j)] \forall j \in [0,1]$ свій прибуток

$$\pi = r - \int_0^1 s(j) dj = A^{1-\rho} \theta^\rho \left(\int_0^1 [x(j)]^\alpha dj \right)^{\frac{\rho}{\alpha}} - \int_0^1 s(j) dj$$

при обмеженнях $s(j) \geq c x(j)$. Розв'язання цієї задачі оптимізації дає однакові для всіх проміжних входів рівні інвестицій $x(j)$ і платежів $s(j) = c x(j) \forall j$ (звідки чистий виграш постачальників є нульовим).

Для втілення повних контрактів важливо, щоб судовий порядок був здатним верифікувати точну вартість вхідних послуг, які надаються постачальниками різних стадій. Однак на практиці суд загалом не є здатним верифікувати те, є входи сумісними чи ні, відповідають надані сумісними входами послуги записаним у контракті положенням чи ні. Водночас зазначимо, що фірма не є схильною укладати зв'язуючі (юридично обов'язкові) контракти, які залежать від обсягу входів і не залежать від їх сумісності, бо постачальники можуть мати стимул до дешевого виробництва несумісних (з фірмою) входів і вимагати від фірми платежі. Можна уявити, що контракти, залежні від загальної виручки, забезпечуватимуть інвестиційні стимули для постачальників, але у даній постановці з континуумом постачальників подібні контракти не матимуть цінності, бо зводитимуться до нульових інвестиційних рівнів. Тому природно вивчати ситуації, в яких умови обміну між фірмою і постачальниками не є жорсткими у втілюваному ex-ante контракті. Фактично вважається, що початковий контракт лише вказує те, є постачальники вертикально інтегрованими з фірмою чи ні (залишаючись незалежними).

Згаданий недолік зв'язуючого контракту породжує відому проблему затримки (holdup). Фактичний платіж конкретному постачальнику (скажімо, стадії m) є предметом двосторонніх переговорів лише після виробництва входу стадії m й отримання можливості фірми інспектувати результат цього виробництва. Нехай

ці переговори не залежать від двосторонніх переговорів на інших стадіях. Оскільки проміжний вхід вважається сумісним тільки з випуском фірми, то решта можливостей постачальника на стадії переговорів зводиться до нуля. Тому квазіренти у переговори між фірмою і постачальником задаються приростом внеску в загальну виручку, породженим постачальником m на стадії переговорів. При обчисленні цього внеску зазначимо, що фірма спілкується з постачальниками виключно з міркувань технологічної послідовності виробництва і завжди може в односторонньому порядку виконати дану стадію шляхом власного виробництва несумісного входу. Таке жорстке припущення можна послабити можливістю часткових контрактів: коли частка інвестицій постачальників верифікується і визначається контрактом, то фірма може скористатися формальним контрактом для забезпечення мінімального обсягу сумісних вхідних послуг постачальника, достатнього для продовження виробничого процесу. Як наслідок, $I(j) = 1 \quad \forall j < m$, а вартість виробництва кінцевого товару, гарантована до стадії m , задається

$$r(m) = A^{1-\rho} \theta^\rho \left(\int_0^m [x(j)]^\alpha dj \right)^{\frac{\rho}{\alpha}},$$

звідки правило Лейбніца дає

$$\begin{aligned} \frac{\alpha}{\rho} [r(m)]^{\frac{\alpha}{\rho}-1} r'(m) &= \frac{d}{dm} [r(m)]^{\frac{\alpha}{\rho}} = \frac{d}{dm} (A^{1-\rho} \theta^\rho)^{\frac{\alpha}{\rho}} \left(\int_0^m [x(j)]^\alpha dj \right) = \\ &= (A^{1-\rho} \theta^\rho)^{\frac{\alpha}{\rho}} [x(m)]^\alpha, \\ r'(m) &= \frac{\rho}{\alpha} (A^{1-\rho} \theta^\rho)^{\frac{\alpha}{\rho}} [x(m)]^\alpha [r(m)]^{1-\frac{\alpha}{\rho}}. \end{aligned} \quad (1.21)$$

За теорією прав власності для меж фірми, ефективна переговорна сила фірми стосовно конкретного постачальника залежить від того, володіє фірма цим постачальником чи ні. Можна припустити, що власність постачальників є джерелом ринкової влади у сенсі здатності фірми діставати більшу частку

ринкового надлишку від інтегрованих постачальників порівняно з не інтегрованими. Коли контракти є неповними, то факт контролю інтегратором (фірмою) фізичних активів виробництва дозволить інтегратору диктувати використання цих активів, яке схилить поділ ринкового надлишку на свою користь. Для простоти не деталізуватимемо природу таких переговорів ex-post і припускатимемо, що фірма отримуватиме частку β_V додаткового внеску у вартість (1.21), коли постачальник є інтегрованим, і меншу частку $\beta_O < \beta_V$ цього внеску, коли постачальник є неінтегрованим.

Модель з континуумом постачальників відповідає граничному випадку $\varepsilon \rightarrow 0$ дискретної моделі з M постачальниками, кожний з яких контролює частину

$\varepsilon = \frac{1}{M}$ континууму проміжних входів.

1.7 Алгоритми оцінки ефективності та цільової структури експорту регіонів України

Глобальне поширення інформаційно-комунікаційних технологій загострює міжнародну конкуренцію, актуальну для України. Гетерогенність країн спонукає фірми до більшого рівноважного (за Нешем) податку в (більшій) країні 1 (до податкової асиметрії), а відтак до звітування фірмами більшого прибутку в (меншій) країні 2. Якщо країна 1 підвищує свою податкову ставку, то збільшує податкову базу країни 2 і стимулює країну 2 до підвищення своєї податкової ставки, і навпаки: податки країн 1, 2 є стратегічними доповнювачами. Податкова конкуренція веде до втрати податкової бази країни 1. При цьому (сумарний) звітний прибуток фірм у країні 1 перевищує звітний прибуток у країні 2, а фіскальні надходження у країні 1 перевищують фіскальні надходження у країні 2.

Таким чином, міжнародна податкова конкуренція поєднується з міжнародною податковою кооперацією за світові корпорації, які мають можливості зсуву звітних прибутків серед різних країн [84].

КМУ своїм розпорядженням № 77-р від 23.01.2019 затвердив план реалізації нового етапу реформування місцевого самоврядування та територіальної організації влади в Україні на 2019–2021 рр. Серед основних заходів варто зазначити: формування нової територіальної основи для діяльності органів влади на рівні громад і районів; передача повноважень органів виконавчої влади органам місцевого самоврядування; створення належної ресурсної бази для здійснення повноважень органів місцевого самоврядування.

Задля успішної реалізації стратегічних рішень такого рівня слід виходити з результатів економіко-статистичного аналізу даних та якісних експертних оцінок. В роботі [83] розглянуто й емпірично оцінено співвідношення ряду ресурсних факторів та обсягів виробництва за географічно суміжними районами Дніпропетровщини, Миколаївщини та Херсонщини. Представлений порівняльний аналіз відображає можливі шляхи розвитку за децентралізації та вказує на найкращі практики його втілення. Географічна близькість досліджуваних регіонів значною мірою виключає гетерогенний вплив зовнішніх факторів, залишаючи ключове місце саме місцевій стратегії розвитку. Політика децентралізації та максимальної відкритості регіонів є досить ефективною для стимулювання економічного зростання, а відтак і підвищення рівня життя населення.

Інвестиції в розвиток транспортної та освітньої інфраструктури виглядають досить непоганим стратегічним рішенням для об'єднаних територіальних громад (ОТГ). Однак для повноцінного успіху цього недостатньо. Кращі шляхи сполучення мають вести до пожвавлення підприємницької діяльності, а інвестиції в освіту – до належно підготовленого кваліфікованого кадрового потенціалу. Інший аспект стратегічного розвитку – прозорість та налагодження відносин з потенційними інвесторами, пошук нереалізованих експортних можливостей

регіону, вивчення кращих практик сусідніх успішних ОТГ, створення сприятливих умов ведення бізнесу та прояву підприємницької ініціативи.

Нехай регіон (область) i України складається з n_i районів (і міст), для яких наявна поновлювальна щоквартальна статистика соціально-економічних показників. Алгоритм оцінки ефективності регіонів складається з наступних кроків [90, 92–94, 97, 98, 102].

Крок 1. Обираємо період для проведення оцінки, починаючи з 2016 р. (раніше 2016 року статистика в розрізі районів не оприлюднювалась)

Крок 2. Формується вектор даних W , що містить значення середньомісячної нарахованої заробітної плати W_t (грн.) штатних працівників у кожному вказаному кварталі для кожного району $j=0, 1, 2, \dots, n_i$ (район з індексом 0 відповідає регіону i в цілому).

Крок 2.1. Формується вектор даних L , що містить значення квартальної нарахованої заробітної плати $L_t = 3W_t$ (грн.) штатних працівників (обсягу праці) у кожному вказаному кварталі (для кожного району $j=0, 1, 2, \dots, n_i$).

Крок 3. Формується вектор даних N , що містить значення чисельності N_t (осіб) наявного населення на кінець кварталу t .

Крок 4. Формується вектор даних C_u , що містить значення, обсягу освоєних (використаних) капітальних інвестицій $C_u = \sum_{t=1}^u C_t$ (тис. грн.) за період T_u перших $u = I, II, III, IV$ кварталів року T .

Крок 5. Якщо для деякого u не оприлюднено значення C_u району k , то обчислюється різниця D_C між значенням C_u (відповідного) регіону і сумою відомих значень C_u районів, а також різниця D_N між значенням N_0 регіону і сумою значень N_j цих районів.

Крок 5.1. Генерується значення $C_u = \frac{N_k D_C}{D_N}$ для кожного такого району k .

Крок 6. Формується вектор даних C , що містить значення обсягу C_t (тис. грн.) капітальних інвестицій за квартал t .

Крок 6.1. Формується вектор даних K , що містить значення обсягу $K_t = \frac{C_t}{N_t}$ (грн.) капітальних інвестицій на душу населення за квартал t .

Крок 7. Формується вектор даних S , що містить значення обсягу S_t (тис. грн.) реалізованих нефінансових послуг в кварталі t .

Крок 8. Якщо для t не оприлюднено значення S_t району i , то обчислюється різниця D_S між значенням S_t регіону і сумою відомих значень S_t районів, а також різниця D_{NS} між значенням N_0 регіону і сумою значень N_j цих районів.

Крок 8.1. Генерується значення $S_t = \frac{N_i D_S}{D_{NS}}$ для кожного такого району i .

Крок 9. Формується вектор даних I , що містить значення обсягу $I_u = \sum_{t=I}^u I_t$ (тис. грн.) реалізованої промислової продукції (товарів, послуг) без ПДВ та акцизу за період T $_u$ перших $u = I, II, III, IV$ кварталів року T .

Крок 10. Якщо для деякого u не оприлюднено значення I_u району m , то обчислюється різниця D_I між значенням I_u регіону і сумою відомих значень I_u районів, а також різниця D_{NI} між N_0 регіону і сумою значень N_j цих районів.

Крок 10.1. Генерується значення $I_u = \frac{N_m D_I}{D_{NI}}$ для кожного такого району m .

Крок 11. Формується вектор даних I , що містить значення обсягу I_t (тис. грн.) реалізованої промислової продукції за квартал t .

Крок 12. Формується вектор даних Y , що містить значення обсягу $Y_t = \frac{S_t + I_t}{N_t}$

(грн.) реалізованих нефінансових послуг і реалізованої промислової продукції на душу (наявного) населення за квартал t .

Крок 13. З результатів побудови крос-секційної регресії $\ln Y_t = a \ln K_t + b \ln L_t + c$ обчислюються залишки R_j функції для всіх районних спостережень $j = 1, 2, \dots, n_i$.

Крок 14. Якщо $\ln Y_{tr} = a \ln K_{tr} + b \ln L_{tr} + c + R_{tr}$, $R_{tr} > 0$, то район r має порівняно вищу економічну ефективність у кварталі t і навпаки.

Зауважимо, що в емпіричних розрахунках на основі статистичних даних $a + b \neq 1$.

За економічною ефективністю стабільними лідерами Тернопільщини (на основі даних за 2017–2018 рр.) є кластери: 1) суміжні Кременецький, Збаразький, Лановецький, Козівський райони, м. Тернопіль, м. Бережани; 2) суміжні Гусятинський, Чортківський Борщівський райони, м. Чортків [98]. Оцінений потенційний експорт області на 64% перевищує спостережуваний.

За економічною ефективністю стабільними лідерами Кіровоградщини (на основі даних за 2017–2018 рр.) є 4 кластери: 1) суміжні м. Кропивницький, Кіровоградський, Новомиргородський, Новоукраїнський райони, м. Знам'янка, м. Олександрія, м. Світловодськ, Світловодський район; 2) Долинський район; 3) Голованівський район; 4) Гайворонський район [92]. Потенційно досяжний експорт області на 54% перевищує поточні обсяги експорту.

За ефективністю економіки промисловості та сфери послуг стабільними лідерами Луганщини (на основі даних за 2017–2018 рр.) є два кластери: 1) суміжні м. Рубіжне, Кременський, Новоайдарський, Старобільський, Біловодський, Попаснянський райони; 2) прикордонні Новопсковський, Марківський і Міловський райони [102]. Загалом потенційний рівень експорту регіону на 43% вище поточного рівня.

РОЗДІЛ 2. СТОХАСТИЧНІ МЕТОДИ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ЗА УМОВ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

2.1 Застосування квантильної регресії для оцінювання еколого-економічних ризиків

Квантильна регресія висуває можливість ширшого погляду на статистику і взаємозалежності між стохастичними змінними. Проста заміна сортування і ранжування спостережень вибірки на оптимізацію дозволяє узагальнювати статистичні моделі. Подібно до того, як мінімізація сум квадратів дозволяє оцінювати багато моделей для функцій умовних середніх, мінімізація простої асиметричної версії абсолютних похибок дає оцінки для умовних квантильних функцій. Для лінійних параметричних моделей обчислення полегшується через формулювання задачі оптимізації як задачі параметричного програмування. Формальні результати двоїстості для задач лінійного програмування ведуть до нової теорії рангових статистик і відповідних статистичних висновків.

Регресійна крива, по суті, дає загальне резюме для середніх розподілів, що відповідають множині спостережень. Можна дістати повнішу картину цієї множини, обчисливши кілька різних регресійних кривих, що відповідають різним відсотковим точкам розподілів. Оскільки зазвичай не будують таких кривих, то регресія часто дає доволі неповну картину множини спостережень. Подібно до того, як середнє дає неповну картину розподілу, регресійна крива дає неповну картину для множини розподілів. Квантильна регресія пропонує всебічну стратегію отримання повної регресійної картини.

Оскільки середнє рідко є задовільним результатом навіть для статистичного аналізу однієї вибірки [133], то часто застосовують міри розкиду, асиметрії (skewness), ексцесу (kurtosis), коробкові графіки (boxplots), гістограми і складніше

оцінювання щільності. Щоб застосовувати подібне в регресії, поверхні умовного середнього, оцінені найменшими квадратами, слід доповнювати кількома оціненими поверхнями умовних квантилів. За наявності оцінювача регресії медіани можуть існувати аналоги для регресії інших квантилів.

Будь-яку дійснозначну випадкову змінну X можна охарактеризувати її функцією розподілу, що виражається через ймовірність P як $F(x) = P(X \leq x)$ та є неперервною справа; τ -квантиль змінної $X \forall \tau \in (0,1)$ визначається як $F^{-1}(\tau) = \inf\{x : F(x) \geq \tau\}$.

Медіана змінної X визначається як $F^{-1}(\tau = 0.5)$. Квантилі виникають з простої, але фундаментальної задачі оптимізації. Нехай у простій теоретичній задачі прийняття рішення втрати задаються кусково-лінійною функцією $\rho_\tau(u) = u(\tau - I(u < 0))$, де при деякому $\tau \in (0,1)$ треба знайти таке значення $u = \hat{x}$ (точкову оцінку), яке мінімізує очікувані втрати;

$$I(z) = \begin{cases} 1 & \Leftarrow z = 1 \\ 0 & \Leftarrow z = 0 \end{cases} \text{ – індикаторна функція булевої змінної } z.$$

Для функції $\rho_\tau(u)$ вивчалася допустимість квантильного оцінювача. Для постеріорної функції розподілу F випадкової змінної X треба мінімізувати

$$\text{очікувані втрати } E\rho_\tau(X - \hat{x}) = (\tau - 1) \int_{-\infty}^{\hat{x}} (x - \hat{x}) dF(x) + \tau \int_{\hat{x}}^{\infty} (x - \hat{x}) dF(x):$$

$$\begin{aligned} 0 &= \frac{\partial E\rho_\tau(X - \hat{x})}{\partial \hat{x}} = (\tau - 1) \int_{-\infty}^{\hat{x}} \frac{\partial (x - \hat{x})}{\partial \hat{x}} dF(x) + \tau \int_{\hat{x}}^{\infty} \frac{\partial (x - \hat{x})}{\partial \hat{x}} dF(x) = \\ &= (1 - \tau) \int_{-\infty}^{\hat{x}} dF(x) - \tau \int_{\hat{x}}^{\infty} dF(x) = \int_{-\infty}^{\hat{x}} dF(x) - \tau \left(\int_{-\infty}^{\hat{x}} dF(x) + \int_{\hat{x}}^{\infty} dF(x) \right) = F(\hat{x}) - \tau. \end{aligned}$$

Оскільки функція розподілу F монотонна, то будь-який елемент множини $\{x : F(x) = \tau\}$ мінімізує очікувані втрати. Коли розв'язок задачі мінімізації є єдиним, то $\hat{x} = F^{-1}(\tau)$; коли такий розв'язок не є єдиним, то для інтервалу значень

τ слід вибрати найменше значення $\hat{x} = F^{-1}(\tau)$, вважаючи, що емпірична квантильна функція неперервна зліва.

Природно, що оцінювач оптимальної точки при асиметричних лінійних втратах веде до квантилів, бо при симетричних втратах абсолютна величина втрат дає медіану. При асиметричних лінійних втратах точковий оцінювач, ймовірно, вестиме до пологішої гілки граничних втрат. Наприклад, якщо граничні втрати недооцінки втричі більші, ніж переоцінки, то треба вибирати таке значення \hat{x} , для якого $P(X \leq \hat{x})$ втричі перевищує $P(X > \hat{x})$, тобто значення \hat{x} на рівні 75 процентилів функції розподілу F .

Оскільки еколого-економічні ризики характеризуються значною асиметрією (наприклад, відносно низькою ймовірністю катастрофічної події), то для їх оцінювання варто застосовувати квантильну регресію [134].

2.2 Вартості досконалої інформації та стохастичного рішення

Якщо результат ω має розподіл $F(\omega)$ і відповідає виграшу $r(x, \omega)$, то визначення найкращого значення $x = x(F(\omega))$ зводиться до певної задачі стохастичної максимізації по x математичного сподівання

$$E_{\omega}[r(x, \omega) | F] = \int_{\omega} r(x, \omega) dF(\omega). \quad (2.1)$$

Якщо основні питання стохастичного програмування пов'язані з пошуком виду функції $r(x, \omega)$ та змінами в розподілі $F(\omega) = F(\omega(x))$, то у статистичній теорії прийняття рішень основним питанням є максимізація по x функції (2.1).

Проілюструємо це на простому прикладі фермерства. Нехай у Європі фермер, спеціалізуючись на вирощування пшениці, кукурудзи і буряку на своїх 500 акрах (5 га) землі, у період між збором урожаю та посівною приймає рішення про виділення площ x_1 , x_2 і x_3 під ці культури 1, 2 і 3 відповідно.

Цей фермер знає, що для годівлі худоби потрібно принаймні 200 т пшениці та 240 т кукурудзи. Ці корми можуть вирощуватися на фермі чи купуватися в оптовика. Будь-який надлишок пшениці чи кукурудзи продаватиметься. Протягом попереднього десятирічного періоду середні ціни продажу пшениці та кукурудзи оптовику становили $P_1 = 170$ дол./т та $P_2 = 150$ дол./т відповідно, перевищуючи на 40% ціни купівлі (з урахуванням маржі оптовика і транспортних витрат). Крім того, очікувана ціна продажу буряку дорівнює $P_3 = 36$ дол./т, але на його виробництво фермер має квоту (quota) $q = 6000$ т, введена Європейською Комісією: будь-який надлишок буряку продаватиметься за ціною $P_4 = 10$ дол./т (тому понадквотовий буряк можна вважати іншим ринковим товаром). Виходячи з минулого досвіду, фермер знає, що середня урожайність на його землі становить $y_1 = 2.5$ т/акр, $y_2 = 3$ т/акр, $y_3 = 20$ т/акр для пшениці, кукурудзи, буряку відповідно. Припустимо, витрати фермера на обробку площ під пшеницю, кукурудзу, буряк становлять $c_1 = 150$ дол./акр, $c_2 = 230$ дол./акр, $c_3 = 260$ дол./акр. відповідно.

Обмеженнями фермера є

$$x_1 + x_2 + x_3 \leq 500, \quad (2.2)$$

$$y_1 x_1 + d_1 - s_1 \geq 200, \quad (2.3)$$

$$y_2 x_2 + d_2 - s_2 \geq 240, \quad (2.4)$$

де d_i та s_i – обсяг купівлі (попиту) та обсяг продажу культури i відповідно за цінами, $i = 1, 2$. Нехай фермер мінімізує свої загальні витрати

$$\begin{aligned} C &= c_1 x_1 + c_2 x_2 + c_3 x_3 + 1.4 P_1 d_1 + 1.4 P_2 d_2 - P_1 s_1 - P_2 s_2 - \\ &\quad - P_3 \min\{q; y_3 x_3\} - P_4 \max\{0; y_3 x_3 - q\} = \\ &= c_1 x_1 + c_2 x_2 + c_3 x_3 + P_1 (1.4 d_1 - s_1) + P_2 (1.4 d_2 - s_2) - \\ &\quad - P_3 \min\{6000; y_3 x_3\} - P_4 \max\{0; y_3 x_3 - 6000\}, \end{aligned} \quad (2.5)$$

обираючи невід'ємні значення $x_1, x_2, x_3, d_1, d_2, s_1, s_2$. Оскільки задача (2.2)–(2.5) є негладкою, введемо додаткову змінну s_3 для обсягу y_3x_3 продажу буряку при $y_3x_3 \leq q$, а також додаткову змінну s_4 для обсягу $(y_3x_3 - q)$ продажу буряку при $y_3x_3 > q$.

Таким чином, задача (2.2)–(2.5) негладкої оптимізації зводиться до задачі лінійного програмування мінімізації по $x_1, x_2, x_3, d_1, d_2, s_1, s_2, s_3, s_4$ функції

$$C = c_1x_1 + c_2x_2 + c_3x_3 + P_1(1.4d_1 - s_1) + P_2(1.4d_2 - s_2) - P_3s_3 - P_4s_4 \quad (2.6)$$

при обмеженнях (2.2)–(2.4), а також обмеженнях

$$s_3 \leq q, \quad (2.7)$$

$$s_3 + s_4 \leq y_3x_3. \quad (2.8)$$

Тоді, застосовуючи MS Excel Solver, знаходимо оптимальні значення:

$$\begin{aligned} x_1^* &= 120, \quad x_2^* = 80, \quad x_3^* = 300, \quad d_1^* = 0, \quad d_2^* = 0, \\ s_1^* &= 100, \quad s_2^* = 0, \quad s_3^* = 6000, \quad s_4^* = 0. \end{aligned} \quad (2.9)$$

При цьому нерівність (2.6) задовольняється як рівність, а знайденим значенням відповідає оптимальна величина цільової функції

$$\begin{aligned} C^* &= c_1x_1^* + c_2x_2^* + c_3x_3^* + P_1(1.4d_1^* - s_1^*) + P_2(1.4d_2^* - s_2^*) - P_3s_3^* - P_4s_4^* = \\ &= 150 \times 120 + 230 \times 80 + 260 \times 300 + 170(1.4 \times 0 - 100) + 150(1.4 \times 0 - 0) - \\ &- 36 \times 6000 - 10 \times 0 = -118600 \text{ [дол.]}, \end{aligned}$$

причому величина $(-C^*)$ означає оптимальний прибуток фермера.

Отже, фермер виділяє достатньо площі під буряк, щоб вийти на свою квоту q . Наступним пріоритетом фермера є пшениця, частину якої можна продати. Кукурудза вирощується для задоволення обмеження 2.4 як рівності.

У певному сенсі оптимальне рішення зводиться до простого евристичного правила виділення площі у порядку зменшення прибутку на акр. Проте обмеження на сівозміну чи оплату праці ускладнюватимуть пошук оптимуму.

Водночас фермер мав різні урожайності для однієї й тієї самої культури в різні роки, головним чином, через погодні умови. Більшість культур потребує вологи протягом кількох тижнів після сіяння чи саджання, а також тепла протягом решти періоду вирощування. Надмірне тепло може вести до посухи і зниження урожайності, але суха погода бажана під час збору урожаю. Тому спостерігаються коливання урожайності відносно середньої, які сягають її чверті. Такі мінливості урожайності можна моделювати за допомогою дискретних корельованих випадкових змінних, а також за допомогою неперервних некорельованих випадкових змінних. Крім того, можливі флуктуації цін.

Хоча в задачі (2.2)–(2.4), (2.6)–(2.8) число допустимих варіантів виділення площ під культури є величезним, стохастичне програмування дозволяє ефективно знаходити найкращий з них. Залежність урожайностей культур від погоди веде до постановки задачі стохастичного програмування.

Коли ділянки для сіяння (саджання) чи набори культур є новими, то фермер не матиме безпосередньої інформації про урожайності. Тому фермер використовуватиме, мабуть, деякий апіорний розподіл урожайності, який уточнюватиме з часом. Така постановка задачі властива статистичній теорії прийняття рішень. Якщо при цьому допустиму площу під кожен культуру вимірювати великими ділянками (скажімо, ділянками по 50 акрів), то число допустимих варіантів істотно зменшуватиметься. Тоді фермер може застосовувати перебірні алгоритми чи процедури стохастичного програмування, уточнюючи свої гіпотези про розподіли урожайності культур.

Таким чином, у цільовій функції (2.1) фермер замінює розподіл F на $F(\omega) = F(\omega(x))$, враховуючи частковий вибір $x = x(F)$ і деякі спостереження ω . Коли множина X є невеликою скінченною, то замість процедур стохастичного програмування можна застосовувати перебірні алгоритми статистичної теорії прийняття рішень.

Сценарний аналіз припускає деяку кореляцію поміж урожайностей різних культур. У спрощеному сценарному аналізі урожайності всіх культур є середніми у звичайний сезон (рік), вищими середніх (скажімо, на 20%) у кращий сезон і нижчими середніх (на 20%) у гірший сезон. Для простоти вважаємо, що погодні умови й урожаї фермера не впливають на ціни.

Фермер знає свої оптимальні значення (2.9) для звичайного сезону, розуміючи, що вони чутливі до урожайності. Для кращого сезону задача (2.2)–(2.4), (2.6)–(2.8) замість y_i використовує $y_i^b = 1.2 y_i$ і має оптимальні значення:

$$\begin{aligned} x_1^* &= 183.33, \quad x_2^* = 66.67, \quad x_3^* = 250, \quad d_1^* = 0, \quad d_2^* = 0, \\ s_1^* &= 350, \quad s_2^* = 0, \quad s_3^* = 6000, \quad s_4^* = 0. \end{aligned} \quad (2.10)$$

Цим значенням відповідають мінімальні витрати

$$\begin{aligned} C^* &= c_1 x_1^* + c_2 x_2^* + c_3 x_3^* + P_1(1.4 d_1^* - s_1^*) + P_2(1.4 d_2^* - s_2^*) - P_3 s_3^* - P_4 s_4^* = \\ &= 150 \times 183.33 + 230 \times 66.67 + 260 \times 250 + 170(1.4 \times 0 - 350) + 150(1.4 \times 0 - 0) - \\ &- 36 \times 6000 - 10 \times 0 = -167667 \text{ [дол.]}. \end{aligned}$$

Для гіршого сезону задача (2.2)–(2.4), (2.6)–(2.8) замість y_i використовує $y_i^w = 0.8 y_i$ і має такі оптимальні значення:

$$\begin{aligned} x_1^* &= 100, \quad x_2^* = 25, \quad x_3^* = 375, \quad d_1^* = 0, \quad d_2^* = 180, \\ s_1^* &= 0, \quad s_2^* = 0, \quad s_3^* = 6000, \quad s_4^* = 0. \end{aligned} \quad (2.11)$$

Цим значенням відповідають мінімальні витрати

$$\begin{aligned} C^* &= c_1 x_1^* + c_2 x_2^* + c_3 x_3^* + P_1(1.4 d_1^* - s_1^*) + P_2(1.4 d_2^* - s_2^*) - P_3 s_3^* - P_4 s_4^* = \\ &= 150 \times 100 + 230 \times 25 + 260 \times 375 + 170(1.4 \times 0 - 0) + 150(1.4 \times 180 - 0) - \\ &- 36 \times 6000 - 10 \times 0 = -59950 \text{ [дол.]}. \end{aligned}$$

Оптимальні значення (2.10) пояснюються тим, що при високих урожайностях потрібно менше площі для вирощування необхідних (за обмеженнями (2.3) і (2.4)) обсягів пшениці та кукурудзи, а також буряку (за обмеженнями (2.7) і (2.8)). При цьому решта площі використовується для пшениці на продаж. При низьких

урожайностях потрібно більше площі для вирощування необхідних обсягів пшениці і кукурудзи, а також буряку. При оптимальних значеннях (2.11) обмеження (2.4) задовольнятиметься при закупівлі кукурудзи.

Порівняння наборів оптимальних значень (2.9)–(2.11) свідчить, що коливання урожайності у межах 20% від середньої (у межах відношення $1.2/0.8 = 1.5 = 150\%$ між відповідними максимумом і мінімумом) веде до помітно більших коливань оптимальних рішень фермера: коливання оптимальної площі під пшеницю від 100 до 183.33 акрів (у межах відношення 183.33%), оптимальної площі під кукурудзу – від 25 до 80 акрів (у межах відношення $80/25 = 3.2 = 320\%$), оптимальної площі під буряк – від 250 до 375 акрів (у межах відношення $375/250 = 1.5 = 150\%$), оптимального прибутку – від 59950 до 167667 дол. (у межах відношення $167667/59950 = 2.80 = 280\%$).

Хоча фермер може користуватися довгостроковими прогнозами погоди для уточнення своїх рішень і зниження їхньої чутливості, немає достатньо точних метеорологічних прогнозів на півроку вперед. Тому для фермера завжди є ризик випадку $s_4 > 0$, а також випадку великого значення $(q - s_3)$, зважаючи на відношення $P_3 / P_4 = 36/10 = 3.6 = 360\%$.

Отже, фермер усвідомлює неможливість прийняття досконалого рішення, що даватиме максимальний прибуток за будь-яких обставин, а тому прагне оцінки виграшів і втрат від кожного рішення в кожній ситуації. Фермер приймає рішення x_1, x_2, x_3 про виділення землі під культури, але не має точних значень стосовно продажу s_1, s_2, s_3, s_4 та закупівлі d_1, d_2 культур, які залежать від урожайностей y_1, y_2, y_3 (за обмеженнями (3), (4), (8)). Нехай індекс (index) $i = 1, 2, 3$ сценарію відповідає кращому, звичайному, гіршому сезону відповідно. Тоді кожному сценарію $i = 1, 2, 3$ відповідають свої оптимальні значення $s_{1i}, s_{2i}, s_{3i}, s_{4i}, d_{1i}, d_{2i}, y_{1i}, y_{2i}, y_{3i}$.

Якщо фермер максимізує свій довгостроковий сподіваний прибуток, вважає всі можливі сценарії $i = 1, 2, 3$ рівноймовірними та є нейтральним до ризику, то мінімізує свою цільову функцію

$$C = \sum_{j=1}^3 c_j x_j + \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 [P_1(1.4d_{1i} - s_{1i}) + P_2(1.4d_{2i} - s_{2i}) - P_3s_{3i} - P_4s_{4i}] \quad (2.12)$$

при обмеженнях (2.2) та модифікаціях обмежень (2.3), (2.4), (2.7), (2.8)

$$y_{1i}x_1 + d_{1i} - s_{1i} \geq 200, i = 1, 2, 3, \quad (2.13)$$

$$y_{2i}x_2 + d_{2i} - s_{2i} \geq 240, i = 1, 2, 3, \quad (2.14)$$

$$s_{3i} \leq q, \quad i = 1, 2, 3, \quad (2.15)$$

$$s_{3i} + s_{4i} \leq y_{3i}x_3, i = 1, 2, 3, \quad (2.16)$$

де $y_{j1} = y_j^b$, $y_{j2} = y_j$, $y_{j3} = y_j^w$, $j = 1, 2, 3$. Модель (2.12)–(2.16) стохастичних рішень відома як задача стохастичного програмування в розширеній формі, оскільки враховує в явному вигляді змінні s_{1i} , s_{2i} , s_{3i} , s_{4i} , d_{1i} , d_{2i} , $i = 1, 2, 3$, рішень другого етапу для всіх сценаріїв. Оптимальний розв'язок задачі (2.12)–(2.16) задається рішеннями першого етапу (які приймаються до реалізації погодних умов і збору урожаю)

$$x_1^* = 170, x_2^* = 80, x_3^* = 250,$$

а також рішеннями другого етапу

$$d_{11}^* = 0 = d_{21}^*,$$

$$s_{11}^* = 310, s_{21}^* = 48, s_{31}^* = 6000, s_{41}^* = 0,$$

$$d_{12}^* = 0 = d_{22}^*,$$

$$s_{12}^* = 225, s_{22}^* = 0, s_{32}^* = 5000, s_{42}^* = 0,$$

$$d_{13}^* = 0, d_{23}^* = 48,$$

$$s_{13}^* = 140, s_{23}^* = 0, s_{33}^* = 4000, s_{43}^* = 0. \quad (2.17)$$

Цим рішенням відповідає оптимальне значення

$$\begin{aligned}
C^* &= \sum_{j=1}^3 c_j x_j^* + \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 [P_1(1.4d_{1i}^* - s_{1i}^*) + P_2(1.4d_{2i}^* - s_{2i}^*) - P_3s_{3i}^* - P_4s_{4i}^*] = \\
&= 150 \times 170 + 230 \times 80 + 260 \times 250 + \\
&+ \frac{1}{3} [170(1.4 \times 0 - 310) + 150(1.4 \times 0 - 48) - 36 \times 6000 - 10 \times 0] + \\
&+ \frac{1}{3} [170(1.4 \times 0 - 225) + 150(1.4 \times 0 - 0) - 36 \times 5000 - 10 \times 0] + \\
&+ \frac{1}{3} [170(1.4 \times 0 - 140) + 150(1.4 \times 48 - 0) - 36 \times 4000 - 10 \times 0] = -108390 \text{ [дол.]}.
\end{aligned}$$

Оптимальний розв'язок полягає у тому, щоб уникати продажу буряка за не вигідною ціною P_4 , дотримуючись обмеження (2.7) як рівності при сценарії 1, а також як строгої нерівності при сценаріях 2 і 3. Площа під кукурудзу виділяється так, щоб задовольняти обмеженню (2.4) при $d_{22} = 0 = d_{23}$ та $d_{23} > 0$, а решта площі виділяється під пшеницю, надлишок якої (за обмеженням (2.3)) можна продати при будь-якому сценарії. При точному прогнозі фермер дотримуватиметься обмеження (2.7) як рівності завжди, а не лише при сценарії 1.

У реальності фермер не має точного прогнозу, а тому вимушений балансувати (хеджувати) свої рішення відносно різних сценаріїв. Ефект хеджування суттєво впливає на сподіваний оптимальний прибуток. Припустимо, урожайності змінюються циклічно: після року із сценарієм 1 йде рік із сценарієм 2, а після року із сценарієм 2 йде рік із сценарієм 3. Фермер приймає рішення (2.9), (2.10), (2.11) при сценарії 1, 2, 3 відповідно, що дає йому прибуток 167667, 118600, 59950 дол. відповідно, або в середньому $\frac{167667 + 118600 + 59950}{3} = 115406$ [дол.] .

Якщо урожайності змінюються не циклічно, а випадково, то при точному прогнозі фермер приймає рішення (2.9), (2.10), (2.11) при сценарії 1, 2, 3 відповідно, отримуючи в довгостроковому періоді сподіваний прибуток 115406 дол. на рік.

За відсутності точного прогнозу сценарію фермер приймає рішення (2.17), отримуючи в довгостроковому періоді сподіваний прибуток 108390 дол. на рік, що менше аналогічного прибутку при точному прогнозі на суму $115406 - 108390 = 7016$ [дол.], яку називають сподіваною вартістю досконалої інформації (expected value of perfect information, EVPI). Отже, наслідком невизначеності є втрата прибутку. За відсутності точного прогнозу сценарію фермер може орієнтуватися на усереднений сценарій 2, приймаючи рішення (2.9) сподіваного значення (expected value solution) на першому етапі:

$$x_1^* = 120, x_2^* = 80, x_3^* = 300. \quad (2.18)$$

Маючи рішення (2.18) на першому етапі, на другому етапі при (кращому) сценарії $i = 1$ фермер обирає рішення $s_{11}, s_{21}, s_{31}, s_{41}, d_{11}, d_{21}$, які при відповідних обмеженнях (2.13)–(2.16)

$$3 \times 120 + d_{11} - s_{11} = y_{11}x_1 + d_{11} - s_{11} \geq 200,$$

$$3.6 \times 80 + d_{21} - s_{21} = y_{21}x_2 + d_{21} - s_{21} \geq 240,$$

$$s_{31} \leq q = 6000,$$

$$s_{31} + s_{41} \leq y_{31}x_3 = 36 \times 300,$$

дозволяють досягати мінімального значення -148000 цільової функції (2.6).

Аналогічно, маючи рішення (2.18) на першому етапі, на другому етапі при сценарії $i = 2$ фермер обирає рішення $s_{12}, s_{22}, s_{32}, s_{42}, d_{12}, d_{22}$ (рішення (2.9)), які при відповідних обмеженнях (2.13)–(2.16)

$$2.5 \times 120 + d_{12} - s_{12} = y_{12}x_1 + d_{12} - s_{12} \geq 200,$$

$$3 \times 80 + d_{22} - s_{22} = y_{22}x_2 + d_{22} - s_{22} \geq 240,$$

$$s_{32} \leq q = 6000,$$

$$s_{32} + s_{42} \leq y_{32}x_3 = 30 \times 300,$$

дозволяють досягати мінімального значення -118600 цільової функції (2.6).

Нарешті, маючи рішення (2.18) на першому етапі, на другому етапі при (гіршому) сценарії $i = 3$ фермер обирає рішення s_{13} , s_{23} , s_{33} , s_{43} , d_{13} , d_{23} , які при відповідних обмеженнях (2.13)–(2.16)

$$2 \times 120 + d_{13} - s_{13} = y_{13}x_1 + d_{13} - s_{13} \geq 200,$$

$$2.4 \times 80 + d_{23} - s_{23} = y_{23}x_2 + d_{23} - s_{23} \geq 240,$$

$$s_{33} \leq q = 6000,$$

$$s_{33} + s_{43} \leq y_{33}x_3 = 24 \times 300,$$

дозволяють досягати мінімального значення -55120 цільової функції (2.6).

Таким чином, подібна двокрокова оптимізація у довгостроковому періоді дає щорічний прибуток $\frac{148000 + 118600 + 55120}{3} = 107240$ [дол.], який менший прибутку 108390 [дол.], який досягається рішенням (2.17) задачі (однокрокової) стохастичної оптимізації (2.12)–(2.16), на вартість стохастичного рішення (value of the stochastic solution, VSS) $108390 - 107240 = 1150$ [дол.].

Отже, розв'язання задачі стохастичної оптимізації дає вигравш, не менший вигравшу, гарантованого фінансовим посередником. У даній задачі фермера EVPI значно перевищує VSS, але є задачі стохастичної оптимізації, де $VSS > EVPI$. Величини VSS та EVPI мотивують розробку методів розв'язання задач стохастичної оптимізації: EVPI вимірює цінність точного знання про майбутнє, а VSS – цінність знання і використання розподілів майбутніх результатів. На практиці є більше інформації про розподіли майбутніх результатів, ніж точного знання про майбутнє. Якщо прогнози, вибірки і дослідження дозволяють точніше дізнаватися про майбутнє, то величина EVPI може служити підставою для проведення подальших прогнозів, вибірок і досліджень.

Загалом задача фермера – це стохастична задача вибору рішень за відсутності повної інформації про деякі випадкові події. Такі рішення називають рішеннями першого етапу і позначають вектором \vec{x} . Після прийняття рішення першого етапу

спостерігається реалізація ω (сценарій i) для деякого випадкового вектора $\vec{\xi}(\omega)$ (вектора $\vec{\xi}$), що дає повну інформацію для прийняття рішення $\vec{y}(\omega)$ другого етапу, яке коригує рішення \vec{x} .

У задачі фермера випадковий вектор – це множина урожайностей і коригуючих дій продажу і купівлі продуктів. Тоді ця задача формулюється як двоетапна задача стохастичного програмування з фіксованою рекурсією, що задається матрицею W , – задача мінімізації по $\vec{x} \geq \vec{0}$ цільової функції

$$\vec{c}^T \vec{x} + E Q(\vec{x}, \vec{\xi}(\omega)) \quad (2.19)$$

при обмеженнях

$$A \vec{x} = \vec{b},$$

де: $Q(\vec{x}, \vec{\xi}(\omega)) = \min_{\vec{y}(\omega) \geq \vec{0}} \{ \vec{q}^T(\omega) \vec{y}(\omega) \mid W \vec{y}(\omega) = \vec{h}(\omega) - T(\omega) \vec{x} \}$; E означає математичне

сподівання відносно випадкового вектора $\vec{\xi}(\omega)$, який складається з компонентів випадкових векторів $\vec{q}^T(\omega)$, $\vec{h}^T(\omega)$ і матриці $T(\omega)$ відповідної вимірності; детерміновані матриця A і вектор \vec{b} мають вимірності, що відповідають вимірності вектора \vec{x} . Функцію

$$f(\vec{x}) = E Q(\vec{x}, \vec{\xi}(\omega))$$

називають функцією вартості рекурсії (recourse value function).

У задачі фермера випадковий вектор $\vec{\xi}(\omega)$ є дискретною змінною, яка приймає тільки 3 різні значення, і складається з елементів випадкової матриці $T(\omega)$. Тоді при сценарії i задачу (2.12)–(2.16) фермера на другому етапі можна записати як задачу мінімізації по $s_1, s_2, s_3, s_4, d_1, d_2$,

$$Q(\vec{x}, i) = 238s_1 - 170d_1 + 210s_2 - 150d_2 - 36s_3 - 10s_4 \quad (2.20)$$

за обмежень

$$t_1(i)x_1 + d_1 - s_1 \geq 200,$$

$$t_2(i)x_2 + d_2 - s_2 \geq 240,$$

$$s_3 + s_4 \leq t_3(i) x_3,$$

$$s_3 \leq 6000,$$

$$\vec{s}, \vec{d} \geq \vec{0},$$

де $t_j(i)$ – це урожайність культури j при сценарії (стані природи) i . Випадковий вектор $\vec{\xi}(\omega) = (\vec{t}_1, \vec{t}_2, \vec{t}_3)$ задачі (2.19) задають три вектори урожайності $\vec{t}_1(i), \vec{t}_2(i), \vec{t}_3(i)$, або три різні вектори $\vec{\xi}_1 = (t_1(1), t_2(1), t_3(1))$, $\vec{\xi}_2 = (t_1(2), t_2(2), t_3(2))$, $\vec{\xi}_3 = (t_1(3), t_2(3), t_3(3))$ задачі (2.20).

Можна сказати, що випадковий вектор $\vec{\xi}(\omega)$ фактично залежить від сценарію $i = 1, 2, 3$. Зазначимо, що в задачі (2.20) рішення $s_1, s_2, s_3, s_4, d_1, d_2$ неявно залежать від сценарію.

Таким чином, задачу стохастичного програмування можна задавати як у розширеній формі (2.12)–(2.16) (коли кожній можливій реалізації випадкового вектора відповідає певний вектор рішення на другому етапі), так і в неявній формі (2.19) або (2.20).

2.3 Моделювання фінансових криз

Гроші й рівні цін відіграють певну роль у поділі ризиків. Тому гроші та кредит, визначаючи рівні цін активів, відіграють роль у запобіганні криз. Відомо, що обсяги грошей і наявних кредитів важливі для визначення цін активів. Ці обсяги були важливими при формуванні фінансових бульбашок. Спекулятивний азіотаж набирає обертів через збільшення цих обсягів.

Незважаючи на емпіричне значення взаємозв'язку монетарної політики та бульбашки цін активів, не було усталеної теорії цих взаємозв'язків [135].

Публікація [136] наукового співробітника Гуверівського інституту Стенфордського університету і Центру європейських досліджень Гарвардського

університету Ніла Фергюсона (Niall Ferguson) присвячена науковому дослідженню еволюції фінансової історії світу та містить відповідний контекст та пояснення причинно-наслідкових процесів фінансових рішень.

Банківська криза і криза обмінного курсу переносяться на реальну економіку, породжуючи рецесію [137, 138]. Такі кризи трапилися в Україні у 2014–2017 рр., але не дістали належного пояснення.

Метою роботи [95] є розробка взаємозв'язку між бульбашками цін активів, фінансовими кризами і функціями центрального банку (ЦБ).

Розпад бульбашки Лоу (John Law, 1671–1729) [136] відкинув розвиток фінансової системи Франції на цілі покоління: у французів вкорінилася недовіра до паперових грошей і фондового ринку. Фіскальна криза французької монархії залишилася невирішеною за часи правління Луї XIV та його наступника Луї XVI. Без ефективного механізму перерозподілу зібрані податки просто витрачалися. Влада безуспішно вдавалася до різних реформ. Врешті-решт, королівське банкрутство прискорило Велику французьку революцію 1789–1799 рр.

Спекулятивний азіотаж набирає обертів через збільшення обсягів грошей і наявних кредитів, а в деяких випадках він розпочинається завдяки такому збільшенню. Збільшення кредитів при фінансовій лібералізації виявлялося важливим у багатьох випадках, де ціни активів зростали, а потім різко спадали. Відомий приклад такого явища – різке підвищення цін акцій (цінних паперів, ЦП) і нерухомості в Японії наприкінці 1980-х рр. з наступним їх спадом у 1990 р. Фінансова лібералізація протягом 1980-х рр. і прагнення до зміцнення долара США наприкінці 1980-х рр. сприяло збільшенню кредитної маси. Протягом більшої частини 1980-х рр. ціни активів постійно зростали, сягнувши, врешті-решт, надзвичайно високого рівня. У 1985 р. індекс Nikkei 225 дорівнював близько 10000, а 19 грудня 1989 р. сягнув рівня 38916. Новий голова правління Банку Японії розпочав жорсткішу монетарну політику, долаючи інфляцію і звертаючи менше уваги на курс долара, що призвело до різкого підвищення відсоткових

ставок на початку 1990-х рр. [139]. У першому півріччі 1990 р. Nikkei 225 швидко спадав, а 1 жовтня 1990 р. впав до рівня 20222: бульбашка луснула. На початку 1990-х рр. в Японії спостерігалися фінансові скорочення й дефолти. Розпад бульбашки негативно вплинув на реальний сектор, темпи зростання якого у 1990-х рр. коливалися навколо нуля. Такі темпи були нетиповими для післявоєнної економіки Японії.

Подібні події траплялися в Норвегії, Фінляндії, Швеції у 1980-х рр. [140].

У Норвегії відношення банківських позик до номінального валового внутрішнього продукту (ВВП) зросло від 40% у 1984 р. до 68% у 1988 р. при помітному збільшенні цін активів, інвестицій, споживання. Спад цін на нафту сприяв розпаду фінансової бульбашки і спричинив найсерйознішу післявоєнну банківську кризу і рецесію Норвегії.

У Фінляндії інфляційний бюджет 1987 р. спричинив значне збільшення кредитної маси. Відношення банківських позик до номінального ВВП зросло від 55% у 1984 р. до 90% у 1990 р. Протягом 1987–1988 рр. ціни на житло зросли на 68%. Для вгамування кредитного буму у 1989 р. ЦБ Фінляндії збільшив відсоткові ставки і резервні вимоги, але у 1990–1991 рр. ситуацію погіршив спад торгівлі з СРСР: ціни активів спадали, а банки шукали підтримки уряду. ВВП Фінляндії знизився на 7%.

У Швеції стійке збільшення кредитної маси наприкінці 1980-х рр. призвело до буму ринку нерухомості. У другому півріччі 1990 р. внаслідок жорсткішої монетарної політики відсоткові ставки зросли, а у 1991 р. багато банків мало серйозні труднощі через попередні позики, основані на інфляційних цінах активів. Це призвело до втручання уряду Швеції та рецесії.

Яскравим прикладом новопосталої ринкової економіки, що зазнала подібної проблеми, є Мексика. На початку 1990-х рр. після приватизації банків відбулася фінансова лібералізація, яка зняла резервні вимоги. Частка у ВВП банківських кредитів приватним нефінансовим установам зросла від 10% наприкінці 1980-х рр.

до 40% у 1994 р. На початку 1990-х рр. фондовий ринок помітно зростав. Однак 23 березня 1994 р. пострілами впритул був убитий кандидат у президенти Мексики Колосіо-Муррієта (Colosio-Murrieta, 1950–1994), в кар'єрі якого є навчання в університеті Пенсильванії та дослідження у Міжнародному інституті прикладного системного аналізу (International Institute for Applied Systems Analysis, IIASA); з IIASA постійно успішно співпрацює Інститут кібернетики імені В.М.Глушкова НАН України. Фінансова бульбашка луснула після цього замаху і початку збройного повстання місцевих мешканців проти латифундистів у провінції Чіпас (Chiapas) у 1994 р. Впали ціни акцій та інших активів, сталася банківська криза, обвалилася національна валюта, розпочалася важка рецесія.

Вищенаведені приклади вказують на взаємозв'язок між істотними підвищеннями цін активів (позитивними бульбашками) і грошово-кредитною політикою, а також на те, що розпад бульбашки може вести до серйозних проблем: спад цін активів веде до тисків на банківський сектор. Банки, що є держателями нерухомості та ЦП, ціна яких спадає (чи позик власникам цих активів), часто потрапляють під серйозний тиск зменшення активів при фіксованих зобов'язаннях. Тоді банки змушені відкликати позики, позбавляючись відповідних активів, що, в свою чергу, посилює проблему спаду цін активів – проблему негативної бульбашки. Негативні бульбашки, де ціни активів занадто спадають, можуть шкодити банківській системі, яка, в свою чергу, може ускладнювати проблеми реальної економіки. Грошово-кредитна політика може як сприяти позитивним ціновим бульбашкам, так і запобігати надмірно негативним ціновим бульбашкам. У наведених прикладах Норвегії, Фінляндії, Швеції, Мексики ціни активів швидко відновилися, а зовнішні ефекти для реальної економіки виявилися нетривалими. Водночас в Японії ціни активів довго (до 2005 р.) не відновлювалися, а реальна економіка виявляла меншу робастність.

Відома теорія взаємозв'язку між збільшенням кредитної маси і позитивними бульбашками, основана на проблемі агентства (agency problem) [141]. Багато

інвесторів у нерухомість і фондовий ринок отримують свої інвестиційні кошти із зовнішніх джерел. Якщо кінцеві надавачі коштів не здатні спостерігати характеристики конкретної інвестиції, то виникає класична проблема зсуву ризику (risk-shifting). Зсув ризику збільшує віддачу на інвестицію в ризикові активи і спонукає інвесторів збільшувати ціни вище фундаментальних рівнів. Таким чином, вирішальною детермінантою цін активів є обсяг наданих кредитів. Процес фінансової лібералізації, збільшуючи кредитну масу і створюючи невизначеність щодо майбутньої динаміки такого збільшення, за проблеми агентства може вести до бульбашки цін активів.

До позитивних бульбашок, що призводили до згаданих фінансових криз, веде певна послідовність подій.

Спочатку має місце певна фінансова лібералізація, яка веде до помітного збільшення кредитної маси. Банки значно збільшують обсяг позик. Деякі позики фінансують нові інвестиції. Багато цих інвестицій використовується для купівлі таких активів, як акції та нерухомість. Оскільки пропозиція подібних активів є фіксованою, то їх ціни зростають вище їхніх фундаментальних рівнів. Постають проблеми короткого продажу (short selling) – продажу «ведмедами» цінних паперів, яких вони не мають (які позичають у брокерів), сподіваючись на зниження цін і проведення оберненої операції. Такий продаж є ризикованим. На практиці такий продаж не дає цінам знижуватися до рівня, передбаченого стандартною теорією. Процес зростання цін триває до тих пір, коли а) стається певна реальна подія, яка означає малі віддачі на активи в майбутньому, та/або б) ЦБ змушений обмежити кредитну масу, запобігаючи інфляції й «перегріву» («overheating») економіки. Наслідком подій а) та/або б) є різкий спад цін акцій і нерухомості. Виникає банківська криза, бо активи в цінах позитивної бульбашки виступали в якості кредитної застави. Також можлива криза обмінного курсу, коли інвестори виводять свої кошти з країни, а ЦБ країни захищає банківську систему, незважаючи на обмінний курс.

Хоча подібні бульбашки і кризи часто пов'язують з особливостями даної країни, в наведених прикладах Японії, Норвегії, Фінляндії, Швеції, Мексики відбувалася вищезазначена послідовність подій. Тому таку послідовність можна вважати загальним явищем, яке охоплює появу бульбашки, реакцію банківської системи, розпад бульбашки.

У стандартних моделях ціноутворення активів вважається, що люди інвестують свої власні гроші. Відповідний рівень цін називають фундаментальним. Говорять, що настає бульбашка, коли ціна активу зростає вище фундаментального рівня [142]. При цьому люди, які приймають інвестиційні рішення, беруть позики через дефолт і беруть до уваги лише вищу частину розподілу віддач на ризиковий актив [141; 143]. Тоді виникає проблема зсуву ризику, а ціна ризикового активу зростає вище фундаментального рівня, створюючи бульбашку.

Дослідимо раціональну поведінку людей, які приймають інвестиційні рішення, розраховуючи на взяті позики. У випадку дефолту вони розраховують на обмежену відповідальність. Оскільки позикодавці не можуть спостерігати за ризикованістю інвестованих проектів, то виникає проблема агентства. У випадку нерухомості ця проблема очевидна. У випадку ЦП існують крайні межі, які не дозволяють людям безпосередньо брати позики для інвестування в даний ЦП. У багатьох країнах інвестиційні рішення на ринку визначають не фізичні, а юридичні особи – інституційні інвестори (менеджери). Для інституційного менеджера теж існує проблема агентства з борговими контрактами. Крім того, структура стимулювання подібна до боргового контракту: якщо активи, в які інвестують менеджери, є успішними, то менеджери залучають більше коштів у майбутньому і тому дістають вищі платежі; якщо ж активи не є успішними, то менеджери сплачують штрафи і ризикують стати звільненими. Ця структура визначає функції, аналогічні до функцій обмеженої відповідальності [142].

На кожну одиницю безризикового активу, інвестовану у період часу $t = 1$, у період $t = 2$ очікується виграш 1.5; це означає дисконт $r = 50\%$. Припустимо, такий актив має змінну пропозицію. На одиницю ризикового активу А, куплену за ціною P у період часу $t = 1$, у період $t = 2$ очікується винагорода R , рівна 6 з імовірністю 0.25 і рівна 1 з імовірністю 0.75; загальна очікувана винагорода від активу А рівна $ER = 6 \times 0.25 + 1 \times 0.75 = 1.5 + 0.75 = 2.25$. Припустимо, ризиковий актив має фіксовану пропозицію, рівну 1.

Нехай у період часу $t = 1$ кожний з двох інвесторів має статки, рівні 1, і безпосередньо їх інвестує. Якщо кожний інвестор нейтральний до ризику, то граничні віддачі на обидва вищезазначені активи мають бути однаковими:

$$\frac{2.25}{P} = \frac{1.5}{1}, \quad P_F = \frac{2.25}{1.5} = 1.5 = 1 \times (1 + r). \quad (2.21)$$

Очікуваний виграш 1.5 на одиницю інвестицій у безризиковий актив за ціною 1 є таким самим, як на $\frac{1}{1.5}$ одиниць інвестицій у ризиковий актив за ціною P_F . Отже, фундаментальна ціна ризикового активу – це майбутня вартість виграшу при даному дисконті чи даній альтернативній вартості. Будь-яку вищу ціну цього активу називають бульбашковою.

Нехай тепер у період часу $t = 1$ кожний інвестор не має власних статків, але може брати позики під кредитну ставку $r_l = \frac{1}{3} = 0.333$ для купівлі активів. Обсяг позик не перевищує 1: якщо інвестор бере позику обсягом 1, то віддає суму 1.33, якщо здатний віддати цю суму; якщо ж інвестор не здатний віддати цю суму, то позикодавець має право претендувати на будь-що, що є в інвестора.

Коли інвестор бере позику обсягом 1 та інвестує її у безризиковий актив, то дістає граничну віддачу

$$r - r_l = 0.5 - 0.33 = 0.17. \quad (2.22)$$

Коли ж інвестор бере позику обсягом 1 та інвестує у ризиковий актив X, то купує обсяг $\frac{1}{P_F} = \frac{1}{1.5}$ цього активу за фундаментальною ціною. При винагороді

$R=6$ інвестор віддає позикодавцю суму 1.33, залишаючи решту собі, а при винагороді $R=1$ інвестор не здатний віддати позикодавцю потрібну суму і позикодавець забирає цю винагороду, залишаючи інвестора без виграшу.

Очікувана гранична віддача інвестору на ризиковий актив рівна

$$0.25 \left(\frac{1}{P_F} \times 6 - 1.33 \right) + 0.75 \times 0 = 0.25 (4 - 1.33) = 0.25 \times 2.67 = 0.67 > 0.17. \quad (2.23)$$

Таким чином, для інвестора ризиковий актив вигідніший, ніж безризиковий. Водночас для позикодавця безризиковий актив вигідніший, ніж ризиковий: при інвестиції у безризиковий актив позикодавець дістає 1.33, а при інвестиції у ризиковий актив позикодавець дістає

$$0.25 \times \frac{4}{3} + 0.75 \times \frac{1}{1.5} = \frac{1 + 0.75 \times 2}{3} = \frac{2.5}{3} = \frac{5}{6} = 0.83.$$

В обох випадках сумарний виграш інвестора і позикодавця дорівнює P_F :
 $0.17 + 1.33 = 1.5 = 0.67 + 0.83$.

Ризик дефолту дозволяє змістити виграш $0.67 - 0.17 = 0.5$ від позикодавця до позичальника (інвестора). Оскільки позикодавець не спостерігає за ризикованістю проектів позичальника, то не може запобігати інвестуванню у ризиковий актив [144; 145] (один з авторів роботи [145] – Нобелівський лауреат 2001 р.).

За рівноважної ціни P_X ризикового активу X виграші (2.22) і (2.23) однакові:

$$\frac{1.5}{P_X} - \frac{1}{4} \times \frac{4}{3} = 0.25 \left(\frac{1}{P_X} \times 6 - 1.33 \right) + 0.75 \times 0 = r - r_f = 0.5 - 0.33 = 0.17 = \frac{0.5}{3}, \quad (2.24)$$

$$\frac{3 \times 1.5}{P_X} - 1 = 0.5, \quad P_X = 3 > 1.5 = P_F.$$

Отже, рівноважна ціна за проблеми агентства виявляється бульбашковою.

Згідно із стандартною теорією корпоративних фінансів, фірми, які здійснюють інвестиції за рахунок боргу, не звертають уваги на величину чистої поточної вартості; згідно з теорією ціноутворення активів за проблеми агентства, такі фірми купують ризикові активи за бульбашковими цінами.

Замість активу X розглянемо актив Y , що має ту саму очікувану винагороду чи той самий спред, зберігаючи середнє (mean-preserving spread): у період $t = 2$ очікується винагорода R , рівна 9 з імовірністю 0.25 і рівна 0 з імовірністю 0.75; загальна очікувана винагорода від активу Y рівна $ER = 9 \times 0.25 + 0 \times 0.75 = 2.25$. Ціна активу Y визначається співвідношенням (2.24):

$$\frac{9}{4P_Y} - \frac{1}{4} \times \frac{4}{3} = 0.25 \left(\frac{1}{P_Y} \times 9 - 1.33 \right) + 0.75 \times 0 = r - r_f = 0.5 - 0.33 = 0.17 = \frac{0.5}{3},$$

$$\frac{3 \times 9}{4P_Y} = 1 + 0.5 = \frac{3}{2}, \quad P_Y = \frac{3 \times 9 \times 2}{4 \times 3} = 4.5 > 3 = P_X > 1.5 = P_F.$$

Величина зсуву ризику залежить від ризикованості активу: чим більший ризик, тим більший потенціал зсуву ризику і тим вища ціна активу.

Важливо підкреслити, що акції високотехнологічних компаній були найкращими під час бумів фондового ринку як у 1920-х рр., так і у 1990-х рр. У 1920-х рр. найкращими були акції радіокомпаній та комунальних підприємств [146], а у 1990-х рр. – акції телекомунікаційних компаній, засобів масової інформації, галузей відпочинку і новітніх технологій. Саме ці акції мали найменш визначені виграші.

Одним з важливим питань є те, чому банки готові надавати позики інвесторам, які можуть зазнати дефолту. Коли інвестор бере позику для купівлі активу X (пропозиція якого рівна 1) за рівноважною ціною $P_X = 3$, то купує обсяг

$\frac{1}{P_X} = \frac{1}{3}$ цього активу: якщо позикодавці мають кошти обсягом 10 для 10 позичальників (кожний з яких бере позику обсягом 1), то 3 позичальники повністю викуповують актив X , а 7 позичальників купують безризиковий актив.

Тоді 30% позичальників інвестують в ризиковий актив, а 70% – в безризиковий; очікуваний виграш банку (позикодавців і вкладників) на одиницю позики дорівнює сумі двох доданків

$$\begin{aligned} & 0.3 \left[0.25 \times 1.33 + 0.75 \times \frac{1}{3} \times 1 \right] + 0.7 \times 1.33 = 0.3 \left[\frac{1}{4} \times \frac{4}{3} + \frac{3}{4} \times \frac{1}{3} \right] + 0.7 \frac{4}{3} = \\ & = 0.3 \left[\frac{1}{3} + \frac{1}{4} \right] + \frac{2.8}{3} = \frac{0.3(4+3) + 2.8 \times 4}{12} = \frac{2.1 + 11.2}{12} = \frac{13.3}{12} = 1.11 \end{aligned}$$

Перший доданок – це виграш банку від 30% інвесторів в актив X: з імовірністю 0.25 винагорода рівна 6, а інвестор віддає належну суму 1.33; з імовірністю 0.75 винагорода рівна 1, інвестор не здатний віддати належну суму 1.33, а банк забирає обсяг $\frac{1}{3}$ активу X, який дав винагороду 1. Другий доданок – це виграш банку від 70% інвесторів у без ризиковий актив, кожний з яких віддає належну суму 1.33.

У конкурентному банківському секторі зазначений виграш банку йде вкладникам, на яких припадає тягар проблеми агентства при сегментації фінансових ринків: вкладники і банки не мають доступу до активів, в які інвестують позичальники на взяті кредити; якби вкладники і банки мали такий доступ, то інвестували б у безризиковий актив, а не у депозити.

У наведених прикладах агрегований обсяг B наявних у банках кредитів, який визначає ЦБ (встановлюючи резервні вимоги і визначаючи обсяг активів як резервне покриття), і відсоткова ставка r_f вважалися екзогенними, але окрім цього вони є і взаємозалежними.

Віддача на безризиковий актив визначається граничною продуктивністю капіталу в економіці країни. Ця продуктивність, в свою чергу, залежить від обсягу x споживчого продукту, який інвестується у період $t=1$ і дає обсяг $f(x)$ продукції у період $t=2$ при даній виробничій технології. Якщо ризиковий актив має фіксовану пропозицію 1 і ціну P , то у період $t=1$ має місце бюджетне

обмеження $x = B - P$. Якщо $f(x) = 3\sqrt{x}$, то в конкурентному банківському секторі (на конкурентному ринку позик, де кожний інвестор здатний брати в кожному банку позику, не більшу B)

$$r_l = f'(x) = \frac{1.5}{\sqrt{x}} = \frac{1.5}{\sqrt{B-P}}. \quad (2.25)$$

Число банків нормуємо до 1 (або 100%); число інвесторів теж нормуємо до 1. При ставці, нижчій рівня (2.25), попит на взяття банківських позик для інвестування у безризиковий актив був би нескінченним. При ставці, вищій рівня (2.25), попит на взяття таких позик був би нульовим; останнє суперечить властивості $f'(x) = \infty$. Інвестору байдуже купувати ризиковий актив X за ціною P чи ні, якщо його виграш від такої інвестиції нульовий [9]:

$$0 = 0.25 \left(\frac{1}{P} \times 6 - r_l \right) + 0.75 \times 0 = \frac{6}{4P} - \frac{1}{4} \times \frac{1.5}{\sqrt{B-P}}, \quad (2.26)$$

$$6\sqrt{B-P} = 1.5P, \quad P = 4\sqrt{B-P}, \quad P^2 = 16(B-P), \quad P^2 + 16P - 16B = 0,$$

$$P(B) = \frac{-16 \pm \sqrt{16^2 + 4 \times 1 \times 16B}}{2} = \frac{-16 \pm 4\sqrt{16 + 4B}}{2} = -8 \pm 4\sqrt{4+B}. \quad (2.27)$$

В силу $P > 0$ маємо $P = -8 + 4\sqrt{4+B}$. Тоді при $B = 5$ маємо

$$P = -8 + 4\sqrt{4+B} = -8 + 4\sqrt{4+5} = -8 + 4 \times 3 = 4, \quad r_l = \frac{1.5}{\sqrt{B-P}} = \frac{1.5}{\sqrt{5-4}} = 1.5.$$

ЦБ управляє рівнем відсоткових ставок відповідно до залежності (2.25) і рівнем цін активів відповідно до залежності (2.27). На відміну від стандартної лінійної залежності (2.21), залежність (2.27) є нелінійною, причому

$$\begin{aligned} P - P_F &= -8 + 4\sqrt{4+B} - \frac{1}{1+r} > -8 + 4\sqrt{4+B} - \frac{1}{1+r_l} = \\ &= -8 + 4\sqrt{4+B} - \frac{\sqrt{B-P}}{\sqrt{B-P} + 1.5} = \frac{4(-2 + \sqrt{4+B})(\sqrt{B-P} + 1.5) - \sqrt{B-P}}{\sqrt{B-P} + 1.5}. \end{aligned}$$

Можна очікувати, що при досить загальних умовах має місце фундаментальна нерівність $P > P_F$: за проблеми агентства, зміни B можуть вести до порівняно великих змін P .

На практиці ЦБ має обмежену спроможність управляти обсягом B : значення B є випадковим. Крім того, можливі зміни у стратегічних перевагах, у внутрішньому чи зовнішньому середовищі ЦБ створюють ще більшу невизначеність стосовно B . Ця невизначеність особливо велика в країнах, де відбувається фінансова лібералізація. Для вивчення впливу цієї невизначеності додаємо в модель період часу $t=0$: у час між періодами 0 та 1 існує невизначеність стосовно рівня B у період $t=1$ – фінансова невизначеність. Ця невизначеність спричинює невизначеність щодо цін активів у період $t=1$. Оскільки поведінка інвесторів, які беруть банківські позики у період 0, не залежить від такої цінової невизначеності, то залишаються проблеми агентства і зсуву ризику: ціна ризикового активу у період 0 відображає таку цінову невизначеність і може перевищувати його ціну у період 1. Нехай значення B дорівнює 5 або 7 з імовірністю 0.5. В силу співвідношення (2.27) маємо

$$P(B=5) = -8 + 4\sqrt{4+B} = -8 + 4\sqrt{4+5} = 4,$$

$$P(B=7) = -8 + 4\sqrt{4+B} = -8 + 4\sqrt{4+7} = 5.27 > 4 = P(B=5),$$

а в силу співвідношення (2.25) –

$$r_t(B=5) = \frac{1.5}{\sqrt{B-P}} = \frac{1.5}{\sqrt{5-4}} = 1.5, \quad r_t(B=7) = \frac{1.5}{\sqrt{B-P}} = \frac{1.5}{\sqrt{7-5.27}} = 1.14.$$

Аналогічно до співвідношення (2.26) маємо рівняння ціноутворення ризикового активу (з вищою ймовірною ціною) в період 0:

$$0 = 0.5 \left(\frac{1}{P_0} \times 5.27 - r_{t0} \right) + 0.5 \times 0 = \frac{5.27}{2P_0} - \frac{1.5}{2\sqrt{B_0 - P_0}},$$

$$P_0 = \frac{5.27}{1.5} \sqrt{B_0 - P_0} = \frac{-8 + 4\sqrt{11}}{1.5} \sqrt{B_0 - P_0} = 3.51 \sqrt{B_0 - P_0},$$

$$(P_0)^2 + 12.33 P_0 - 12.33 B_0 = 0,$$

звідки для середнього значення $B_0 = \frac{5+7}{2} = 6$ випливає

$$P_0(B_0 = 6) = \frac{-12.33 + \sqrt{12.33^2 + 4 \times 12.33 \times 6}}{2} = 4.42 \in (P(B=5), P(B=7)),$$

$$r_{i_0}(B_0 = 6) = \frac{1.5}{\sqrt{B_0 - P_0}} = \frac{1.5}{\sqrt{6 - 4.42}} = 1.19.$$

При тому самому середньому $B_0 = \frac{4+8}{2} = 6$ для значень 4 або 8 з імовірністю

0.5 має місце більша фінансова невизначеність. В силу співвідношення (2.27)

$$P(B=4) = -8 + 4\sqrt{4+B} = -8 + 4\sqrt{4+4} = 3.31,$$

$$P(B=8) = -8 + 4\sqrt{4+B} = -8 + 4\sqrt{4+8} = 5.86 > 3.31 = P(B=4),$$

а в силу співвідношення (2.25) –

$$r_i(B=4) = \frac{1.5}{\sqrt{B-P}} = \frac{1.5}{\sqrt{4-3.31}} = 1.81, \quad r_i(B=7) = \frac{1.5}{\sqrt{B-P}} = \frac{1.5}{\sqrt{8-5.86}} = 1.03.$$

Аналогічно до співвідношення (2.26) маємо рівняння ціноутворення ризикового активу (з вищою ймовірною ціною) в період 0:

$$0 = 0.5 \left(\frac{1}{P_0} \times 5.86 - r_{i_0} \right) + 0.5 \times 0 = \frac{5.86}{2P_0} - \frac{1.5}{2\sqrt{B_0 - P_0}},$$

$$P_0 = \frac{5.86}{1.5} \sqrt{B_0 - P_0} = \frac{-8 + 4\sqrt{12}}{1.5} \sqrt{B_0 - P_0} = 3.90 \sqrt{B_0 - P_0},$$

$$(P_0)^2 + 15.24 P_0 - 15.24 B_0 = 0,$$

звідки для середнього значення $B_0 = \frac{4+8}{2} = 6$ випливає

$$P_0(B_0 = 6) = \frac{-15.24 + \sqrt{15.24^2 + 4 \times 15.24 \times 6}}{2} = 4.61 \in (P(B=4), P(B=8)),$$

$$r_{i_0}(B_0 = 6) = \frac{1.5}{\sqrt{B_0 - P_0}} = \frac{1.5}{\sqrt{6 - 4.61}} = 1.27.$$

Зсув фінансового ризику відбувається подібно до зсуву реального ризику. Очікувана винагорода від ризикового активу X або Y у період 2 становить 2.25, позаяк у період 1 його ціна становить від 4.42 до 4.61: ринкова ціна може значно перевищувати фундаментальний рівень. Можливість збільшення кредитної маси протягом тривалого часу породжує суттєву невизначеність щодо величини бульбашки і моменту її розпаду, особливо під час лібералізації економіки.

Вищенаведені приклади показують, що для визначення ціни ризикового активу в період 0 важливі очікування стосовно агрегованої кредитної маси B . Коли ця маса зростає, то ціни активів підвищуються, що дозволяє уникати дефолту; коли ж ця маса спадає, то ціни активів знижуються, що створює дефолт. Таким чином, важлива динаміка агрегованої кредитної маси. Очікування стосовно цієї динаміки впливають на рішення інвесторів про те, скільки брати позик і за скільки купувати ризиковий актив. Якщо величина B менша очікуваної чи нижча максимальних прогнозованих рівнів, то інвестори можуть стати неспроможними обслуговувати свої борги, що означає дефолт: дефолт може статися при постійному зростанні B [141]. Якщо величина B близька до максимальних прогнозованих рівнів, але нижча них, то дефолт відбувається майже напевне.

Фінансова система є досить крихкою і вразливою, потребує належного регулювання і суспільного нагляду. Надмірне зростання цін активів порівняно з вартістю реальних благ які вони генерують є ознакою зародження фінансової бульбашки, – центральний банк країни є тією інституцією, яка повинна забезпечити цінову стабільність та здійснювати нагляд за збалансованістю агрегатів грошової маси, інфляції, відсотком рефінансування та продуктивністю реальної економіки країни, уникаючи надмірного перегріву економіки, утворення цінових бульбашок та їх краху що неминуче призводить до рецесії.

2.4 Обґрунтування дифузійної моделі впровадження інновацій та її застосування до поширення вакцинацій

У статті [2] докладно вивчаються передумови та припущення класичної моделі Басса поширення інновацій з метою її застосування до моделювання актуальних стохастичних процесів, пов'язаних з пандемією. Модель Басса довела свою універсальність і застосовність до різних середовищ, наведені ретельні математичні обґрунтування властивостей моделі з метою її подальшого розвитку, пошуку параметрів невизначеності та спостережуваних змінних, ґрунтуючись на теоріях еволюційних рівнянь і стохастичних процесів. У статті отримано реалістичні результати оцінювання параметрів моделі Басса для вакцинацій у Білорусі та Україні на тижневих даних першого півріччя 2021 р. і запропоновано проведення подібних досліджень для інших держав, а також регіонів України.

Класична публікація [147] у 2004 р. була названа Інститутом дослідження операцій та управлінських наук (Institute for Operations Research and the Management Sciences, INFORMS) однією з десяти найвпливовіших за всю історію журналу «Management Science» (на 2021 р. ця стаття має понад 10 тисяч цитувань), який видається з 1954 р. і на 2021 р. мав h-індекс 255 у квартилі Q1.

Починаючи з 1990 р., Товариство маркетингових наук INFORMS присуджує премію Френка Басса за найкращу публікацію у виданнях INFORMS з докторських дисертацій. Френк Басс був першим лауреатом премії О'Делла Американської асоціації маркетингу (ААМ) 1979 р. за публікацію [148], лауреатом премії Конверса (започаткованої у 1946 р.) ААМ 1986 р., премії Літтла (першого доктора філософії з дослідження операцій та першого президента INFORMS) INFORMS (започаткованої у 1982 р.) 1988 р. за найкращу публікацію з менеджменту чи маркетингу [149] (ця публікація вийшла після двох доопрацювань), премії Мейнарда (започаткованої у 1974 р.) 1991 р. за кращу публікацію в журналі «Journal of Marketing» [150] (ця публікація є скороченим

варіантом поданого до редакції журналу матеріалу), премії Черчілля (започаткованої у 1996 р.) ААМ 2002 р., премії Парліна (започаткованої у 1945 р.) ААМ та Уортонської школи бізнесу (заснованої у 1881 р.; найкращої школи бізнесу світу за рейтингом «Financial Times») 2003 р.

Згадана класична публікація [147] основана на препринті [151] із дещо зміненою назвою. У свою чергу, зазначений препринт [151] оснований на доповіді на конференції [152]: еволюція від доповіді на конференції до препринту й завершеної журнальної публікації є перевіреним шляхом досягнення якісних науково-практичних результатів.

2.4.1 Постановка проблеми

При вимірюванні характеристик пандемії фахівці звертаються до аналізу та оцінювання еволюційних моделей [153–158], зокрема, до дифузійної моделі Басса [159, 160]. Коментарі фахівців про застосування моделі Басса для моделювання поширення пандемії зосереджувалися на важливості емпіричних даних [160, 161], заходів охорони здоров'я [160, 162], невизначених факторів [134, 160, 163, 164], організаційних пріоритетів [1, 160, 165]. Таким чином, модель Басса заслуговує докладного вивчення, а її висновки – ретельного обґрунтування.

Метою дослідження є розробка математичного обґрунтування висновків класичної публікації [147], а також застосування дифузійних процесів не лише для моделювання динаміки інфікованих осіб, але і до динаміки вакцинованих осіб на реальних даних. Насамперед, зазначимо, що в моделі Басса інновацією вважається споживання нового продукту, яким на сучасному фармацевтичному ринку є та чи інша вакцина [162].

Для оцінювання термінів початкових закупівель нових продуктів можна запропонувати теоретичну модель, а також перевірити її на емпіричних даних споживчих товарів тривалого користування, скажімо, на даних продажів

кольорових телевізорів 1960-х років [147]. Основне припущення моделі полягає у тому, що ці терміни пов'язані з кількістю попередніх покупців. У поведінці моделі можна виділити інноваційну та імітаційну складові. На історичних даних запропонована модель задовільно передбачає пік продажів і момент цього піку.

Ця модель може застосовуватися при зростанні первинних закупівель широкого спектра характерних нових загальних класів продуктів: розрізняються нові класи продуктів і нові бренди чи моделі старих класів продуктів (яких купують частіше).

Для нових брендів або продуктів відомі моделі експоненціального зростання продажів до певної асимптоти: продажі швидко зростають до моменту досягнення свого піку, а потім стабілізуються на певному рівні нижче піку. Стабілізуючий ефект пояснюється відносним зростанням резервної закупівельної складової продажів і зниженням складової початкових закупівель.

Довгострокове прогнозування продажів нових продуктів потребує не лише інтуїції, але й інформації. Таке прогнозування математично пов'язано з моделями зараження, які знайшли широке застосування в епідеміології [166, 167]. Припущення щодо поведінки у певний мірі подібні до теоретичних концепцій, які постають у літературі з прийняття та дифузії нових продуктів [168], а також до деяких моделей навчання [169]. Присутність явних поведінкових припущень відрізняє запропоновану модель від моделей, основаних на логнормальному розподілі, та інших моделей зростання продажів.

У загальних теоріях прийняття та дифузії (розповсюдження) нових ідей чи нових продуктів у соціальній системі [169] непросто розрізнити припущення та наслідки, потрібні для оцінювання термінів прийняття нових ідей чи продуктів.

Якщо особа вирішує прийняти інновацію незалежно від рішень інших осіб у соціальній системі, то таку особу називають новатором: зазвичай можна вважати, що новатори – ті, хто першими впроваджують інновацію. Серед подібних осіб виділяють такі класи наслідувачів (adopters) інновації, за хронологією рішень

прийняти інновацію: 1) новатори; 2) ранні наслідувачі; 3) рання більшість; 4) пізня більшість; 5) відстаючі.

Виділяючи окремо новаторів, наслідувачі (інновації та відповідної поведінки) характеризуються періодами часу, коли вони вирішували приймати інновацію, – тисками соціальної системи, які зростали на пізніших наслідувачів за рахунок числа попередніх наслідувачів. У математичній постановці класи 2)–5) можна об'єднати в групу імітаторів. На відміну від новаторів, імітатори є залежними від періодів часу рішень інших членів соціальної системи прийняти інновацію. До новаторів можна віднести перші 2.5 % наслідувачів [169], які володіють певними соціально-психологічними якостями і є здатними до взаємодії з іншими новаторами. Новатори не є залежними від періодів часу рішень інших членів соціальної системи прийняти інновацію. При розгортанні процесу наслідування тиск на новаторів щодо прийняття інновації радше спадає, а не зростає.

2.4.2. Математична модель

Модель зростання і спаду попиту на послідовні покоління технологічних інновацій має брати до уваги ефекти дифузії та заміщення (заміни). Відомою є дифузійна модель Басса попиту першої покупки [147, 151, 152]. Ця модель має поведінкове обґрунтування, яке узгоджується з дослідженнями в соціальних науках щодо прийняття (наслідування, впровадження) і дифузії інновацій [169], виходячи з умовної ймовірності події прийняття у момент часу T за умови, що до цього прийняття не відбувалося.

При застосуванні теорії до оцінювання термінів первинних закупівель нового споживчого продукту висувається основне припущення: ймовірність $P(T)$ того, що первинні закупівлі здійснюватимуться у момент часу T за умови, що до цього закупівлі не здійснювалися, є лінійною функцією числа $Y(T)$ попередніх покупців, або

$$P(T) = p + \frac{q}{m} Y(T), \quad (2.28)$$

де $Y(0) = 0$, $P(0) = p$ – константа, величина якої відображає важливість новаторів у соціальній системі (коефіцієнт інновації), $\frac{q}{m}$ – коефіцієнт нахилу лінійної функції, параметр q називають коефіцієнтом імітації.

Оскільки параметри моделі залежать від вибору масштабу часу, то можна вибрати таку одиницю виміру часу, що p відобразатиме частку новаторів серед усіх наслідувачів [169]. Добуток $\frac{p}{m} Y(T)$ відображає тиск, який діє на імітаторів при збільшенні числа попередніх покупців. Для менших значень T роль новаторів є більшою, ніж імітаторів.

Згадане основне припущення теорії можна сформулювати в рамках неперервної моделі та функції щільності моменту часу первинних закупівель, називаючи вірогідністю лінійну частину рівності (2.28).

а) Нехай протягом життєвого циклу продукту буде здійснено m його первинних закупівель. Оскільки даний продукт купують рідко, то кількість його одиничних продажів дорівнюватиме числу його первинних закупівель протягом тієї частини часового інтервалу, де відсутні його продажі на заміну: після початку продажів продукту на заміну вони складатимуться як з первинних закупівель, так і закупівель на заміну. Тоді частка попередніх покупців серед первинних закупівель на момент часу T перших первинних закупівель становитиме

$$F(T) = \frac{Y(T)}{m}, \quad F(0) = \frac{Y(0)}{m} = 0, \quad (2.29)$$

визначаючи частку решти покупців (потенціальний ринковий попит) як $1 - F(T)$.

Первинні закупівлі продукту здійснюють новатори, які впливають на перший доданок рівності (2.28), та імітатори, які впливають на другий доданок рівності

(2.28) і в певному сенсі навчаються у попередніх покупців. Число $Y(T)$ попередніх покупців не впливає на новаторів під час їх первинних закупівель.

б) Враховуючи рівності (2.28) і (2.29), вірогідність закупівлі продукту в момент часу T за умови, що до цього закупівлі не здійснювалися, дорівнює

$$\frac{f(T)}{1 - F(T)} = P(T) = p + qF(T), \quad (2.30)$$

де $f(0) = P(0) = p$, $F(T) = \int_0^T f(t) dt$, $f(t)$ – функція щільності в часі (time) t .

Звідси загальна кількість покупок на інтервалі часу $(0, T)$ становить

$$m \int_0^T f(t) dt = mF(T) = Y(T) = \int_0^T S(t) dt, \quad (2.31)$$

де в силу рівності (2.30) функція щільності продажів дорівнює

$$S(t) = m f(t) = m P(T) [1 - F(T)] = P(T) [m - mF(T)],$$

а в силу рівностей (2.30), (2.31) маємо

$$P(T) = p + qF(T) = p + \frac{q}{m} \int_0^T S(t) dt, \quad mF(T) = Y(T) = \int_0^T S(t) dt:$$

$$S(T) = \left[p + \frac{q}{m} \int_0^T S(t) dt \right] \left(m - \int_0^T S(t) dt \right) = pm -$$

$$- p \int_0^T S(t) dt + q \int_0^T S(t) dt - \frac{q}{m} \left[\int_0^T S(t) dt \right]^2 = pm + (q - p)Y(T) - \frac{q}{m} [Y(T)]^2, \quad (2.32)$$

$$\frac{dF}{dt} = f(T) = \frac{S(T)}{m} = p + (q - p) \frac{Y(T)}{m} - q \left[\frac{Y(T)}{m} \right]^2 =$$

$$= p + (q - p)F(T) - q[F(T)]^2,$$

$$t + C = \int \frac{dF}{p + (q - p)F - qF^2}.$$

Позначаючи $a = -q$, $b = q - p$, $c = p$ і враховуючи

$$b^2 - 4ac = (q - p)^2 + 4pq = q^2 - 2qp + p^2 + 4pq = (p + q)^2 > 0,$$

скористаємося аналітичним виразом інтегралу від раціональної функції

$$\begin{aligned} \int \frac{dF}{c + bF + aF^2} &= \frac{1}{\sqrt{b^2 - 4ac}} \ln \left| \frac{2aF + b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2aF + b + \sqrt{b^2 - 4ac}} \right| = \\ &= \frac{1}{p + q} \ln \left| \frac{q - p - 2qF - q - p}{q - p - 2qF + q + p} \right| = \frac{1}{p + q} \ln \left| \frac{-2p - 2qF}{2q - 2qF} \right|, \end{aligned}$$

а також початковою умовою

$$0 + C = \frac{1}{p + q} \ln \left| \frac{-2p - 2q \times 0}{2q - 2q \times 0} \right| = \frac{1}{p + q} \ln \left| -\frac{p}{q} \right|.$$

Отже, беручи до уваги додатність значень p , q , F , отримуємо:

$$\begin{aligned} \frac{1}{p + q} \ln \left(\frac{p}{q} \right) + t &= \frac{1}{p + q} \ln \left| -\frac{p}{q} \right| + t = \frac{1}{p + q} \ln \left| \frac{-p - qF}{q(1 - F)} \right| = \frac{1}{p + q} \ln \left[\frac{p + qF}{q(1 - F)} \right], \\ t &= \frac{1}{p + q} \left\{ \ln \left[\frac{p + qF}{q(1 - F)} \right] - \ln \left(\frac{p}{q} \right) \right\} = \frac{1}{p + q} \ln \left[\frac{(p + qF)q}{q(1 - F)p} \right] = \frac{1}{p + q} \ln \left[\frac{p + qF}{p(1 - F)} \right], \end{aligned}$$

$$\ln \{ \exp[t(p + q)] \} = t(p + q) = \ln \left[\frac{p + qF}{p(1 - F)} \right],$$

$$p \exp[t(p + q)] - pF \exp[t(p + q)] = p(1 - F) \exp[t(p + q)] = p + qF,$$

$$p \exp[t(p + q)] - p = qF + pF \exp[t(p + q)] = F \{ q + p \exp[t(p + q)] \},$$

$$F = \frac{p \{ \exp[t(p + q)] - 1 \}}{p \exp[t(p + q)] + q} < 1,$$

$$F(T) = \frac{p \{ \exp[T(p + q)] - 1 \}}{p \exp[T(p + q)] + q}. \quad (2.33)$$

$$\begin{aligned} f &= \frac{dF}{dt} = \frac{p(p + q) \exp[t(p + q)] \{ p \exp[t(p + q)] + q - p \exp[t(p + q)] + p \}}{\{ p \exp[t(p + q)] + q \}^2} = \\ &= \frac{p(p + q)^2 \exp[t(p + q)]}{\{ p \exp[t(p + q)] + q \}^2}, \end{aligned} \quad (2.34)$$

$$\begin{aligned}
S(t) &= m f = \frac{m p (p + q)^2 \exp[t(p + q)]}{\{p \exp[t(p + q)] + q\}^2}, \\
\frac{dS}{dt} &= m p (p + q)^2 \frac{(p + q) \exp[t(p + q)] \{p \exp[t(p + q)] + q\}^2}{\{p \exp[t(p + q)] + q\}^4} - \\
&\quad - m p (p + q)^2 \frac{2 \{p \exp[t(p + q)] + q\} p (p + q) \exp[t(p + q)]}{\{p \exp[t(p + q)] + q\}^4} = \\
&= m p (p + q)^3 \exp[t(p + q)] \frac{\{p \exp[t(p + q)] + q\} \{q - p \exp[t(p + q)]\}}{\{p \exp[t(p + q)] + q\}^4}.
\end{aligned}$$

Таким чином, при $q \geq p$ і достатньо малих значеннях t функція $S(t)$ зростає, досягаючи максимуму при

$$\begin{aligned}
0 &= q - p \exp[t(p + q)], & \exp[t(p + q)] &= \frac{q}{p}, \quad t(p + q) = \ln\left(\frac{q}{p}\right), \\
T^* = t &= \frac{\ln q - \ln p}{p + q} \geq 0 \quad \text{для } q \geq p, & & (2.35)
\end{aligned}$$

вимагаючи достатньо високого значення коефіцієнта імітації. Тоді

$$\begin{aligned}
\exp[t(p + q)] &= \exp\left[\ln\left(\frac{q}{p}\right)\right] = p^{-1} q, \\
S(T^*) &= \frac{m p (p + q)^2 p^{-1} q}{\{p p^{-1} q + q\}^2} = \frac{m (p + q)^2 q}{4 q^2} = \frac{m (p + q)^2}{4 q}. & (2.36)
\end{aligned}$$

Враховуючи рівність (2.32), маємо

$$\begin{aligned}
\frac{m (p + q)^2}{4 q} &= S(T^*) = p m + (q - p) Y(T^*) - \frac{q}{m} [Y(T^*)]^2, \\
m^2 (p + q)^2 &= 4 m^2 p q + 4 m q (q - p) Y(T^*) - 4 q^2 [Y(T^*)]^2, \\
Y(T^*) &= \frac{4 m q (q - p) \pm \sqrt{D}}{8 q^2} = \frac{m (q - p)}{2 q} \geq 0, & (2.37)
\end{aligned}$$

де дискримінант дорівнює

$$D = 16 m^2 q^2 (q - p)^2 - 16 q^2 [m^2 (p + q)^2 - 4 m^2 p q] =$$

$$\begin{aligned}
&= 16m^2q^2[(q-p)^2 - (p+q)^2 + 4pq] = \\
&= 16m^2q^2(q^2 - 2qp + p^2 - p^2 - 2pq - q^2 + 4pq) = 0.
\end{aligned}$$

Якщо ж $q < p$, то функція $S(t)$ досягає свого максимуму при $t = 0$:

$$S(0) = mf(0) = \frac{mp(p+q)^2 \exp[0 \times (p+q)]}{\{p \exp[0 \times (p+q)] + q\}^2} = \frac{mp(p+q)^2}{(p+q)^2} = mp, \quad (2.38)$$

$$S(0) - S(T^*) = mp - \frac{m(p+q)^2}{4q} = m \frac{4pq - p^2 - 2pq - q^2}{4q} = -\frac{m}{4q}(p-q)^2 \leq 0.$$

Оскільки для успішних продуктів, як правило, відношення $\frac{p}{q}$ є близьким до

0, то обсяг S продажів досягатиме свого максимуму, коли сукупний обсяг продажів наблизатиметься до $\frac{m}{2}$ (перевищуючи критичну масу [58, 170–172]):

$$Y(T^*) = \frac{m(q-p)}{2q} = m \left(\frac{1}{2} - \frac{p}{2q} \right).$$

2.4.3 Очікувана тривалість входу нового продукту в ринок

Якщо довільно вибрати покупця серед m покупців, який здійснюватиме первинну закупівлю продукту в деякий момент часу свого життя, то очікувана тривалість T часу до такої закупівлі, враховуючи рівність (2.34), становитиме

$$\begin{aligned}
E(T) &= \int_0^{\infty} t f(t) dt = \int_0^{\infty} \frac{t p (p+q)^2 \exp[t(p+q)]}{\{p \exp[t(p+q)] + q\}^2} dt = \\
&= \int_1^{\infty} \frac{\ln z}{p+q} \times \frac{p(p+q)^2 z}{(pz+q)^2} \times \frac{dz}{(p+q)z} = p \int_1^{\infty} \frac{\ln z}{(pz+q)^2} dz = \frac{1}{p} \int_1^{\infty} \frac{\ln z}{(z+p^{-1}q)^2} dz.
\end{aligned}$$

де $z = \exp[t(p+q)]$, $dz = (p+q)z dt$, $\ln z = t(p+q)$. Застосовуючи вираз

$$\int \frac{\ln x}{(x+a)^2} dx = -\frac{\ln x}{x+a} + \frac{1}{a} \ln \frac{x}{x+a}$$

для $a = p^{-1}q$, отримуємо

$$E(T) = \frac{1}{p} \left\{ \ln \frac{1}{1 + p^{-1}q} - \frac{p}{q} \ln \frac{1}{1 + p^{-1}q} \right\} = \frac{1}{q} \ln(1 + p^{-1}q) = \frac{1}{q} \ln \left(\frac{p+q}{p} \right). \quad (2.39)$$

Продукт приймають новатори та імітатори: новатори матимуть більше значення на початку процесу прийняття продукту, але пізніше їх значення зменшуватиметься і збільшуватиметься значення імітаторів. Якщо інновацією є споживчий товар тривалого користування (скажімо, телевізор, газонокосарка, кімнатний кондиціонер, стільниковий мобільний телефон), то продажі $S(t)$ протягом періоду, в якому попит складається з первинних покупок, будуть пропорційними функції $f(t)$ щільності прийняття інновації. Якщо ж продажі включають повторні чи багаторазові покупки інноваційного продукту, то рівні прийняття продукту і продажів продукту вимірюються окремо.

Теоретично розподілом може бути експоненціальний чи логістичний розподіл, а також розподіл Вейбулла (Вейбулл (1887–1979) служив у Шведській береговій охороні з 1904 р., отримав науковий ступінь доктора філософії Університету Уппсала у 1932 р.). Оскільки експоненціальний розподіл передбачає процес без пам'яті (memoryless), то не відображає суті поширення інновації. Логістичний розподіл і розподіл Вейбулла дають результати, близькі до моделі Басса, на даних багатьох спостережень, але не на даних кількох спостережень: отриманий розподіл (2.33) дає кращі прогнози на будь-якій кількості спостережень. Логістична постановка Басса дещо модифікувалася й узагальнювалася, включаючи дифузійні моделі. З огляду на характер даних, доступних для завдань (наближеного) прогнозування продажів більшості нових продуктів, і (малої) кількості відповідної інформації, існують суттєві труднощі з надійною екстраполяцією початкового шляху збуту нового продукту: якщо потрібно побудувати вдосконалені моделі прогнозування збуту, то слід виходити з

обмеженості даних. Логістична постановка Басса [147, 151, 152] охоплює суть процесу інновації, включаючи ефекти дифузії та заміщення.

2.4.4 Оцінювання параметрів моделі

Переходячи від базової неперервної моделі (2.32) до дискретного аналога

$$S_T = a + bY_{T-1} + c(Y_{T-1})^2, \quad (2.40)$$

де S_T – продажі в момент часу T , $Y_{T-1} = \sum_{i=0}^{T-1} S_i$ – кумулятивні продажі до моменту часу $(T-1)$ включно, a – параметр для оцінювання pm , b – параметр для оцінювання $(q-p)$, c – параметр для оцінювання $(-m^{-1}q)$. Звідси

$$b = q - p = -mc - m^{-1}a, \quad cm^2 + bm + a = 0,$$

$$m = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2c}, \quad (2.41)$$

$$q = -mc = \frac{m(b \mp \sqrt{b^2 - 4ac})}{2}, \quad p = m^{-1}a = \frac{2ac}{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}. \quad (2.42)$$

З рівняння (2.40) випливає

$$0 = \frac{dS_T}{dY_{T-1}} = b - 2cY_{T-1},$$

звідки в силу рівності (2.37) маємо

$$Y_{T-1}^* = -\frac{b}{2c} = \frac{m(q-p)}{2q} = Y(T^*),$$

$$S_T(Y_{T-1}^*) = a + bY_{T-1}^* + c(Y_{T-1}^*)^2 = a - \frac{b^2}{2c} + \frac{b^2c}{4c^2} = a - \frac{b^2}{2c} + \frac{b^2}{4c} = a - \frac{b^2}{4c} =$$

$$= a - c \left(\frac{b}{2c} \right)^2 = pm + \frac{q}{m} \times \frac{m^2(q-p)^2}{4q^2} = \frac{4pmq + m(q-p)^2}{4q} =$$

$$= \frac{m(4pq + q^2 - 2qp + p^2)}{4q} = \frac{m(p+q)^2}{4q} = S(T^*),$$

беручи до уваги рівність (2.36). Отже, рівняння $S_T(Y_{T-1}^*) = S(T^*)$ свідчить, що максимальне значення продажів S як функції часу збігається з максимальним значенням продажів S як функції кумулятивних продажів.

Для перевірки моделі Басса було проведено регресійний аналіз оцінок параметрів, використовуючи річні дані часових рядів для 11 різних споживчих товарів тривалого користування у різні періоди часу (електричні холодильники у 1920–1940 рр. (період прогнозування 1926–1940 рр.); домашні морозильні камери (період прогнозування 1947–1961 рр.), чорно-білі телевізори (період прогнозування 1949–1961 рр.), кімнатні кондиціонери (період прогнозування 1950–1961 рр.) у 1946–1961 рр.; сушарки для білизни (період прогнозування 1950–1961 рр.), газонокосарки (період прогнозування 1949–1961 рр.), автоматичні кавоварки (період прогнозування 1951–1961 рр.) у 1948–1961 рр.; парові праски (період прогнозування 1950–1961 рр.) у 1949–1960 рр.; пом'якшувачі води (період прогнозування 1950–1961 рр.), електричні покривала для ліжок (період прогнозування 1950–1961 рр.) у 1949–1961 рр.; програвачі (період прогнозування 1953–1958 рр.) у 1952–1961 рр.). Періоди часу визначалися на основі суб'єктивної оцінки довговічності продукту, а також на основі обмежених опублікованих даних щодо норм списання та циклів повторних покупок. Обиралися такі періоди часу, де повторні покупки не були важливими. Основне джерело даних – Statistical Abstract of the United States, публікація Бюро перепису населення США (United States Census Bureau), установи Міністерства торгівлі США (United States Department of Commerce). Ця публікація виходила щороку у 1878–2011 рр., описуючи соціальні, політичні, економічні умови США.

Крім оцінок a , b , c у регресійній залежності (2.38) для кожного товару, були обчислені їх дисперсії σ_a , σ_b , σ_c відповідно, відношення $(\sigma_a)^{-1}a$, $(\sigma_b)^{-1}b$,

$(\sigma_c)^{-1}c$, а також коефіцієнт R^2 детермінації. Тоді, користуючись співвідношеннями (2.40), можна обчислити оцінки m , p , q . Для кожного товару регресійна оцінка c має від'ємне значення, як цього потребує зміст моделі. Для кожного товару оцінки m виглядають правдоподібними. Одним з найважливіших результатів регресійного аналізу є неявна оцінка загального числа первинних закупівель, які будуть здійснені протягом життєвого циклу продукту: для кожного товару рівняння регресії задовільно описує загальний тренд часового шляху зростання продажів, а відхилення від тренду можна пояснювати короткостроковими мінливостями доходу (які, в свою чергу, корелюються з економічним зростанням чи спадом). Для кожного товару рівняння регресії задовільно передбачає піковий обсяг продажів і момент часу його досягнення.

Відповідність рівняння регресії стосовно фактичних продажів є відносно слабким тестом спроможності моделі, оскільки полягає у порівнянні *ex post* оцінок цього рівняння з даними. Сильнішим тестом є спроможність базової моделі за змінною часу та за визначеними регресійними оцінками значеннями параметрів: для кожного товару, знаючи оцінки m , p , q , можна передбачити момент часу піку продажів на основі рівності (2.35) і порівняти його з фактичним (період часу визначається так, щоб продажі вперше перевищили значення mp , рівне $S(0)$ в силу співвідношення (2.38)); можна також передбачити обсяг піку продажів на основі рівності (2.36) і порівняти його з фактичним. Для електричних холодильників передбачений момент часу піку продажів був найдовшим (близько 20 років), а фактичний момент часу піку продажів не визначався через період Другої світової війни. Найкоротшим передбачений момент часу піку продажів був для програвачів (5 років), парових прасок (7 років), чорно-білих телевізорів і сушарок для одягу (8 років).

Знаючи оцінки параметрів m , p , q , можна передбачати продажі

$$S(t) = \frac{m p (p + q)^2 \exp[t(p + q)]}{\{p \exp[t(p + q)] + q\}^2}$$

протягом довгострокового інтервалу часу й оцінювати точність прогнозів для кожного товару, виходячи з відповідної величини коефіцієнту детермінації. Найменшою ця величина виявилася для чорно-білих телевізорів внаслідок значних (але швидкоплинних) відхилень від тренду для 1950 р. і 1958 р., але вона не вплинула на коректність тренду загалом: для вищезазначених товарів модель Басса була перевірена і верифікована. Ця модель відіграла і продовжує відігравати важливу роль у розробці та впровадженні нових високотехнологічних продуктів.

Під час пандемії новими продуктами є вакцини. Для оцінювання параметрів моделі (2.40) скористаємося даними [173] про дози вакцини від COVID-19, введені на 100 осіб (загальна кількість введених доз, поділена на загальну чисельність населення країни). Для вакцин, які потребують декількох доз, підраховується кожна окрема доза; оскільки одна і та ж особа може отримати більше однієї дози, кількість доз на 100 осіб може перевищувати 100 [173]. У табл. 2.1 курсивом виділено значення, які не спостерігаються, але генеруються, зокрема, методами емпіричних середніх [154]: дана робота виконана за часткової підтримки проекту «Аналітичні методи та машинне навчання в теорії керування і прийнятті рішень за умов конфлікту на невизначеності» Національного фонду досліджень України (грант № 2020.02/0121). Аналізувалися дані України та Білорусі, враховуючи успішний досвід міжнародного проекту «Розробка методів, алгоритмів і інтелектуальної аналітичної системи для обробки і аналізу різномірних клінічних та біомедичних даних з метою вдосконалення діагностики складних захворювань» (М/99-2019, М/37-2020 за підтримки Міністерства освіти та науки України), що виконувався Інститутом кібернетики імені В. М. Глушкова НАН України спільно з Об'єднаним інститутом проблем інформатики НАН Білорусі (Ф19УКРГ-005 за підтримки Білоруського республіканського фонду фундаментальних досліджень) [174–177].

Обчислені за допомогою програмного забезпечення MS Excel оцінки параметрів залежності (2.40) на даних табл. 2.1 є задовільними для подальших практичних спостережень у другому півріччі 2021 р. (табл. 2.2).

Таблиця 2.1. Дози вакцини від COVID-19, введені на 100 осіб, за тижнями першого півріччя 2021 р.

Дата	Україна	Білорусь
23.02	-	0.22
2.03	0.02	0.22
9.03	0.05	0.22
16.03	0.18	0.28
23.03	0.36	0.39
30.03	0.53	0.58
6.04	0.73	0.85
13.04	0.92	1.43
20.04	1.09	2.24
27.04	1.28	2.75
4.05	1.74	3.04
11.05	2.02	3.59
18.05	2.19	4.33
25.05	2.26	4.88
1.06	2.40	5.61
8.06	3.04	6.74
15.06	3.58	7.65
22.06	4.01	8.85
29.06	4.42	9.40

Таблиця 2.2. Оцінки параметрів a , b , c регресії (2.39), значення параметрів m , p , q з рівностей (2.41), (2.42), значення $S(T^*)$, $Y(T^*)$, T^* , $E(T)$ з рівнянь (2.36), (2.37), (2.32), (2.39) відповідно.

Країна / Параметр	R^2	a	b	$10^6 c$	m	q	$10^6 p$	$S(T^*)$	$Y(T^*)$	T^*	$E(T)$
Білорусь	0.90	7.47	0.20	-115.07	1739	0.20	4298	91	851	19	19
Стандартна похибка		6.95	0.04	49.60							
Україна	0.73	7.85	0.11	-33.16	3291	0.11	2384	94	1610	34	35
Стандартна похибка		6.50	0.08	180.42							

За належної організації науково-практичних досліджень, класичну модель Басса можна застосовувати для моделювання стохастичних процесів, пов'язаних з

пандемією, в інших державах, а також в областях і районах України. Таке застосування потребуватиме ретельної перевірки вхідної інформації, верифікації та генерації вхідних даних, можливих модифікацій класичної моделі, розвитку й обґрунтування відповідних методів оцінювання, відповідної комп'ютерної реалізації алгоритмічного і програмного забезпечення, статистичного аналізу результатів оцінювання. При цьому сучасні розподілені інформаційні технології науково-організаційної діяльності НАН України можна застосовувати для розробки системних засобів і заходів охорони здоров'я [178].

РОЗДІЛ 3. МАТЕМАТИЧНІ МЕТОДИ ДЛЯ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ НА РИНКУ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ПОСЛУГ ТА В СФЕРІ ДЕРЖАВНИХ МАКРОФУНКЦІЙ

3.1 Стратегічна взаємодія провайдерів диференційованих Інтернет-послуг

В екосистемі Інтернету важливими є зв'язки між постачальниками Інтернет-послуг (Internet service providers, ISPs) як операторами телекомунікаційної мережі та провайдерами послуг контенту, особливо провайдерами відеоконтенту, що передбачає високу пропускну здатність. Оскільки підвищення пропускну здатності потребує нових інвестицій у спроможність мережі, то мотивація до таких інвестицій має бути як у провайдерів відеоконтенту, так і у ISPs.

Мотивацію до інвестицій має визначати бізнес-модель, яка враховує ISPs у розподілі результуючих вигравів (основних грошових потоків). Розроблені засоби моделювання відповідних бізнес-моделей, де провайдер контенту (content provider, CP) має значну ринкову владу, показують, що для CP може бути прибутковим пропонувати платний перегляд контенту, таким чином передаючи до ISPs частину доходів від надання контенту і стимулюючи ISPs до розширення спроможностей [179–181]. Така ситуація можлива у випадку ефективних ISPs (з точки зору витрат на обслуговування і розширення) за низької невизначеності попиту та високої еластичності інноваційних послуг. Розроблена бізнес-модель може забезпечувати суттєві переваги всім основним учасникам екосистеми Інтернету – постачальникам мережі, провайдерам контенту і послуг, кінцевим користувачам. Крім того, постачальники і провайдери можуть надавати диференційовані послуги – від виключно послуг мережі до виключно послуг контенту.

3.1.1 Аналітична модель взаємодії провайдерів контенту та Інтернет-послуг

Для взаємодії CP та ISPs скористаємося моделлю Штакельберга [182], де лідер повідомляє своє рішення послідовнику, який оптимізує свою цільову функцію на основі отриманої інформації. Лідер приймає свої рішення, враховуючи таку поведінку послідовника. Для простоти почнемо з випадку єдиної послуги, а потім перейдемо до випадку кількох взаємозалежних послуг.

Нехай CP максимізує свій прибуток – дохід від надання контенту мінус частка платного перегляду з витратами, тобто

$$P_{CP} = [p(1-x) - c]E_{\omega} \min\{W_0 + W; D(p, \omega)\} - eE_{\omega} \max\{0; D(p, \omega) - W_0 - W\}, \quad (3.1)$$

де p – ціна послуги, c – витрати на надання послуг, x – частка доходу CP, перерахована до ISP, W_0 – існуюча спроможність мережі, W – можливе розширення спроможності, $D(p, \omega)$ – (випадковий) попит на послугу за ціною p для випадкової величини ω , e – альтернативна вартість незадоволеного попиту, E_{ω} – оператор математичного сподівання. Тут рішеннями CP є p та x , рішенням ISP є W , наслідком рішень користувачів послуги є $D(p, \omega)$; c , e , W_0 є параметрами. Витрати CP складається з двох частин – частини втраченого доходу (залежної від x) від надання контенту і частини втраченої клієнтської вартості (залежної від e) внаслідок клієнтського відтоку (churn) до іншого провайдера чи альтернативного задоволення попиту.

Припустимо, ISP максимізує свій прибуток – дохід від фіксованої абонплати від клієнтів плюс частка доходу CP, перерахована до ISP через платний перегляд, мінус витрати на обслуговування і розширення мережі, тобто

$$P_{ISP} = C + px E_{\omega} \min\{W_0 + W; D(p, \omega)\} - rW - q(W_0 + W), \quad (3.2)$$

де C – абонентська плата (вважаємо, що вся популяція користувачів підписана до Інтернету за фіксовану плату), r – витрати на одиницю розширення спроможності мережі, q – витрати на одиницю обслуговування спроможності мережі.

За емпіричними даними, гіперболічна функція попиту на інформаційно-комунікаційні продукти та послуги має постійну еластичність γ відносно ціни [183]: $D = \frac{M}{p^\gamma}$, де M – параметр популяції користувачів (доступного бюджету).

Модифікуємо цю функцію таким чином:

$$D(p, \omega) = \frac{M(1 + \omega)}{(a + p)^\gamma}, \quad (3.3)$$

де a – альтернативна ціна, яка відіграє роль параметра стабілізації, що сповільнює зростання функції попиту для малих значень ціни p . Хоча всі параметри γ , M , a є невизначеними, враховуватимемо її тільки множником $(1 + \omega)$, де ω – випадкова змінна з функцією H кумулятивного розподілу та щільністю h . Оскільки $D(p, \omega) \geq 0$, то $\omega \geq -1$.

Припустимо, що CP є лідером з ринковою владою у даній системі. Тоді рішення в системі приймаються у такій послідовності:

1) CP обирає ціну p послуги та частку x свого доходу від надання контенту, яка перераховуватиметься до ISP у рамках угоди про перегляд контенту;

2) користувачі, знаючи ціну p , формують попит на послугу за співвідношенням (3.3);

3) ISP, знаючи свою частку x і попит $D(p, \omega)$ на послугу для випадкової змінної ω з відомим розподілом H , приймає рішення про обсяг W розширення спроможності мережі, максимізуючи свій сподіваний прибуток (3.2);

4) CP, знаючи поведінку користувачів та ISP, обирає такі значення p та x , які максимізують сподіваний прибуток (3.1).

Використовуючи співвідношення (3.3) у цільовій функції (3.2), маємо

$$\begin{aligned} P_{ISP} &= C + px E_\omega \min\{W_0 + W; D(p, \omega)\} - rW - q(W_0 + W) = \\ &= C + px E_\omega \min\{W_0 + W; M(1 + \omega)(a + p)^{-\gamma}\} - (r + q)W - qW_0. \end{aligned}$$

Зазначимо, що обсяг продажів послуги становить

$$\begin{aligned}
S &= E_{\omega} \min \{W_0 + W; M(1 + \omega)(a + p)^{-\gamma}\} = \\
&= E_{\omega} \{W_0 + W - [W_0 + W - M(1 + \omega)(a + p)^{-\gamma}]^+\} = \\
&= E_{\omega} \{W_0 + W\} - E_{\omega} \{[W_0 + W - M(1 + \omega)(a + p)^{-\gamma}]^+\},
\end{aligned}$$

де $u^+ \equiv \max\{0; u\}$. Для неперервної випадкової змінної y , яка має щільність h та кумулятивну функцію H розподілу, введемо функцію втрат

$$n(z) = E[(y - z)^+] = \int_z^{\infty} (y - z)h(y)dy = \int_z^{\infty} \bar{H}(y)dy,$$

де $\bar{H}(z) = 1 - H(z)$ – доповнююча кумулятивна функція розподілу; введемо доповнюючу функцію втрат

$$\bar{n}(z) = E[(y - z)^-] = \int_{-\infty}^z (z - y)h(y)dy = \int_{-\infty}^z H(y)dy,$$

де $u^- \equiv |\min\{0; u\}|$. Звідси

$$\begin{aligned}
\bar{n}(z) - n(z) &= \int_{-\infty}^z (z - y)h(y)dy - \int_z^{\infty} (y - z)h(y)dy = \int_{-\infty}^z zh(y)dy - \int_{-\infty}^z yh(y)dy - \\
&\quad - \int_z^{\infty} yh(y)dy + \int_z^{\infty} zh(y)dy = \int_{-\infty}^{\infty} zh(y)dy - \int_{-\infty}^{\infty} yf(y)dy = z - E[y], \\
S(z) &= E[z] - n(z) = z - \bar{n}(z).
\end{aligned}$$

Застосовуючи формулу Лейбніца, дістаємо похідну

$$n'(z) = \frac{\partial}{\partial z} \int_z^{\infty} \bar{H}(y)dy = -\bar{H}(z) = H(z) - 1,$$

звідки

$$\bar{n}'(z) = n'(z) + 1 - 0 = H(z),$$

$$S'(z) = 1 - n'(z) = 1 - H(z) = \bar{H}(z).$$

Враховуємо, що

$$S = E_{\omega} \{W_0 + W\} = E_{\omega} \{M(1 + \omega)(a + p)^{-\gamma}\}$$

при

$$W_0 + W = M(1 + \omega)(a + p)^{-\gamma},$$

$$z = \omega = \frac{(a + p)^\gamma}{M}(W_0 + W) - 1 = \frac{(a + p)^\gamma}{M} \left(W_0 + W - \frac{M}{(a + p)^\gamma} \right).$$

Звідси

$$S' = \bar{H} \left[\frac{(a + p)^\gamma}{M} \left(W_0 + W^* - \frac{M}{(a + p)^\gamma} \right) \right].$$

Таким чином, функція $P_{ISP}(W)$ максимізується по $W \geq 0$ за умови

$$0 = \frac{\partial P_{ISP}}{\partial W} = pxS' - r - q = px\bar{H} \left[\frac{(a + p)^\gamma}{M} \left(W_0 + W^* - \frac{M}{(a + p)^\gamma} \right) \right] - r - q,$$

$$\frac{r + q}{px} = \bar{H} \left[\frac{(a + p)^\gamma}{M} \left(W_0 + W^* - \frac{M}{(a + p)^\gamma} \right) \right] = 1 - H \left[\frac{(a + p)^\gamma}{M} \left(W_0 + W^* - \frac{M}{(a + p)^\gamma} \right) \right]$$

$$H \left[\frac{(a + p)^\gamma}{M} \left(W_0 + W^* - \frac{M}{(a + p)^\gamma} \right) \right] = 1 - \frac{r + q}{px},$$

$$\frac{(a + p)^\gamma}{M} (W_0 + W^*) - 1 = H^{-1} \left(1 - \frac{r + q}{px} \right),$$

де H^{-1} – обернена до H функція. Звідси аналітично дістаємо оптимальне рішення ISP в явному вигляді:

$$\frac{(a + p)^\gamma}{M} (W_0 + W^*) = 1 + H^{-1} \left(1 - \frac{r + q}{px} \right),$$

$$\frac{(a + p)^\gamma}{M} W^* = \left[1 + H^{-1} \left(1 - \frac{r + q}{px} \right) \right] - \frac{(a + p)^\gamma}{M} W_0,$$

$$W^*(p, x) = \max \left\{ 0; \frac{M}{(a + p)^\gamma} \left[1 + H^{-1} \left(1 - \frac{r + q}{px} \right) \right] - W_0 \right\}. \quad (3.4)$$

Використовуючи співвідношення (3.3) і (3.4) в цільовій функції (3.1), CP максимізує по $p \geq 0$, $x \in [0, 1]$ свій прибуток

$$P_{CP} = [p(1-x) - c]E_{\omega} \min\{W_0 + W^*(p, x); M(1+\omega)(a+p)^{-\gamma}\} - \\ - eE_{\omega} \max\{0; M(1+\omega)(a+p)^{-\gamma} - W_0 - W^*(p, x)\}, \quad (3.5)$$

знаходячи оптимальні значення $p^* = p^*(M, a, r, q, \gamma, c, e, W_0)$ та $x^* = x^*(M, a, r, q, \gamma, c, e, W_0)$ за допомогою чисельних методів [164]. Отже, система, що функціонує на основі впорядкованих правил (кроків) 1) – 4), автоматично визначатиме стратегічні значення p^* , x^* , $W^*(p^*, x^*)$.

3.1.2 Чисельне моделювання взаємодії провайдерів диференційованих Інтернет-послуг

Чисельне моделювання функціонування цієї системи при різних значеннях параметрів $(M, a, r, q, \gamma, c, e, W_0)$ дає попередні результати чисельних експериментів для важливих сценаріїв.

Сценарій платного перегляду контенту може бути вигідним для CP за умови, що ISP є достатньо ефективним з точки зору витрат забезпечення мережі.

Значення $P_{CP}(p)$ з необмеженою спроможністю W_0 перевищує значення $P_{CP}(p, x)$ з платним переглядом, яке перевищує значення $P_{CP}(p, W_0)$ з обмеженою спроможністю W_0 і вільним переглядом [179–181]. Значення функцій $P_{CP}(p)$, $P_{CP}(p, x)$, $P_{CP}(p, W_0)$ збігаються при досить високих цінах p , бо для задоволення попиту достатньо фактичної спроможності.

Максимум функції $P_{CP}(p)$ досягається при ціні p_p , а максимум функції $P_{CP}(p, W_0)$ – при ціні $p_f > p_p$. Максимум $P_{CP}(p, x)$ при нижчій ціні $p = p_L \in (p_p, p_f)$ має місце, коли для CP вигідно надавати платний перегляд контенту, стимулюючи попит низькою ціною, а також стимулюючи ISP до розширення спроможності, щоб задовольняти цей попит. Максимум $P_{CP}(p, x)$ при вищій ціні $p = p_H > p_L$ має місце, коли для CP не вигідно надавати платний

перегляд контенту і CP надає лише вільний перегляд контенту; тому при досить великих цінах p залежність $P_{CP}(p, x)$ збігається із залежністю $P_{CP}(p, W_0)$.

Якщо $P_{CP}(p_L, x) > P_{CP}(p_H, x)$, то для CP вигідно допускати платний перегляд. Водночас значення $P_{ISP}(p, x)$ спадає при збільшенні ціни p , зменшенні попиту відповідно до співвідношення (3.3), зменшенні необхідної спроможності для задоволення цього попиту, зменшенні стимулювання з боку CP до розширення спроможності ISP. При досить високій пороговій ціні $p_T \in (p_L, p_H)$ для CP стає не вигідно надавати платний перегляд, а значення $P_{ISP}(p, x)$ різко спадає до нуля.

Проте перевага платного перегляду існує лише тоді, коли ISP є досить ефективним з точки зору витрат розширення та обслуговування мережі: при зниженні ефективності ISP ціна p_L наближається до ціни p_H .

Можна показати, що більша невизначеність (дисперсія) σ попиту веде до більшої несхильності CP до ризику, зокрема ризику зниження ціни та пов'язаного ризику надання платного перегляду. При більшій σ CP намагається хеджувати більший ризик шляхом підвищення ціни p послуги. Тоді в силу співвідношення (3.3) зменшуються попит і його мінливість. При малих і середніх рівнях σ для CP вигідно використовувати платний перегляд, щоб стимулювати ISP до розширення спроможності мережі; при цьому значення $P_{ISP}(p, x)$ є додатним і майже незмінним. При великих рівнях σ (при рівнях σ понад певний поріг) CP підвищує ціну p послуги, щоб обмежувати попит на існуючу спроможність мережі, таким чином позбавляючи ISP прибутку.

Прибуток $P_{CP}(p)$ спадає при збільшенні σ . По-перше, підвищення ціни p для зниження ризику веде до зниження попиту та відповідного скорочення прибутку. По-друге, заданий попит з більшою мінливістю σ зменшуватиме прибуток CP, бо обслуговування однакової частки попиту потребуватиме від CP більшої спроможності; відповідно до співвідношення (3.1), обслуговування меншої частки попиту знижуватиме дохід від фактичного обсягу обслуговування і

водночас штрафуватиметься з множником e . При цьому потреба у більшій спроможності ($W_0 + W$), відповідно до співвідношення (3.2), збільшуватиме прибуток ISP, а також віддача від інвестицій, вимірювана відношенням цього прибутку до витрат на розширення спроможності. Однак прибуток ISP збільшується лише при платному перегляді, а при переході на вільний перегляд відбувається різкий спад прибутку ISP і зменшення прибутку CP, уповільнене переходом у режим $x = 0$.

Покажемо, що перегляд контенту є вигідним у випадку інноваційної послуги з високою еластичністю γ попиту. У галузі інформаційно-комунікаційних технологій ця еластичність може стосуватися взаємозв'язку між базовими, усталеними, традиційними послугами та інноваційними новими послугами. Ця еластичність є низькою для традиційних послуг, які задовольняють базові необхідні потреби комунікації: за багатьма літературними даними, для базової фіксованої мережевої телефонії еластичність дещо перевищує 1. Для нових інноваційних послуг, які служать індивідуальним потребам (наприклад, послуг відео на вимогу), еластичність може перевищувати 2.

Якщо CP надає базові послуги з еластичністю γ від низької до середньої, то встановлює порівняно високу ціну послуг. При такій еластичності немає потреби у платному перегляді, бо існуючої спроможності достатньо для надання цих послуг. Якщо еластичність послуги зростає, то її споживання стає більш дискреційним, а оптимальна ціна CP поступово спадає. Коли еластичність досягає певного порогу, то для CP стає вигіднішим надавати платний перегляд, щоб стимулювати ISP встановлювати більшу спроможність і діставати здатність істотно знижувати ціну для стимулювання попиту. Ціна $p(\gamma)$ після істотного зниження повільно зменшуватиметься при зростанні γ .

Прибуток $P_{ISP}(p, \gamma)$ істотно підвищується при досягненні згаданого порогу і повільно збільшуватиметься при подальшому зростанні γ .

Прибуток $P_{CP}(p, \gamma)$ зменшується для еластичності на проміжку від 1 до згаданого порогу (від низької до середньої еластичності), бо зниження цін не компенсується достатнім збільшенням обсягу послуг, який залишається обмеженим встановленою потужністю W_0 внаслідок відсутності стимулів для розширення спроможності ISP при вільному перегляді. Коли CP переходить до платного перегляду, то прибуток $P_{CP}(p, \gamma)$ починає збільшуватися при зростанні еластичності γ , бо тоді стає доступною більша спроможність. При цьому прибуток $P_{ISP}(p, \gamma)$ також збільшується при зростанні γ , але повільніше, ніж прибуток $P_{CP}(p, \gamma)$; віддача від інвестицій ISP істотно зростає при досягненні згаданої порогової еластичності, але спадає при подальшому зростанні еластичності γ внаслідок потреби розширення встановленої спроможності.

Ефективність ISP вимірюється не лише віддачею на інвестиції, але і сумою $(r + q)$ витрат на розширення та обслуговування мережі. У випадку ефективного ISP, з витратами $(r + q)$ у діапазоні від малих до середніх значень, для CP вигідно переходити до платного перегляду. Коли витрати ISP на розширення мережі зростають, спадає відношення введеної ISP додаткової спроможності до доходу від надання контенту. Тоді CP може: збільшувати ціну p послуги, щоб зменшувати попит до меншої доступної спроможності; збільшувати частку x доходу CP, перераховану до ISP, щоб стимулювати ISP до розширення спроможності. Ці дії CP істотно знижуватимуть його прибуток.

Перейдемо до аналізу бізнес-моделі, де наданням контенту займається не лише CP, але й ISP, виходячи з кейсу Deutsche Telekom. Можна показати, що платний перегляд може бути вигідним як для CP, так і для ISP. Цей кейс стає викликом для нейтральності мережі.

Припустимо, ISP пропонує кілька послуг забезпечення Інтернетом, які відрізняються швидкостями з'єднання, тобто якістю досвіду (Quality of Experience, QoE) – мірою загального задоволення клієнтів телекомунікаційною послугою, які,

насамперед, споживають відеопослуги з високими вимогами до пропускну здатності, маючи вказаний ліміт завантаження. Клієнти можуть мати також необмежений ліміт завантаження, але за вищою ціною. Крім того, ISP надає свою власну контент-послугу, конкуруючи з існуючим провайдером CP відеоконтенту, з необмежним лімітом завантаження. Тоді ISP порушуватиме принципи нейтральності мережі, бо по-різному обробляє потоки даних, генеровані подібними послугами різного походження. Подібна ситуація виникла, коли компанія Deutsche Telekom прийняла рішення про обробку своєї власної відеопослуги, конкуруючи, наприклад, з послугою YouTube від Google.

3.1.3 Моделювання кількох диференційованих Інтернет-послуг

Перейдемо до трьох диференційованих послуг. Припустимо, на ринку пропонуються 3 послуги s_i , $i = 1, 2, 3$, причому кожна послуга має два компоненти – контент і підключення. Ці компоненти разом створюють QoE для кінцевого користувача. Якщо контент може надаватися як ISP, так і CP, то підключення – лише ISP.

Нехай послуга s_1 має контент, наданий від CP і доступний до абонентів базового пакету Інтернет-підключення за фіксованою ціною C_1 з високою швидкістю V_1 до досягнення ліміту \bar{d} завантаження та низькою швидкістю V_2 після досягнення цього ліміту.

Нехай послуга s_2 має контент послуги s_1 , наданий від CP і доступний до абонентів розширеного пакету Інтернет-підключення за фіксованою ціною $C_2 > C_1$ з високою швидкістю V_1 незалежно від обсягу завантаження.

Нехай послуга s_3 має контент, наданий від ISP і доступний до абонентів базового пакету Інтернет-підключення за фіксованою ціною C_1 з високою швидкістю V_1 незалежно від обсягу завантаження.

Дослідимо попит абонента (клієнта) на ці послуги, наприклад, попит на окремі послуги s_2 та s_3 . Якщо p – ціна за одиницю контенту, вимірюваного пропускною здатністю, то нехай, подібно до згаданої гіперболічної функції (3.3) попиту, попит абонента на ці послуги дорівнює

$$d_i = \frac{M}{(a+p)^{\gamma_i}}, \quad i = 2, 3, \quad (3.6)$$

де a – альтернативна вартість для клієнта, пов'язана із споживанням одиниці послуги, M – множник, пропорційний доходу клієнта. Припустимо, що більшому значенню γ_i відповідає вищий рівень QoE. Дійсно, при більшому γ_i споживання d_i зростає швидше зі зниженням ціни p послуги, а при $p=0$ та $\gamma_2 > \gamma_3$ матимемо $d_2 > d_3$ за умови $a < 1$. Тоді послуга s_2 є привабливішою для споживачів, ніж послуга s_3 . Вважатимемо, що QoE для послуги s_2 є вищим, ніж для послуги s_3 : ці послуги мають високу швидкість незалежно від обсягу завантаження, але контент s_2 надається CP, а контент s_3 надається ISP.

Оскільки при попиті нижче обсягу \bar{d} послуги s_1 та s_2 не відрізняються, то $\gamma_1 = \gamma_{1H} = \gamma_2$ при досить низькому попиті:

$$d_1 = \frac{M}{(a+p)^{\gamma_{1H}}} \leq \bar{d}, \quad M \leq \bar{d}(a+p)^{\gamma_{1H}},$$

$$\frac{M}{\bar{d}} \leq (a+p)^{\gamma_{1H}}, \quad \left(\frac{M}{\bar{d}}\right)^{\frac{1}{\gamma_{1H}}} \leq a+p, \quad \left(\frac{M}{\bar{d}}\right)^{\frac{1}{\gamma_{1H}}} - a \leq p.$$

При попиті вище обсягу \bar{d} швидкість з'єднання послуги s_1 спадає, знижуючи рівень QoE та зменшуючи еластичність γ_1 попиту на цю послугу від вищого значення $\gamma_1 = \gamma_{1H} = \gamma_2$ до нижчого значення $\gamma_1 = \gamma_{1L} < \gamma_3 < \gamma_2 = \gamma_{1H}$. Тоді

$$\left(\frac{M}{\bar{d}}\right)^{\frac{1}{\gamma_{1L}}} - a \geq p, \quad d_1 = \frac{M}{(a+p)^{\gamma_{1L}}} \geq \bar{d}, \quad \left(\frac{M}{\bar{d}}\right)^{\frac{1}{\gamma_{1L}}} - a \geq p.$$

На проміжку значень p від $\left(\frac{M}{\bar{d}}\right)^{\frac{1}{\gamma_{1H}}} - a$ до $\left(\frac{M}{\bar{d}}\right)^{\frac{1}{\gamma_{1L}}} - a$ обсяг попиту зростає

$$\text{від } \bar{d} = \frac{M}{(a+p)^{\gamma_{1H}}} \text{ до } d_1 = \frac{M}{(a+p)^{\gamma_{1L}}}.$$

Припустимо, абонент вибирає одну з послуг s_i , $i = 1, 2, 3$, виходячи з мікроекономічної теорії споживання та цін послуг. За цією теорією, споживання послуги s_i пов'язується з індивідуальною функцією корисності $\varphi_i(p, d)$ абонента, який максимізує цю функцію, обираючи обсяг d споживання послуги при даній ціні p одиниці послуги. Для нейтрального до ризику споживача ця функція матиме вигляд:

$$\varphi_i(p, d) = \psi_i(d) - (a + p)d - C, \quad (3.7)$$

де $\psi_i(d)$ – корисність споживання обсягу d послуги s_i , $(a + p)d$ – витрати такого споживання, $C = C_i$ – абонентська плата. Функція попиту $d_i(p) = d_i(p, C, M)$ є результатом максимізації функції $\varphi_i(p, d)$ відносно d . Тоді максимальна споживча корисність, пов'язана зі споживанням послуги s_i за ціною p , становить $\beta_i(p) \equiv \varphi_i(p, d_i(p))$, $i = 1, 2, 3$.

Звідси впливає правило споживання послуг абонентом, коли послуги s_1, s_2 пропонуються за ціною $p_1 = p_2$, а послуга s_3 – за ціною p_3 :

знайти послугу s_k таку, що $\beta_k(p_k) \geq \beta_i(p_i)$, $i = 1, 2, 3$;

попит d_k на послугу s_k дорівнює $d_k(p_1) = d_k(p_2)$ при $k = 1, 2$ та $d_k(p_3)$ при $k = 3$;

попит d_i на послугу s_i дорівнює 0 при $i \neq k$.

Для функції попиту (3.6) функція корисності (3.7) матиме вигляд

$$\varphi_i(p, d) = \psi_i(d) - \frac{(a+p)M}{(a+p)^{\gamma_i}} - C = \psi_i(d) - (a+p)^{1-\gamma_i} M - C \geq 0,$$

звідки впливатиме обмеження абонплати (participation constraint)

$$\varphi_i(p, d) - \psi_i(d) + (a + p)^{1-\gamma_i} M \geq C, \quad i = 1, 2, 3.$$

Виконання цього обмеження має сприяти створенню критичної маси користувачів послуг.

Для аналізу взаємозв'язків між провайдерами Інтернет-послуг і контент-провайдерами в Інтернет-екосистемі запропоновано обчислювані моделі, основані на побудові функцій виграшу всіх учасників цієї екосистеми. Введення платного перегляду контенту мотивуватиме провайдерів Інтернет-послуг до інвестицій у підвищення спроможностей мережі, яка має тренд експоненціального зростання. Водночас такий перегляд порушуватиме принципи нейтральності мережі, що дає підстави для розробки нових задач мінімізації порушень умов нейтральності мережі та максимізації суспільного добробуту Інтернет-екосистеми. Моделі вказують на важливість ефективності провайдерів Інтернет-послуг, передбачуваності попиту та високої цінової еластичності інноваційних послуг.

3.2 Втрати агрегованої ефективності при досягненні міжрегіональної рівності

Ціль міжрегіональної рівності може суперечити цілі максимізації агрегованого випуску – цілі ефективності [34, 184, 185]. Тому регіональні стратегії слід формулювати і втілювати враховуючи мережеві взаємозв'язки між агрегованою ефективністю та міжрегіональною рівністю [41, 186]. Чисельний аналіз таких взаємозв'язків з урахуванням даних економічної системи є складною науково-практичною проблемою управління [187].

Автором інноваційного погляду на ймовірність є французький математик і католицький теолог Блез Паскаль (Blaise Pascal, 1623–1662). У книзі «*Ars cogitandi*», виданій у 1662 р. його учнями, він приписує ченцю з Порт-Рояль (Port-Royal) таку думку: «Страх збитків має бути пропорційним не тільки їх величині, але і ймовірності їх настання». У 1713 р. подібну книгу «*Ars Conjectandi*» (у

перекладі з латини на англійську – «The Art of Conjecturing») опублікував швейцарський математик Якоб Бернуллі (Jacob Bernulli, 1654–1705).

Застосування математичних методів у страхуванні вело до розвитку актуарної математики, одним з наріжних каменів якої є поняття очікуваної тривалості життя. Член-кореспондент НАН України М.Й. Ядренко (1932–2004) у 1995 р. відновив у Київському національному університеті імені Тараса Шевченка курс з актуарної математики, який читав академік АН України Д.О. Граве (1863–1939) у часи Української народної республіки. Цей курс започаткував модернізацію навчального процесу на механіко-математичному факультеті цього університету.

Саме математикам-теоретикам, а не торговцям-практикам вдалося закласти основи сучасних теорій страхування, ризиків і фінансів: зібрані страхові внески не безпосередньо перерозподіляються, а опосередковано інвестуються.

Регіональні економічні стратегії на державному рівні часто спрямовані на поліпшення міжрегіонального розподілу випуску і доходу, незважаючи на можливе зниження при цьому агрегованого випуску. Для такого поліпшення у США у 1965 р. прийнято Закон про Аппалачський регіональний розвиток і Закон про громадські роботи й економічний розвиток. Якщо розподіл ресурсів конкурентним ринком максимізує агрегований випуск [188] (один з авторів роботи [188] – Нобелівський лауреат 1970 р., а інший – Нобелівський лауреат 1987 р.), то будь-яка стратегія на поліпшення міжрегіональної рівності знижуватиме агрегований випуск, коли немає перерозподілу доходу через паушальні (lump sum) трансфертні платежі, які не чіпають власне виробництва. За традиційною теорією економіки добробуту, такого перерозподілу доходу можна досягати через паушальні податки і допомоги [189]. Проте в реальності наявні засоби перерозподілу доходу (акцизи, податки на нерухомість, соціальні допомоги) напевне впливають на стимули людей до праці. Для розв'язання проблеми доцільно розробити загальну методологію побудови чисельних взаємозв'язків між

агрегованою ефективністю та міжрегіональною рівністю і знайти такі взаємозв'язки для можливих ситуацій у статичній системі.

Виходитимемо з простих припущень: 1) існує два види виробничих факторів (входів) – праця (labor) L і капітал (capital) K ; 2) входи і вихід (випуск) є однорідними і вимірюваними у фізичних одиницях; 3) випуск кожного регіону є функцією входів, фізично розташованих у цьому регіоні. Для регіону як відкритої системи випуск залежить як від входів у межах регіону, так і входів за його межами. Прикладом такого входу є транспортна інфраструктура: якщо ця інфраструктура стає кращою в інших регіонах, то випуск даного регіону лише виграватиме. Оскільки цей вигреш не стане вирішальним для випуску даного регіону, то припущення 3) не видається надмірним.

Зазвичай припускають, що виробнича функція має властивості додатної граничної продуктивності за кожним входом і зменшуваного граничного рівня заміни між входами. Якщо капіталом регіону i володіють виключно резиденти регіону, які не мають інших капітальних активів, то дохід x_i на душу населення дорівнює відношенню регіонального випуску X_i до чисельності L_i населення цього регіону. Обчислення такого доходу слід модифікувати, якщо перед перерозподілом входів для поліпшення міжрегіональної рівності існує власність резидентів регіону на капітал за межами даного регіону.

При вищезазначених припущеннях у координатах (L, K) побудуємо ізокванти X_i кожного регіону. Оскільки населення загалом становить порівняно сталу частку робочої сили, то локуси (геометричне місце точок) однакових величин x_i можна будувати у тих же координатах як радіальні криві, які починаються у точці $(0, 0)$.

Нехай країна складається з двох регіонів, а для кожного регіону в будь-який час відомо його чисельність населення, обсяг робочої сили і наявного капіталу. На прямокутній діаграмі Еджворта (Edgeworth) регіонам відповідають протилежні

вершини, обсягу праці відповідає перша пара паралельних сторін прямокутника, обсягу капіталу – друга пара. Обсяг праці (капіталу) регіону вимірюється по стороні першої (другої) пари, починаючи з відповідної вершини. На цій діаграмі можна побудувати ізокванти агрегованого випуску

$$X = X_1 + X_2 \quad (3.8)$$

обох регіонів в залежності від (міжрегіонального) розподілу праці й капіталу.

Коли ступінь однорідності виробничої функції $X_i(L_i, K_i)$ менша 1, $i = 1, 2$, то точка максимального агрегованого випуску X знаходиться в межах прямокутника; коли ж для якоїсь виробничої функції ця ступінь не менша 1, то така точка може знаходитися за межами прямокутника. У тривіальному випадку такою точкою є одна з вершин. Досліджено локуси однакових агрегованих випусків [190]. Можна довести, що згадана точка є конкурентною рівновагою [188]. Будь-яке відхилення фактичного розподілу від теоретичної рівноваги можна вважати наслідком ринкових недосконалостей.

Подібним чином можна зображати міжрегіональну рівність за розподілом доходу. Вводячи відношення

$$R_{12} = \frac{x_1}{x_2} = \frac{X_1 L_2}{L_1 X_2} \quad (3.9)$$

рівності, можна побудувати локуси однакових величин R_{12} на діаграмі Еджворта – множину кривих, що виходять з вершини одного регіону і входять у вершину іншого регіону. Ці локуси можна отримати аналітично для заданих виробничих функцій [190].

Маючи локуси однакових X на одній діаграмі та локуси R_{12} на іншій діаграмі, можна оцінювати наслідки довільного регіонального розподілу входів для агрегованої ефективності та міжрегіональної рівності. Слід зазначити, що найефективніший розподіл входів не обов'язково належить локусу $R_{12} = 1$. У точці ефективного розподілу має бути однаковою віддача регіонів на однакові входи. Конкурентна рівновага загалом не означає рівного розподілу доходу через 1)

нерівність розподілу власності капіталу з відповідною нерівністю розподілу доходів від капіталу, 2) регіональну нерівність таких невідновлюваних і нерухомих виробничих факторів, як угіддя чи копальні, з відповідною нерівністю розподілу рент від них. Отже, існує вибір (tradeoff) між агрегованою ефективністю і міжрегіональною рівністю.

Проаналізуємо цей вибір з погляду наявних засобів досягнення цілі рівності. Коли перерозподіли населення (праці) і капіталу є політично допустимими, то трансформаційна площа, яка відповідає бажаним перерозподілам на діаграмі Еджворта, задається точками максимального агрегованого випуску на кожному локусі з різними значеннями R_{12} . Ця площа не обов'язково є неперервною [190]. Варто зазначити, що розподілу найвищої ефективності з повною рівністю можна досягати через збільшення населення і капіталу в одному з регіонів. Коли допустимими є перерозподіли капіталу, але не населення, то трансформаційна площа – це лінія, що проходить через точку початкового перерозподілу паралельно другій парі сторін прямокутника Еджворта; коли допустимими є перерозподіли населення, але не капіталу, то трансформаційна площа – це лінія, що проходить через точку початкового перерозподілу паралельно першій парі сторін прямокутника Еджворта. Очевидно, що трансформаційна площа при допустимих перерозподілах обох виробничих факторів (праці й капіталу) не гірша (з точки зору досліджуваного взаємообміну) трансформаційної площі при допустимому перерозподілі лише одного виробничого фактора. Згадані трансформаційні площі можна відображати у координатах ефективності E та R_{12} , де $E(R_{12})$ – відношення максимального агрегованого випуску $X(R_{12})$ при даному R_{12} до безумовного максимального агрегованого випуску X .

Припустимо, що кожна регіональна виробнича функція – це виробнича функція фіксованих пропорцій типу Вальраса – Леонт'єва (Walras – Leontief) (Леонт'єв – Нобелівський лауреат 1973 р.):

$$X_i = \min \left\{ \frac{L_i}{a_i}, \frac{K_i}{b_i} \right\}, \quad a_i > 0 < b_i, \quad i = 1, 2. \quad (3.10)$$

Ці функції не обов'язково задовільно наближують реальні виробничі функції, але спрощують аналітичну побудову трансформаційних площ. Коефіцієнти a_i відповідають праці, а коефіцієнти b_i – капіталу.

З умови (3.10) випливають нерівності

$$X_1 \leq \frac{L_1}{a_1}, \quad X_2 \leq \frac{L_2}{a_2}, \quad a_1 X_1 + a_2 X_2 \leq L_1 + L_2 = L \quad (3.11)$$

$$X_1 \leq \frac{K_1}{b_1}, \quad X_2 \leq \frac{K_2}{b_2}, \quad b_1 X_1 + b_2 X_2 \leq K_1 + K_2 = K. \quad (3.12)$$

Максимізація (3.8) при обмеженнях (3.11) і (3.12) зводиться до задачі лінійного програмування – пошуку значень X_1 , X_2 при фіксованих додатних коефіцієнтах a_1 , a_2 , b_1 , b_2 й агрегованих величинах L , K країни в цілому.

Якщо максимізація веде до цілковитої концентрації одного з входів у певному регіоні, який монополізуватиме випуск (однорідного продукту), то трансформаційна площа відповідатиме граничній ефективності на межі прямокутника Еджворта з повною концентрацією обох виробничих факторів в одному регіоні. Тоді за відсутності населення в іншому регіоні поняття міжрегіональної рівності втрачатиме сенс.

Умови того, що розв'язок задачі максимізації (3.8) при обмеженнях (3.11) і (3.12) знаходиться у внутрішності прямокутника Еджворта, – це нерівності

$$L_1 > 0 < L_2, \quad K_1 > 0 < K_2.$$

Звідси в силу умови (3.10) маємо $X_1 > 0 < X_2$. Якщо (X_1, X_2) – розв'язок даної задачі, який знаходиться у внутрішності прямокутника Еджворта (кожний регіон дає ненульовий випуск), то кожний регіон повністю використовує свої виробничі фактори, а нерівності (3.11) і (3.12) задовольняються як рівності:

$$a_1 X_1 + a_2 X_2 = L, \quad b_1 X_1 + b_2 X_2 = K, \quad (3.13)$$

звідки

$$X_1 = \frac{L - a_2 X_2}{a_1}, \quad \frac{b_1(L - a_2 X_2)}{a_1} + b_2 X_2 = b_1 X_1 + b_2 X_2 = K,$$

$$b_1 L - b_1 a_2 X_2 + b_2 a_1 X_2 = a_1 K, \quad 0 < X_2 = \frac{a_1 K - b_1 L}{b_2 a_1 - b_1 a_2}.$$

Остання нерівність рівносильна виконанню або пари нерівностей

$$b_2 a_1 - b_1 a_2 > 0, \quad a_1 K - b_1 L > 0, \quad (3.14)$$

або пари нерівностей

$$b_2 a_1 - b_1 a_2 < 0, \quad a_1 K - b_1 L < 0. \quad (3.15)$$

В силу симетрії $0 < X_1 = \frac{a_2 K - b_2 L}{b_1 a_2 - b_2 a_1}$.

Остання нерівність рівносильна виконанню або пари нерівностей

$$b_1 a_2 - b_2 a_1 > 0, \quad a_2 K - b_2 L > 0, \quad (3.16)$$

або пари нерівностей

$$b_1 a_2 - b_2 a_1 < 0, \quad a_2 K - b_2 L < 0. \quad (3.17)$$

За виконання пар нерівностей (3.14), (3.17) маємо обмеження капіталоозброєності $\frac{a_2}{b_2} < \frac{L}{K} < \frac{a_1}{b_1}$, а за виконання пар нерівностей (3.15), (3.16)

маємо обмеження $\frac{a_2}{b_2} > \frac{L}{K} > \frac{a_1}{b_1}$.

Співвідношення (3.10) і (3.13) означають

$$X_1 = \frac{L_1}{a_1} = \frac{K_1}{b_1}, \quad X_2 = \frac{L_2}{a_2} = \frac{K_2}{b_2}, \quad (3.18)$$

звідки

$$x_1 = \frac{X_1}{L_1} = \frac{1}{a_1}, \quad x_2 = \frac{X_2}{L_2} = \frac{1}{a_2}, \quad R_{12} = \frac{x_1}{x_2} = \frac{a_2}{a_1}. \quad (3.19)$$

Отже, при $a_1 = a_2$ існує міжрегіональний розподіл, який одночасно задовольняє ефективності й рівності.

Якщо існує такий розв'язок даної задачі, то регіональні стратегії мають бути спрямовані на вирівнювання коефіцієнтів, що відповідають праці.

Припустимо тепер, що $a_1 < a_2$. Тоді співвідношення (3.19) дають $x_1 > x_2$ у точці ефективності. Оскільки в цій точці кожний регіон $i = 1, 2$ досягає свого найвищого значення x_i , то міжрегіональної рівності можна досягнути лише за рахунок а) надання регіону 1 надлишкової праці та/або б) вилучення з регіону 1 деякого капіталу, що визначає випуск регіону 1. Враховуючи рівності (3.18), локусу з $R_{12} = 1$ відповідають співвідношення

$$1 = R_{12} = \left(\frac{X_1}{L_1} \right) \left(\frac{X_2}{L_2} \right)^{-1} = \frac{K_1}{b_1 L_1} \left(\frac{L_2}{a_2 L_2} \right)^{-1} = \frac{a_2 K_1}{b_1 L_1}, \quad K_1 = \frac{b_1}{a_2} L_1,$$

$$X(R_{12} = 1) = X_1 + X_2 = \frac{K_1}{b_1} + \frac{L - L_1}{a_2} = \frac{L_1}{a_2} + \frac{L}{a_2} - \frac{L_1}{a_2} = \frac{L}{a_2}.$$

Постійне значення агрегованого випуску на локусі міжрегіональної рівності означає, що втрата ефективності при виробничій функції (3.10) не залежить від способу досягнення такої рівності – способу а) та/або б).

Оскільки в силу рівностей (3.18) максимальна ефективність відповідає агрегованому випуску $X = X_1 + X_2 = \frac{L_1}{a_1} + \frac{L_2}{a_2}$, то значення ефективності рівне

$$E(R_{12}) = \frac{X(R_{12})}{X} = \left(\frac{L}{a_2} \right) \left(\frac{L_1}{a_1} + \frac{L_2}{a_2} \right)^{-1} = \left(\frac{L}{a_2} \right) \left(\frac{L_1}{a_1} + \frac{L - L_1}{a_2} \right)^{-1} =$$

$$= \frac{L a_1 a_2}{a_2 [a_2 L_1 + a_1 (L - L_1)]} = \frac{a_1}{a_2 p + a_1 (1 - p)},$$

де $p = \frac{L_1}{L}$ – частка (proportion) населення регіону 1 у населенні країни. Беручи до уваги також рівності (3.19), дістаємо залежність

$$E(R_{12}) = \frac{1}{R_{12} p + 1 - p} = \frac{1}{1 + p(R_{12} - 1)}, \quad (3.20)$$

яку можна відображати у координатах E , R_{12} для кожного значення параметра p .

Враховуючи $R_{12} = \frac{x_1}{x_2} > 1$ у залежності (13), значення $E(R_{12})$ спадає з ростом p

тому, що міжрегіональної рівності можна досягати лише через зниження величини x_1 до рівня x_2 .

Припустимо, що регіональні виробничі функції є більш реалістичними функціями Кобба – Дугласа (Cobb – Douglas):

$$X_1 = c_1(L_1)^{\alpha_1}(K_1)^{\beta_1}, \quad X_2 = c_2(L_2)^{\alpha_2}(K_2)^{\beta_2}, \quad (3.21)$$

де c_i , α_i , β_i – задані додатні коефіцієнти, $i = 1, 2$. Для спостережуваної еластичності заміни між працею і капіталом для ряду товарних галузей виробнича функція Кобба – Дугласа виявилася точнішою, ніж виробнича функція фіксованих пропорцій [191].

З рівностей (3.21) випливає

$$X = X_1 + X_2 = c_1(L_1)^{\alpha_1}(K_1)^{\beta_1} + c_2(L - L_1)^{\alpha_2}(K - K_1)^{\beta_2}. \quad (3.22)$$

Якщо точка міжрегіонального розподілу є внутрішньою точкою прямокутника Еджворта (тобто $0 < L_1 < L$, $0 < K_1 < K$), то умови першого порядку максимізації цільової функції (3.22) $X(L_1, K_1)$ по L_1 , K_1 дають систему рівнянь

$$0 = \frac{\partial X}{\partial L_1} = c_1\alpha_1(L_1)^{\alpha_1-1}(K_1)^{\beta_1} - c_2\alpha_2(L - L_1)^{\alpha_2-1}(K - K_1)^{\beta_2},$$

$$\alpha_1 x_1 = \alpha_1 \frac{X_1}{L_1} = \alpha_1 \frac{c_1(L_1)^{\alpha_1}(K_1)^{\beta_1}}{L_1} = \frac{c_2\alpha_2(L - L_1)^{\alpha_2}(K - K_1)^{\beta_2}}{L - L_1} = \frac{\alpha_2 X_2}{L - L_1} = \alpha_2 x_2,$$

$$0 = \frac{\partial X}{\partial K_1} = c_1\beta_1(L_1)^{\alpha_1}(K_1)^{\beta_1-1} - c_2\beta_2(L - L_1)^{\alpha_2}(K - K_1)^{\beta_2-1},$$

$$\beta_1 \frac{X_1}{K_1} = \beta_1 \frac{c_1(L_1)^{\alpha_1}(K_1)^{\beta_1}}{K_1} = \frac{c_2\beta_2(L - L_1)^{\alpha_2}(K - K_1)^{\beta_2}}{K - K_1} = \frac{\beta_2 X_2}{K - K_1},$$

звідки можна визначити значення L_1 , K_1 у точці ефективності. Тоді $R_{12} = \frac{x_1}{x_2} = \frac{\alpha_2}{\alpha_1}$,

як і в рівнянні (3.19). Отже, відношення рівності для внутрішнього розв'язку задачі максимізації ефективності визначається виключно коефіцієнтами праці, а умовою існування ефективності й рівності залишається рівняння $a_1 = a_2$.

Достатньою умовою існування внутрішнього розв'язку задачі максимізації ефективності є зменшувана віддача від масштабу виробничих функцій (3.21), тобто $\alpha_i + \beta_i < 1$, $i = 1, 2$ [190]. Хоча деякі галузі можуть виявляти збільшувану віддачу від масштабу, регіони в цілому напевне виявлятимуть зменшувану віддачу від масштабу тому, що до капіталу як виробничого фактора не включаються такі нерухомі входи, як земля, клімат, підземні копалини. При виробничій функції регіону із збільшуваною віддачею від масштабу може існувати внутрішній розв'язок задачі максимізації агрегованої ефективності, якщо виробнича функція іншого регіону виявляє зменшувану віддачу від масштабу [190]; однак існування такого розв'язку малоймовірне тому, що незначна зміна будь-якої з виробничих функцій регіонів часто призводить до повної концентрації входів в одному з них.

При однакових регіональних виробничих функціях (скажімо, $c_i = 1$, $\alpha_i = 0.5$, $\beta_i = 0.3$, $i = 1, 2$) локуси однакової ефективності та локуси однакової рівності можна відображати на діаграмі Еджворта зі сторонами $\frac{K_1}{K}$ і $\frac{L_1}{L}$. Відповідні трансформаційні площі при альтернативних умовах перерозподілу можна відображати у координатах E , R_{12} ; при цьому горизонтальна вісь R_{12} масштабується так, що: а) величини R_{12} і $\frac{1}{R_{12}}$ (на цій осі) мають розташовуватися на однаковій відстані D від величини $R_{12} = 1$, але у протилежних напрямках; б) величини $R_{12} = 0$ і $R_{12} = \infty$ мають розташовуватися на скінченній відстані від величини $R_{12} = 1$. Серед багатьох функцій, що задовольняють умовам а), б), можна

вибрати функцію $D = \frac{4}{\pi} \arctan R_{12} - 1$, при якій вісь значень R_{12} має довжину 2.

При різних регіональних виробничих функціях (скажімо, $c_1 = 1 = c_2$, $\alpha_1 = 0.5$, $\alpha_2 = 0.7$, $\beta_1 = 0.3$, $\beta_2 = 0.1$) локуси однакової ефективності та локуси однакової рівності можна відображати на діаграмі Еджворта зі сторонами $\frac{K_1}{K}$ і $\frac{L_1}{L}$.

Відповідні трансформаційні площі при різних умовах перерозподілу можна відображати у координатах E , R_{12} .

Як було показано на виробничій функції фіксованих пропорцій, найвища ефективність агрегованого випуску за обмеження $R_{12} = 1$ залежить від відносного розподілу населення і відношення рівності при цій ефективності для кожного альтернативного припущення про допустимість перерозподілу факторів, а також від ступеня $h_i = \alpha_i + \beta_i$ однорідності (homogeneity) виробничої функції. Для кількох гіпотетичних випадків (комбінацій значень $p \in \{0.8, 0.5, 0.2\}$, $R_{12} \in \left\{2, \frac{3}{2}, \frac{4}{3}\right\}$, $h_i \in \{0.95, 0.9, 0.85, 0.8\}$) було знайдено, що відношення E найвищої ефективності при $R_{12} = 1$ до максимально можливої ефективності (перетин трансформаційної площі з віссю $R_{12} = 1$) перевищує 94% за можливості перерозподілу населення й капіталу, перевищує 93% за можливості перерозподілу лише населення і перевищує 82% за можливості перерозподілу тільки капіталу [187]. Це відношення, як правило, перевищує 90%; це відношення зменшується з ростом R_{12} ; величина E зменшується при відносно малих R_{12} і граничних значеннях p (близьких до 1 чи 0), а також при відносно великих R_{12} і малих p ; за можливості перерозподілу населення величина E є загалом є більшою, ніж за можливості перерозподілу капіталу, крім випадків порівняно малих p і великих h ; можливість перерозподілу обох виробничих факторів, як правило, не дає підвищення величини E понад 1% порівняно з можливістю перерозподілу лише

одного фактора. На відміну від виробничої функції фіксованих пропорцій, при виробничій функції Кобба–Дугласа величина E не обов'язково зменшується з ростом відносної частки кращого регіону у точці ефективності.

На відміну від виробничої функції фіксованих пропорцій (із ступенем однорідності 1), при виробничій функції Кобба–Дугласа досягнення міжрегіональної рівності потребує менше втрат ефективності: ступінь однорідності h_i мало впливає на величину E . Справді, на відміну від ряду виробничих функцій, виробнича функція Кобба–Дугласа виявляє високий рівень взаємозамінюваності праці й капіталу. Оскільки справжні агреговані виробничі функції належать класу, проміжному між класом виробничих функцій фіксованих пропорцій і класом виробничих функцій Кобба–Дугласа [192], то досягнення міжрегіональної рівності супроводжуватиметься меншими втратами ефективності шляхом перерозподілу населення (міграції), ніж шляхом перерозподілу капіталу.

Перерозподіл доходів потрібний для організації проведення досліджень і розробок у країні. Нобелівський лауреат 2018 р. Ромер пояснює роль технічних досягнень для економічного зростання і його прискорення під час промислової революції. Якщо традиційна економіка розглядає тільки два фактори виробництва — капітал і працю, то Ромер додає третій — технологічні знання. Ромер стверджує, що неурядові й урядові організації могли б сприяти технологічним інноваціям, інвестуючи в нові дослідження і розробки, починаючи із загальної і професійної підготовки кадрів: технологічним прогресом можна керувати через соціально-економічні стимули.

Один з висновків Ромера: економіка, яка володіє ресурсами людського капіталу та розвиненою наукою, в довгостроковій перспективі має кращі шанси на зростання продуктивності, ніж економіка, позбавлена цих переваг. З моделі Ромера випливає: якщо одній фірмі вдалося досягти ноу-хау (know-how) чи інновації, то в сприятливому інноваційному середовищі іншим фірмам набагато легше навчитися вже досягнутому. Ромер вирізняє ідеї серед традиційних

продуктів: «Предмети зберігають сталу вартість за одиницю продукції, позаяк ідеї мають величезну вартість за першу одиницю продукції і практично нульову – за кожну наступну одиницю». Ромер вдосконалив модель ендogenous економічного зростання Нобелівського лауреата 1972 р. Кеннета Ерроу (Kenneth Arrow, 1921–2017), запровадив параметр знання як фактор виробництва, розробив модель навчання в процесі діяльності (learning-by-doing) і застосував її до макроекономіки (Ерроу – один з авторів вищезгаданої роботи [192]).

Практичні приклади і моделі, основані на виробничих функціях Кобба–Дугласа, свідчать, що досягнення міжрегіональної рівності можливе без істотних втрат агрегованої ефективності країни в цілому.

3.3 Алгоритм розрахунку цільової досяжної структури товарного експорту України та її регіонів

На зустрічі в НАН України 14 березня 2018 р. Надзвичайний і Повноважний Посол Республіки Корея пан Лі Янг-Гу повідомив про світове лідерство Кореї за обсягами фінансового забезпечення наукової сфери. У корейському суспільстві та владних колах панує переконаність у тому, що без науки немає майбутнього, а найефективнішими рушіями поступу є ринкова економіка й інновації. Президентів Республіки Корея підпорядковується спеціальний комітет, який опікується питаннями Четвертої промислової революції [193]. Його аналогом в Україні вважається Національна рада України з питань розвитку науки і технологій – постійний консультативно-дорадчий орган при Кабінеті Міністрів України, очолюваний Прем'єр-міністром України. Водночас експорт Кореї розвивався і розвивається значно швидше, ніж експорт України: товарний експорт Кореї за 2016 р. становив 495.418 млрд. дол., що у понад 13 разів більше товарного експорту України за 2016 р. При цьому населення України до 2003 р. перевищувало населення Кореї, але через десятиріччя, станом на 2013 р.,

населення Кореї на понад 5 млн. перевищувало населення України: за даними World Economic Outlook Міжнародного валютного фонду (МВФ), у 2013 р. населення України становило 45.246 млн., а Кореї – 50.429 млн. Можна припустити, що одним з наслідків порівняно низького експорту України є погіршення демографічної, а також соціально-економічної ситуації загалом.

На згаданій зустрічі Посол Кореї нагадав, що в січні 2018 р. було підписано Меморандум про порозуміння між Національним технічним університетом України (НТУУ) «Київський політехнічний інститут (КПІ) імені Ігоря Сікорського» та Університетом Ханьянг (Республіка Корея), який, зокрема, передбачає заснування при НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського» Українсько-корейського центру як відкритої платформи з науки, технологій та інновацій. Посол висловив сподівання, що НАН України підтримає такі спільні ініціативи двох університетів, та поінформував про візит до України 28–29 березня 2018 р. делегації провідної корейської міждисциплінарної дослідницької установи – Корейського інституту науки і технологій (KIST), що належить до найбільш інноваційних дослідницьких інститутів світу. KIST, серед іншого, пропонує освітні послуги (на здобуття наукових ступенів магістра й доктора філософії), безкоштовне отримання яких доступне й для студентів-іноземців. Послуги надає структура, що функціонує при цій організації, – KIST School.

9 лютого 2018 р. на офіційній церемонії відкриття зимової Олімпіади в Кореї було продемонстровано взаємодію 1218 дронів – квадрокоптерів Shooting Star фірми Intel, призначених для світлових вистав. Кожний такий квадрокоптер виготовлений з надлегких матеріалів і містить світловипромінюючі діоди (light-emitting diodes, LEDs). Для взаємодії використано технологію Swarm – підхід до координації систем з багатьох простих фізичних роботів, Відомий мобільний додаток Swarm для iOS, Android, Windows Phone 8.1, який дозволяє користувачам повідомляти свої координати в соціальній мережі. Технологія Swarm виникла на перетині штучного інтелекту, біології комах, фізики частинок і синергетики. Світлова

вистава є колективною поведінкою роботів у заданому середовищі, яка може управлятися з єдиного комп'ютера (командного пункту), здатного створювати понад 4 млрд. різних світлових комбінацій на основі вбудованих LEDs та системних алгоритмів, що здійснюють хореографію та оптимізацію траєкторії польоту. Очевидно, що така вистава є застосуванням новітніх інформаційно-комунікаційних технологій подвійного призначення.

Посол Кореї зауважив, що МВФ та інші міжнародні організації вважають саме повсюдне практичне впровадження нових технологій запорукою реалізації найоптимістичнішого сценарію розвитку України – щорічного зростання валового внутрішнього продукту з темпом до 20% в осяжній перспективі [194].

Завданням дослідження [86] є розрахунок цільової досяжної структури експорту на даних України та одного з її регіонів, щоб показати реалістичність високих темпів зростання ВВП України.

За даними Міжнародного центру торгівлі (International Trade Centre) [195], загальний світовий експорт істотно знижується за основними групами товарів (відповідно до класифікації Гармонізованої системи [196]), починаючи з 2014 р. (табл. 1.1 [86]).

Виходячи з табл. 1.1 і 1.2 [86], побудуємо табл. 3.1.1, 3.1.2, 3.1.3. Помітно знижується частка SW_t^k (%) колись найбільшої товарної групи $k=27$ (палива мінеральні; нафта і продукти її перегонки; бітумінозні речовини; воски мінеральні), нагадуючи про крилатий вислів «Кам'яний вік скінчився не тому, що скінчилося каміння» та про Четверту промислову революцію [193]. Ця група має найвищі дисперсію D^k та середнє A^k для вибірки років $t=2006, \dots, 2016$ (у табл. 3.1.1 значення з високою дисперсією виділено жирним).

Табл. 3.1.1, 3.1.2, 3.1.3 свідчать, що принаймні 70 товарних груп мають стійку частку SW_t^k (%) з нульовою дисперсією. Однак, у відповідності з фінансовою теорією, кожна така група характеризується порівняно низькою часткою [137].

Таблиця 3.1.1 Частка SW_t^k (%) товарної групи $k=1, \dots, 99$ у загальному світовому експорті за роками $t = 2006, \dots, 2016$, її середнє A^k та дисперсія D^k

k/t	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	A^k	D^k
85	13.7	13.1	12.0	13.0	13.0	11.8	11.8	12.3	12.6	14.1	14.5	12.9	0.83
84	13.2	13.0	12.2	12.3	11.9	11.4	11.3	11.1	11.4	11.7	11.8	11.9	0.47
27	14.6	13.9	17.7	14.3	15.5	17.9	18.3	17.3	16.1	11.1	9.35	15.1	8.30
87	8.43	8.58	7.76	6.88	7.20	7.05	7.12	7.18	7.40	8.05	8.48	7.65	0.41
71	2.04	2.12	2.32	2.64	2.91	3.51	4.24	4.58	3.76	3.85	4.10	3.28	0.82
39	3.23	3.24	3.00	3.17	3.21	3.12	3.10	3.19	3.30	3.37	3.42	3.21	0.01
90	3.11	2.88	2.75	3.21	3.16	2.93	3.01	2.98	3.04	3.29	3.36	3.07	0.03
30	2.41	2.48	2.50	3.41	2.94	2.54	2.56	2.59	2.72	3.02	3.10	2.75	0.10
99	2.14	2.86	2.56	2.08	2.02	1.73	1.66	1.74	1.98	2.44	2.63	2.17	0.16
29	2.49	2.49	2.31	2.49	2.45	2.43	2.43	2.39	2.30	2.25	2.18	2.38	0.01
88	1.45	1.33	1.32	1.73	1.47	1.39	1.56	1.66	1.71	2.02	2.07	1.61	0.07
72	2.76	3.07	3.25	2.24	2.57	2.64	2.32	2.10	2.18	1.98	1.89	2.45	0.20
73	1.75	1.86	1.93	1.84	1.64	1.66	1.67	1.65	1.69	1.71	1.63	1.73	0.01
94	1.15	1.18	1.11	1.19	1.11	1.06	1.15	1.21	1.29	1.45	1.47	1.21	0.02
61	1.21	1.25	1.12	1.29	1.19	1.16	1.15	1.23	1.27	1.34	1.37	1.23	0.01
62	1.32	1.23	1.14	1.27	1.12	1.10	1.05	1.10	1.24	1.34	1.36	1.21	0.01
38	0.90	0.91	0.97	1.04	1.01	1.01	0.97	0.98	1.02	1.04	1.08	0.99	0.00
40	1.00	1.01	0.98	1.01	1.12	1.28	1.20	1.10	1.03	1.02	1.02	1.07	0.01
26	0.80	0.87	0.90	0.95	1.28	1.43	1.26	1.30	1.17	0.95	0.99	1.08	0.04
76	1.15	1.14	1.03	0.91	0.97	0.96	0.86	0.86	0.91	0.99	0.98	0.98	0.01
48	1.24	1.21	1.12	1.24	1.13	1.05	0.91	0.92	0.93	0.95	0.96	1.06	0.02
64	0.62	0.60	0.58	0.67	0.64	0.63	0.64	0.68	0.75	0.82	0.85	0.68	0.01
44	0.93	0.90	0.74	0.74	0.71	0.66	0.65	0.70	0.74	0.76	0.80	0.76	0.01
89	0.77	0.78	0.92	1.19	1.15	1.06	0.86	0.78	0.74	0.83	0.77	0.90	0.03
74	1.14	1.09	0.92	0.86	1.06	1.02	0.94	0.87	0.82	0.79	0.74	0.93	0.02
33	0.55	0.56	0.54	0.64	0.59	0.57	0.57	0.60	0.63	0.68	0.73	0.61	0.00
2	0.57	0.57	0.61	0.72	0.64	0.65	0.64	0.66	0.70	0.69	0.71	0.65	0.00
3	0.53	0.49	0.45	0.57	0.54	0.53	0.52	0.55	0.59	0.62	0.68	0.55	0.00
8	0.44	0.44	0.44	0.55	0.50	0.48	0.49	0.53	0.56	0.63	0.68	0.52	0.01
22	0.57	0.59	0.57	0.65	0.58	0.58	0.59	0.60	0.60	0.64	0.67	0.60	0.00
28	0.69	0.70	0.80	0.69	0.76	0.77	0.70	0.67	0.64	0.67	0.61	0.70	0.00
10	0.42	0.53	0.66	0.63	0.56	0.65	0.66	0.65	0.64	0.63	0.60	0.60	0.01
95	0.57	0.61	0.61	0.67	0.56	0.51	0.49	0.47	0.49	0.57	0.59	0.56	0.00
12	0.27	0.31	0.40	0.48	0.45	0.46	0.51	0.53	0.53	0.53	0.56	0.46	0.01
15	0.37	0.44	0.56	0.54	0.54	0.61	0.58	0.52	0.51	0.52	0.55	0.52	0.00
32	0.48	0.47	0.43	0.47	0.46	0.45	0.43	0.43	0.44	0.45	0.46	0.45	0.00
42	0.32	0.32	0.31	0.35	0.34	0.36	0.38	0.40	0.40	0.45	0.46	0.37	0.00
4	0.40	0.44	0.45	0.48	0.47	0.46	0.44	0.50	0.52	0.46	0.46	0.46	0.00
7	0.32	0.32	0.31	0.40	0.37	0.35	0.32	0.35	0.35	0.40	0.44	0.36	0.00
70	0.44	0.43	0.41	0.44	0.42	0.40	0.39	0.40	0.39	0.41	0.43	0.41	0.00

Таблиця 3.1.3 Частка SW_t^k (%) товарної групи $k=1, \dots, 99$ у загальному світовому експорті за роками $t=2006, \dots, 2016$, її середнє A^k та дисперсія D^k

k/t	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	A^k	D^k
65	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05	0.06	0.04	0.00
5	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06	0.06	0.05	0.05	0.05	0.00
43	0.06	0.05	0.04	0.05	0.06	0.06	0.07	0.08	0.07	0.07	0.05	0.06	0.00
67	0.03	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.04	0.00
13	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.07	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04	0.00
78	0.04	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.00
92	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.00
80	0.03	0.04	0.04	0.03	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.04	0.00
53	0.03	0.03	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.02	0.00
36	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00
66	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00
46	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.00
50	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.00
45	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00
14	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00

Табл. 3.2.1, 3.2.2, 3.2.3 вказують частку SU_t^k (%) експорту U_t^k кожної товарної групи $k=1, \dots, 99$ у загальному експорті U_t^0 України за роками $t=2006, \dots, 2016$, виходячи з табл. 2.1 і 2.2 [86]. Наближене значення такої частки визначається як $ASU^k = \max_t SU_t^k$.

Тоді сума цих наближених часток дорівнює $S = \sum_{k=1}^{99} ASU^k$.

Беручи до уваги природне обмеження $\sum_{k=1}^{99} SU_t^k = 100$, $t=2006, \dots, 2016$, аналогічного обмеження слід очікувати для цільових часток товарних груп у загальному експорті України: $\sum_{k=1}^{99} TSU_t^k = 100$ %, або 1.

Загальний експорт України за рік t дорівнює

$$U_t^0 = \sum_{k=1}^{99} U_t^k = \sum_{k=1}^{99} SU_t^k \times U_t^0 = U_t^0 \sum_{k=1}^{99} SU_t^k.$$

Таблиця 3.2.1 Частка SU_t^k (%) товарної групи $k=1, \dots, 99$ у загальному експорті України за роками $t=2006, \dots, 2016$, її наближене ASU^k та цільове TSU^k значення

k/t	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	ASU^k	TSU^k
85	3.33	4.54	4.25	5.61	4.93	4.66	4.70	4.95	4.97	5.19	5.47	5.61	5.61
84	5.35	5.55	5.22	7.02	6.10	5.22	5.51	6.07	5.52	5.15	3.65	7.02	7.02
27	6.66	5.34	6.14	5.37	7.12	8.32	5.30	4.53	3.73	1.28	2.18	8.32	8.32
87	1.53	2.03	1.86	0.96	1.05	0.93	0.85	0.59	0.54	0.46	0.50	2.03	2.03
71	0.32	0.30	0.22	0.21	0.14	0.15	0.20	0.19	0.30	0.22	0.10	0.32	0.32
39	1.47	1.43	1.02	1.00	1.00	1.12	1.14	0.95	0.85	0.90	0.90	1.47	1.47
90	0.40	0.41	0.36	0.70	0.49	0.41	0.42	0.46	0.43	0.41	0.32	0.70	0.70
30	0.24	0.26	0.23	0.38	0.39	0.29	0.35	0.40	0.47	0.41	0.33	0.47	0.47
99	1.04	0.86	0.45	0.78	0.66	0.55	0.60	0.91	0.24	0.29	0.35	1.04	1.04
29	1.64	1.48	0.72	0.38	0.87	0.96	0.58	0.37	0.29	0.17	0.31	1.64	1.64
88	0.62	0.51	0.34	0.49	0.24	0.47	1.35	0.50	0.46	0.50	0.08	1.35	1.35
72	34.02	33.95	34.28	25.82	28.44	27.00	22.31	22.61	23.94	21.19	19.11	34.28	34.28
73	6.16	5.91	5.28	4.90	3.88	4.16	4.13	4.09	3.15	2.41	2.01	6.16	6.16
94	0.53	0.58	0.53	0.58	0.61	0.65	0.74	0.88	0.99	1.04	1.03	1.04	1.04
61	0.28	0.27	0.19	0.26	0.24	0.24	0.23	0.26	0.25	0.25	0.42	0.42	0.42
62	1.44	1.14	0.85	1.08	0.82	0.70	0.58	0.63	0.76	0.87	1.13	1.44	1.44
38	0.43	0.39	0.35	0.48	0.35	0.28	0.24	0.26	0.24	0.23	0.25	0.48	0.48
40	0.62	0.57	0.47	0.42	0.34	0.25	0.32	0.30	0.24	0.18	0.25	0.62	0.62
26	2.38	2.24	3.22	3.38	5.01	5.73	4.81	6.19	6.44	5.81	6.44	6.44	6.44
76	1.06	0.90	0.68	0.51	0.33	0.27	0.21	0.23	0.23	0.29	0.21	1.06	1.06
48	1.34	1.41	1.17	1.76	1.60	1.41	1.47	1.71	1.58	1.40	1.17	1.76	1.17
64	0.33	0.29	0.26	0.35	0.33	0.30	0.25	0.30	0.36	0.38	0.39	0.39	0.25
44	1.57	1.68	1.20	1.67	1.61	1.58	1.54	1.81	2.34	2.90	3.89	3.89	1.20
89	0.49	0.43	0.30	0.62	0.38	0.14	0.50	0.30	0.17	0.27	0.29	0.62	0.14
74	0.79	0.70	0.46	0.45	0.52	0.37	0.29	0.26	0.30	0.31	0.28	0.79	0.26
33	0.16	0.25	0.21	0.34	0.32	0.26	0.27	0.32	0.32	0.28	0.12	0.34	0.12
2	0.09	0.21	0.11	0.20	0.18	0.29	0.46	0.55	0.71	0.99	0.64	0.99	0.09
3	0.02	0.01	0.01	0.06	0.04	0.03	0.03	0.03	0.05	0.03	0.07	0.07	0.01
8	0.39	0.29	0.26	0.44	0.41	0.32	0.29	0.22	0.27	0.40	0.50	0.50	0.22
22	1.09	1.09	0.84	1.16	0.86	0.56	0.56	0.65	0.47	0.48	0.31	1.16	0.31
28	2.83	2.34	2.40	1.73	2.20	2.62	2.47	2.75	2.19	2.54	2.80	2.83	1.73
10	3.53	1.55	5.53	8.96	4.80	5.29	10.15	10.06	12.14	15.89	15.31	15.89	1.55
95	0.18	0.14	0.12	0.19	0.20	0.15	0.14	0.15	0.18	0.19	0.30	0.30	0.12
12	0.82	1.35	2.13	2.62	2.11	2.10	2.55	3.23	3.13	3.87	3.68	3.87	0.82
15	2.53	3.49	2.91	4.52	5.09	4.97	6.07	5.54	7.09	8.65	10.36	10.36	2.53
32	0.53	0.53	0.38	0.51	0.51	0.53	0.53	0.53	0.44	0.20	0.20	0.53	0.20
42	0.06	0.08	0.07	0.07	0.09	0.06	0.05	0.06	0.07	0.10	0.09	0.10	0.05
4	0.89	1.26	1.03	1.20	1.26	1.03	0.89	1.09	1.07	1.01	0.70	1.26	0.70
7	0.23	0.14	0.12	0.40	0.23	0.19	0.20	0.18	0.24	0.25	0.47	0.47	0.12
70	0.22	0.26	0.23	0.21	0.21	0.23	0.21	0.21	0.25	0.30	0.32	0.32	0.21

Таблиця 3.2.3 Частка SU_t^k (%) товарної групи $k=1, \dots, 99$ у загальному експорті України за роками $t=2006, \dots, 2016$, її наближене ASU^k та цільове TSU^k значення

k/t	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	ASU^k	TSU^k
65	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00
5	0.03	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.03	0.05	0.03	0.05	0.01
43	0.03	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.03	0.06	0.05	0.04	0.06	0.01
67	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00
13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
78	0.04	0.07	0.04	0.06	0.04	0.02	0.02	0.03	0.04	0.06	0.08	0.08	0.02
92	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
80	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00
53	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00
36	0.03	0.01	0.02	0.04	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.04	0.01
66	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.00
46	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
14	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.08	0.16	0.15	0.10	0.16	0.00
S												151.98	100.05

$$\text{Водночас світовий експорт становить } E_t^0 = \sum_{k=1}^{99} SW_t^k \times E_t^0 = E_t^0 \sum_{k=1}^{99} SW_t^k .$$

З іншого боку, $U_t^k = WU_k^t \times E_k^t = WU_t^k \times (SW_t^k \times E_t^0)$, де E_t^k – світовий експорт товарної групи k за рік t (табл. 1.1. і 1.2 [86]), WU_t^k – частка експорту України від світового у цій групі (табл. 3.1 і 3.2 [86]). Звідси

$$U_t^0 \sum_{k=1}^{99} TSU_t^k = U_t^0 = \sum_{k=1}^{99} U_t^k = E_t^0 \sum_{k=1}^{99} WU_t^k \times SW_t^k .$$

Якщо ціль – максимізація загального експорту України станом на 2016 р., то при заданих значеннях SW_{2016}^k для пошуку цільових досяжних значень $TSU^k = TSU_{2016}^k$ пропонується алгоритм, який складається з наступних кроків.

Крок 1. Перенумеруємо всі товарні групи $k=1, \dots, 99$ у такому порядку $j=1, \dots, 98$, що $SW_{2016}^j > SW_{2016}^{j+1}$.

Крок 2. Визначаємо $T=100$.

Крок 3. Обираємо початкове наближення

$$TSU_{2016}^j = ASU^j = \max_t SU_t^j, \quad j=1, \dots, 99.$$

Для простоти вважаємо, що індекс t , де досягається $\max_t SU_t^j$, – це індекс t , де досягається $\max_t WU_t^j$. Аналогічно нехай індекс t , де досягається $\min_t SU_t^j$, – це індекс, де досягається $\min_t WU_t^j$.

Крок 4. Якщо $S = \sum_{j=1}^{99} TSU_{2016}^j > 100$, то визначаємо $T = T - 1$ та обчислюємо

$$TSU_{2016}^T = \min_t SU_t^T.$$

Крок 5. Якщо $S = \sum_{j=1}^{99} TSU_{2016}^j > 100$, то переходимо на крок 4, а в іншому випадку зупиняємося.

Враховуючи дані табл. 1.1 і 1.2 [86] для значень E_t^k світового експорту (млрд. дол.), дані табл. 3.1 і 3.2 [86] для часток WU_t^k (у міліпроцентах) експорту України від світового, даний алгоритм знаходить цільовий загальний експорт України

$$U_{2016}^0 = \sum_{j=1}^{20} E_{2016}^j \times \max_t WU_t^j + \sum_{j=21}^{99} E_{2016}^j \times \min_t WU_t^j = 46697 \quad \text{млн. дол.,} \quad \text{що на}$$

$$\frac{46697 - 37825}{37825} = 23.46\% \text{ перевищує її спостережуваний у 2016 р. експорт. Для}$$

$j=1, 2, \dots, 20$ у табл. 3.2.1 виділено жирним значення SU_t^k , які відповідають $\max_t SU_t^j$.

Досягнення цільового експорту України дозволило би збільшити її ВВП на $46.697 - 37.825 = 8.872$ млрд. дол., або на $\frac{8.872}{93.263} = 9.51\%$ відносно рівня ВВП 93.263 млрд. дол. на 2016 р. за даними World Economic Outlook МВФ. Враховуючи іншу оцінку можливого зростання ВВП України [86], а також вищезазначену оцінку

Посла Кореї в Україні, зростання ВВП України з темпом 10% є реалістичним, доцільним і бажаним.

Отже, розрахунки за табл. 3.1.1 і 3.2.1 свідчать, що серед усіх 99 товарних груп можна виділити 20 груп, пріоритетних для України:

85 (електричні машини, обладнання та їх частини; апаратура для запису або відтворення звуку; телевізійна апаратура для запису та відтворення зображення і звуку, їх частини та приладдя);

84 (реактори ядерні, котли, машини, обладнання і механічні пристрої; їх частини);

27 (палива мінеральні; нафта і продукти її перегонки; бітумінозні речовини; воски мінеральні);

87 (засоби наземного транспорту, крім залізничного або трамвайного рухомого складу, їх частини та обладнання);

71 (перли природні або культивовані, дорогоцінне або напівдорогоцінне каміння, дорогоцінні метали, метали, плаковані дорогоцінними металами, та вироби з них; біжутерія; монети);

39 (пластмаси, полімерні матеріали та вироби з них);

90 (прилади та апарати оптичні, фотографічні, кінематографічні, контрольні, вимірювальні, прецизійні; медичні або хірургічні; їх частини та приладдя);

30 (фармацевтична продукція);

99 (товари, не вказані деінде);

29 (органічні хімічні сполуки);

88 (літальні апарати, космічні апарати та їх частини);

72 (чорні метали);

73 (вироби з чорних металів);

94 (меблі; постільні речі, матраци, матрацні основи, диванні подушки та аналогічні набивні речі меблів, світильники та освітлювальні прилади, в іншому місці не зазначені; світлові покажчики, табло та подібні вироби; збірні будівельні конструкції);

- 61 (одяг та додаткові речі до одягу, трикотажні);
- 62 (одяг та додаткові речі до одягу, текстильні, крім трикотажних);
- 38 (різноманітна хімічна продукція);
- 40 каучук, гума та вироби з них);
- 26 (руди, шлак і зола);
- 76 (алюміній і вироби з нього).

Серед 20 вищезазначених пріоритетних груп тільки 5 характеризуються тим, що їхня максимальна по t частка $\frac{U_t^j}{U_t^0}$ у загальному експорті України перевищує середньосвітову частку A^j , – це групи 72, 73, 62, 26, 76. Серед останніх лише світовий експорт групи 72 має високу волатильність, позаяк високу волатильність мають також провідні світові експортні групи 85, 84, 27, 87, 71, 99. Така волатильність підтверджує фінансові співвідношення між ризиком і віддачею [194]. Це спостереження дає підстави стверджувати про потреби підготовки кадрів України, здатних успішно працювати на світових ринках в умовах ризику й невизначеності, впроваджувати інновації, вести дослідження і розробки [197]. Важливо зазначити, що решта товарних груп не має достатньо високої волатильності для світу.

Табл. 3.3.1, 3.3.2, 3.3.3 вказують частку SU_m^k (%) експорту U_m^k кожної товарної групи $k=1, \dots, 99$ у загальному експорті U_m^0 Одещини за роками $t=2006, \dots, 2016$ [198–201], виходячи з табл. 4 [86]. Наближене значення такої частки визначається як $ASU_n^k = \max_t SU_m^k$.

Тоді сума цих наближених часток дорівнює $S_n = \sum_{k=1}^{99} ASU_n^k$.

Беручи до уваги природне обмеження $\sum_{k=1}^{99} SU_m^k = 100$, $t = 2006, \dots, 2016$,

аналогічного обмеження слід очікувати для цільових часток товарних груп у

загальному експорті Одещини: $\sum_{k=1}^{99} TSU_m^k = 100$ %, або 1.

Загальний експорт Одещини за рік t дорівнює

$$U_m^0 = \sum_{k=1}^{99} U_m^k = \sum_{k=1}^{99} SU_m^k \times U_m^0 = U_m^0 \sum_{k=1}^{99} SU_m^k .$$

З іншого боку, $U_m^k = WU_{kn}^t \times E_k^t = WU_m^k \times (SW_t^k \times E_t^0)$, де E_t^k – світовий експорт товарної групи k за рік t (табл. 1.1. і 1.2 [86]), WU_m^k – частка експорту Одещини від світового у цій групі (табл. 3.1 і 3.2 [86]). Звідси

$$U_m^0 \sum_{k=1}^{99} TSU_m^k = U_m^0 = \sum_{k=1}^{99} U_m^k = E_t^0 \sum_{k=1}^{99} WU_m^k \times SW_t^k .$$

Якщо ціль – максимізація загального експорту Одещини станом на 2016 р., то при заданих значеннях SW_{2016}^k для пошуку цільових досяжних значень TSU_{2016n}^k можна запропонувати алгоритм, який складається з наступних кроків.

Крок 1. Перенумеруємо всі товарні групи $k=1, \dots, 99$ у такому порядку $j=1, \dots, 98$, що $SW_{2016}^j > SW_{2016}^{j+1}$.

Крок 2. Визначаємо $T = 100$.

Крок 3. Обираємо початкове наближення

$$TSU_{2016n}^j = ASU_n^j = \max_t SU_m^j, \quad j=1, \dots, 99.$$

Крок 4. Якщо $S_n = \sum_{j=1}^{99} TSU_{2016n}^j > 100$, то визначаємо $T = T - 1$ та обчислюємо

$$TSU_{2016n}^T = \min_t SU_m^T .$$

Для простоти вважаємо, що індекс t , де досягається $\max_t SU_m^j$, – це індекс t , де досягається $\max_t WU_m^j$. Аналогічно нехай індекс t , де досягається $\min_t SU_m^j$, – це індекс, де досягається $\min_t WU_m^j$.

Крок 5. Якщо $\Delta_n = \sum_{j=1}^{99} TSU_{2016n}^j - 100 > 0$, то переходимо на крок 4, а в іншому

випадку переходимо на крок 5.

Крок 6. Визначаємо $TSU_{2016n}^T = ASU_n^T - \Delta_n$ і зупиняємося.

Враховуючи дані табл. 1.1 і 1.2 [86] для значень E_t^k світового експорту (млрд. дол.), дані табл. 5 [86] для часток WU_m^k експорту Одещини від світового (у мікропроцентах), алгоритм з кроків 1–6 знаходить величину цільового загального експорту Одещини

$$U_{2016n}^0 = \sum_{j=1}^{29} E_{2016}^j \times \max_t WU_m^j + \sum_{j=31}^{99} E_{2016}^j \times \min_t WU_m^j + E_{2016}^{30} (\max_t WU_m^{30} - \Delta_n) =$$

$$= 1352 \text{ млн. дол.}, \text{ який на } \frac{1520 - 1352}{1520} = 11.07 \% \text{ менший її спостережуваного у}$$

2016 р. експорту. Для $j = 1, 2, \dots, 30$ у табл. 3.3.1 виділено жирним значення SU_m^k , які відповідають $\max_t SU_m^j$.

Отже, серед усіх 99 товарних груп можна виділити 30, пріоритетних для Одещини, – це 20 вищевказаних груп, для України, а також 9 таких груп:

48 (папір і картон; вироби з паперової маси, паперу або картону);

64 (головні убори та їх частини);

44 (деревина і вироби з деревини; деревне вугілля);

89 (судна, човни та інші плавучі засоби);

74 (мідь і вироби з неї);

33 (ефірні олії та резиноїди; парфумерні, косметичні та туалетні препарати);

2 (м'ясо та їстівні субпродукти);

Таблиця 3.3.1 Частка SU_{tn}^k (%) товарної групи $k=1, \dots, 99$ у загальному експорті Одещини за роками $t=2006, \dots, 2016$, її наближене ASU_n^k та цільове TSU_n^k значення

k/t	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	ASU_n^k	TSU_n^k
85	3.88	3.65	1.71	1.30	2.02	2.54	3.27	2.83	2.30	2.37	2.70	3.88	3.88
84	5.29	4.34	2.96	1.85	2.00	3.34	2.48	2.68	1.50	1.14	1.47	5.29	5.29
27	0.42	1.87	33.68	28.70	27.65	1.18	6.21	7.63	7.18	0.08	0.11	33.68	33.68
87	0.35	0.59	0.23	0.09	0.03	0.15	0.16	0.17	0.12	0.03	0.04	0.59	0.59
71													
39	0.47	0.63	0.28	0.24	0.32	0.60	0.64	0.67	0.44	0.32	0.34	0.67	0.67
90	0.96	0.85	0.44	0.44	0.42	0.51	0.46	0.43	0.40	0.33	0.37	0.96	0.96
30	0.72	0.64	0.21	0.33	0.34	0.23	0.32	0.16	0.09	0.08	0.09	0.72	0.72
99	0.10	0.01	0.13									0.13	0.13
29	0.10	0.16	0.08	0.19	0.22	0.14	0.02	0.01	0.04	0.16	0.31	0.31	0.31
88	0.83	1.07	0.20	0.19	0.07	0.02	0.40	0.38				1.07	1.07
72	6.87	6.58	4.64	2.54	2.85	3.98	2.16	2.07	2.85	2.36	1.29	6.87	6.87
73	3.28	3.00	1.49	0.62	0.70	2.08	1.95	2.38	1.36	0.84	0.90	3.28	3.28
94	0.08	0.08	0.03	0.06	0.06	0.07	0.06	0.13	0.19	0.07	0.05	0.19	0.19
61	0.03	0.04	0.04	0.07	0.07	0.08	0.12	0.13	0.07	0.03	0.05	0.13	0.13
62	1.15	0.50	0.24	0.27	0.26	0.49	0.33	0.36	0.39	0.30	0.36	1.15	1.15
38	0.04	0.55	0.36	0.45	0.53	0.55	0.13	0.07	0.05	0.07	0.05	0.55	0.55
40	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.05	0.06	0.03	0.01	0.03	0.06	0.06
26	0.07	0.06	0.00									0.07	0.07
76	0.20	0.46	0.10	0.00	0.01	0.03	0.02	0.03	0.11	0.20	0.30	0.46	0.46
48	0.31	0.31	0.18	0.27	0.27	0.39	0.39	0.53	0.42	0.33	0.30	0.53	0.53
64	0.07	0.08	0.08	0.16	0.21	0.35	0.37	0.43	0.38	0.40	0.45	0.45	0.45
44	0.94	0.65	0.29	0.32	0.26	0.50	0.31	0.37	0.40	0.74	0.89	0.94	0.94
89	0.71	0.58	0.59	1.00	0.72	0.07	5.32	0.27	0.12	0.48	0.29	5.32	5.32
74	3.27	2.48	0.75	1.03	1.60	3.20	1.11	0.13	0.03	0.02	0.00	3.27	3.27
33	0.39	0.24	0.07	0.18	0.17	0.17	0.12	0.11	0.11	0.06	0.02	0.39	0.39
2													
3	0.48	0.22	0.00	0.97	0.45	0.01	0.00	0.04	0.00	0.01	0.05	0.97	0.97
8	0.85	0.48	0.96	2.28	1.41	4.60	1.03	0.34	0.51	0.64	1.80	4.60	4.60
22	5.78	5.61	1.79	2.81	2.44	2.05	2.45	3.53	2.41	2.33	1.34	5.78	3.66
28	20.69	15.08	11.94	3.22	12.01	18.97	15.24	20.35	14.43	14.55	2.65	20.69	2.65
10	4.03	1.63	3.09	9.95	6.92	7.07	8.87	15.82	20.97	26.15	33.02	33.02	1.63
95	0.18	0.21	0.13	0.18	0.15	0.21	0.19	0.25	0.15	0.10	0.18	0.25	0.10
12	1.47	2.32	1.64	5.03	4.50	5.96	5.45	7.91	11.37	10.00	9.75	11.37	1.47
15	2.82	14.26	9.53	10.44	11.37	9.38	10.65	6.73	11.32	12.29	21.01	21.01	2.82
32	0.31	0.37	0.22	0.19	0.26	0.16	0.07	0.05	0.06	0.05	0.07	0.37	0.05
42	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01				0.01	0.00
4	0.08	0.16	0.08	0.22	0.09	0.11	0.12	0.54	0.44	0.44	0.41	0.54	0.08
7	0.52	0.56	0.42	2.49	0.74	1.09	1.09	1.23	1.79	1.58	2.25	2.49	0.42
70	0.16	0.25	0.30	0.14	0.01	0.04	0.06	0.07	0.08	0.07	0.10	0.30	0.01

3 (риба і ракоподібні, молюски та інші водяні безхребетні);

8 (їстівні плоди та горіхи; шкірки цитрусових або динь);

Серед таких 29 груп для 5 груп (71, 99, 88, 26, 2) значення експорту Одещини не вимірювалися у 2016 р. Очевидно, ці 5 груп є пріоритетними для Одещини.

Таблиця 3.3.3 Частка SU_{tn}^k (%) товарної групи $k=1, \dots, 99$ у загальному експорті Одещини за роками $t=2006, \dots, 2016$, її наближене ASU_n^k та цільове TSU_n^k значення

k/t	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	ASU_n^k	TSU_n^k
65	0.00	0.00	0.00									0.00	0.00
5													
43													
67													
13													
78													
92													
80													
53													
36	0.01	0.01	0.03	0.01	0.01							0.03	0.01
66													
46	0.00	0.00	0.00									0.00	0.00
50													
45													
14	0.19	0.12	0.06	0.07	0.04	0.05	0.03	0.26	0.72	1.17	0.86	1.17	0.03
S_n												213	100

Серед таких 29 груп лише 7 груп характеризуються тим, що $AS_n^k > A^k$ (максимальна частка групи в експорті Одещини перевищує середнє значення частки світового експорту групи у загальному світовому експорті), – це групи 27, 72, 44, 89, 74, 3, 8. У цьому сенсі лише група 72 є спільною для Одещини й України в цілому. Тому першочерговим завданням експорту Одещини є наближення до усередненої структури товарного експорту України.

Для України та Одещини серед 99 товарних груп, класифікованих за Гармонізованою Системою, можна виділити 14 пріоритетних:

85 (електричні машини, обладнання та їх частини; апаратура для запису або відтворення звуку; телевізійна апаратура для запису та відтворення зображення і звуку, їх частини та приладдя);

84 (реактори ядерні, котли, машини, обладнання і механічні пристрої; їх частини);

87 (засоби наземного транспорту, крім залізничного або трамвайного рухомого складу, їх частини та обладнання);

71 (перли природні або культивовані, дорогоцінне або напівдорогоцінне каміння, дорогоцінні метали, метали, плаковані дорогоцінними металами, та вироби з них; біжутерія; монети);

39 (пластмаси, полімерні матеріали та вироби з них);

90 (прилади та апарати оптичні, фотографічні, кінематографічні, контрольні, вимірювальні, прецизійні; медичні або хірургічні; їх частини та приладдя);

30 (фармацевтична продукція);

99 (товари, не вказані деінде);

29 (органічні хімічні сполуки);

88 (літальні апарати, космічні апарати та їх частини);

94 (меблі; постільні речі, матраци, матрацні основи, диванні подушки та аналогічні набивні речі меблів, світильники та освітлювальні прилади, в іншому місці не зазначені; світлові покажчики, табло та подібні вироби; збірні будівельні конструкції);

61 (одяг та додаткові речі до одягу, трикотажні);

38 (різноманітна хімічна продукція);

40 каучук, гума та вироби з них).

При цьому Одещина потребує суттєвого відновлення виробництва за групами 71, 99, 88, що вимагатиме міждисциплінарних зусиль, підготовки кадрів, інфраструктури, належного здійснення державних функцій [202].

Реалізація максимальних досяжних часток цих груп у загальному експорті України забезпечує її очікуване економічне зростання на рівні близько 10 %.

Досягнення кращої експортної структури, визначеної в результаті аналізу даних (data-driven analysis), можливе лише при відповідних інвестиціях у модернізацію виробничих фондів та у професійний розвиток людського капіталу, що передбачає поліпшення рейтингів Doing Business. Саме інноваційний підхід на всіх рівнях економічної діяльності розглядається провідними країнами світу як фактор успішного майбутнього.

Розроблено алгоритм динамічного розрахунку цільової досяжної структури товарного експорту. Знайдено таку структуру для України та Одещини на даних 2006–2016 рр. Незважаючи на більшу диверсифікацію, ця структура для Одещини дає гірший результат, ніж для України в цілому. Більшому експорту відповідає спеціалізація на провідних групах світового експорту. Ці групи характеризуються вищими ризиками.

РОЗДІЛ 4. АЛГОРИТМИ ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА ЦІЛЬОВОЇ СТРУКТУРИ ЕКСПОРТУ РЕГІОНІВ УКРАЇНИ ТА ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ

4.1 Динаміка індексів виявленої порівняльної переваги Луганщини за групами товарів у 2011–2016 роках

За даними Міжнародного центру торгівлі (International Trade Centre), світовий експорт істотно знижується за основними групами товарів (відповідно до класифікації Гармонізованої системи), починаючи з 2014 р., за винятком груп 88, 8, 95, 7 (табл. 4.1). У табл. 4.1 жирним виділено максимальні значення світового експорту (у номінальних дол.) за цими групами: за групами 27, 71, 29, 72, 99, 40, 26, 48, 89, 74, 22, 28, 10, 12, 15, 70 максимальний експорт спостерігався до 2014 р. Факт, що за переважною більшістю товарних груп максимум експорту спостерігався у 2014 р., висуває гіпотезу про негативний вплив подій у Криму, на Донеччині і Луганщині на світову торгівлю товарами, загальний обсяг якої у 2016 р. став меншим рівня кризового 2008 р. У табл. 4.1 зміна (%) означає збільшення (номінального) експорту, починаючи від 2006 р., до року досягнення максимуму не раніше 2014 р., а також зменшення експорту до 2016 р., починаючи від року досягнення максимуму.

За даними оприлюднених публікацій Державної служби статистики України, для Луганщини можна побудувати табл. 4.2, що відповідає табл. 4.1. Користуючись відповідністю між табл. 4.1 і табл. 4.2, для Луганщини можна обчислити модифіковані індекси Баласса виявленої порівняльної експортної переваги як відношення (%) частки експорту групи товарів у загальному експорті Луганщини до аналогічної частки світу.

Таблиця 4.1. Світовий експорт (млрд. дол.) за основними групами товарів

Група/Рік	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	Зміна (%)
Усього	11953	13778	15973	12317	15065	18073	18459	18957	18970	16508	15862	159
85	1634	1807	1918	1604	1962	2132	2195	2336	2404	2336	2330	147
84	1575	1792	1947	1509	1795	2059	2082	2102	2160	1939	1893	137
27	1740	1910	2828	1765	2329	3243	3394	3291	3048	1828	1535	45
87	1008	1183	1240	848	1085	1274	1309	1355	1396	1325	1346	139
71	244	292	370	325	439	634	778	864	720	633	638	74
39	386	446	479	391	484	564	570	604	622	554	546	161
90	372	397	440	396	476	530	555	564	575	543	536	155
30	288	342	399	420	444	459	470	491	517	499	506	179
29	298	343	368	306	369	439	447	452	435	371	351	78
88	174	184	211	213	222	250	287	313	322	332	329	191
72	329	423	520	275	387	477	428	398	414	328	302	58
99	256	394	409	256	305	313	303	325	370	400	264	65
73	209	256	308	227	247	301	306	312	319	281	259	153
94	138	162	177	146	167	191	211	229	244	239	233	177
61	145	172	178	159	179	209	212	232	240	222	218	166
62	158	170	182	157	169	199	193	208	234	220	217	148
38	107	125	154	128	152	183	178	185	192	170	172	180
40	119	139	157	124	169	231	222	208	194	168	163	70
26	96	121	144	117	193	258	237	249	234	159	160	62
76	138	157	164	113	147	174	161	166	176	166	159	128
48	148	166	179	153	170	189	168	173	175	157	154	81
64	74	83	92	82	97	114	118	129	142	134	134	193
44	111	124	118	91	106	120	119	132	140	125	128	126
89	92	107	148	147	173	192	158	147	139	136	124	65
74	136	150	148	106	159	185	174	166	156	130	119	64
33	66	77	87	79	89	103	105	113	118	111	116	179
2	68	79	98	88	97	117	118	125	132	114	114	194
3	63	67	72	70	82	96	96	105	113	102	110	179
8	53	61	71	67	76	87	91	100	105	104	109	206
22	68	81	91	80	87	104	108	114	114	105	106	94
28	82	96	128	85	115	140	130	126	122	111	100	71
95	69	84	98	82	84	92	92	91	95	96	97	141
10	50	72	105	78	85	117	120	123	120	103	95	77
12	32	43	64	59	68	82	94	101	100	88	89	89
15	45	61	90	66	81	111	107	99	97	86	87	79
32	57	64	68	58	70	81	80	82	84	74	74	146
42	39	44	50	43	52	66	69	75	77	75	73	198
4	47	61	72	59	70	84	82	94	98	75	73	206
7	38	45	49	49	56	62	59	66	67	66	70	182
70	53	60	65	54	63	72	72	75	74	68	69	92
23	32	40	53	51	56	65	73	82	83	72	69	257
19	33	39	47	45	48	56	58	65	68	63	66	206
21	33	39	45	44	47	55	57	63	67	62	65	201

Таблиця 4.2. Експорт (тис.дол.) Луганщини за групами, індекс Баласса (%)

Група/Рік	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Усього	6505025	4192709	3543581	1902640	257772	435547	Індекс Баласса					
85	26913	30620	26041	13241	369	263	4	6	6	5	1	0
84	114613	97079	87222	37930	4907	1209	15	21	22	18	16	2
27	3027295	903562	346998	208034	6062	13583	259	117	56	68	21	32
87	3499	2113	4542	1151	296	245	1	1	2	1	1	1
71	8433	11364					4	6	0	0	0	0
39	144731	85680	70551	37459	2699	2755	71	66	63	60	31	18
90	10204	2638	5173	6223	2554	463	5	2	5	11	30	3
30	5227	5779	6449	3092	1353	1233	3	5	7	6	17	9
29	164767	115582	84286	43521	6298	12229	104	114	100	100	109	127
88	85	2081					0	3	0	0	0	0
72	1465458	1455501	1602233	954224	135404	302907	854	1498	2155	2301	2647	3656
99							0	0	0	0	0	0
73	85575	68829	46374	15997	1808	34	79	99	79	50	41	0
94	1714	2050	1750	1284	664	343	2	4	4	5	18	5
61	29763	40315	50234	24660	305	587	40	84	116	102	9	10
62	22727	16322	17592	12334	7464	10419	32	37	45	53	217	175
38	7940	10735	8975	7503	5391	5321	12	27	26	39	203	112
40	2560	2727	2681	1216	392	352	3	5	7	6	15	8
26	258	234				2	0	0	0	0	0	0
76	34136	34819	34814	483	476	540	55	95	112	3	18	12
48	72908	83543	96604	67249	55972	49626	107	219	299	384	2283	1174
64							0	0	0	0	0	0
44	587	471	358	304	201		1	2	1	2	10	0
89							0	0	0	0	0	0
74							0	0	0	0	0	0
33							0	0	0	0	0	0
2							0	0	0	0	0	0
3							0	0	0	0	0	0
8						949	0	0	0	0	0	32
22	151	238					0	1	0	0	0	0
28	150058	125655	131676	18162	614	272	298	427	559	149	36	10
95	1328	1301	1429	752	186	175	4	6	8	8	12	7
10			6891	1064	4659	5606	0	0	30	9	289	215
12	3399	1378	1306	3553	2104	18	12	6	7	35	154	1
15	21126	10077	6533	4332	1208		53	42	35	45	90	0
32	1677	2483				0	6	14	0	0	0	0
42							0	0	0	0	0	0
4				15	1090		0	0	0	0	93	0
7	150	185					1	1	0	0	0	0
70	43956	32480	7742	4339	2883	3266	170	199	55	58	271	173
23	10633	14036	14497	2960	2413	6673	46	85	95	36	215	354
19	2102	4271	5319	944	105	52	10	32	44	14	11	3
21	53	75	76	349	635		0	1	1	5	65	0

Один з висновків для Луганщини станом на 2017 р. не відрізняється від висновку станом на 2011 р.: для Луганщини є перспективним розпочати виробництво за товарними групами 64 (взуття, гетри та аналогічні вироби; їх частини), 74 (мідь і вироби з неї), 33 (ефірні олії та резиноїди; парфумерні, косметичні та туалетні препарати), 2 (м'ясо та інші їстівні субпродукти), 3 (риба і ракоподібні; молюски та інші водяні безхребетні), 42 (вироби із шкіри; шорно-сідельні вироби та упряж; дорожні речі; сумки та аналогічні товари. Важливі види діяльності завжди пов'язані з втіленням державних функцій оборони, законності і правопорядку, макроекономічного менеджменту, захисту прав власності.

4.2 Поквартальне оцінювання економічної ефективності й цільової структури експорту Луганщини

На даних 2017–2018 рр., коли оприлюднювалися капітальні інвестиції районів України, визначено два кластери – виробничі лідери Луганщини. Один з кластерів включає всі вищі навчальні заклади Луганщини, крім закладів Сєверодонецька і Лисичанська, де заробітна плата вища середньої по районах області. Інший кластер є прикордонним. Після генерації обчислювальних даних знайдено оцінки параметрів функцій Кобба–Дугласа та залишки регресії для шести кварталів 2017–2018 рр. Для сучасної Луганщини виробничий фактор праці є значно важливішим, ніж фактор капіталу, що підкреслює роль людського капіталу та нематеріальних активів. Висновки з експорту для Луганщини станом на 2017 р. не відрізняються від висновку станом на 2011 р.: є перспективним розпочати експорт за товарними групами взуття, виробів із шкіри, ефірних олій, м'яса, риби, плавзасобів. Стійке економічне зростання України є актуальною, соціально та економічно значимою метою, що вимагає міждисциплінарних зусиль, насамперед, засобами інформаційної ери.

Перевага запропонованої розробки перед іншими полягає у динамічній високотехнологічній обробці великих обсягів нових оперативних даних, які систематично надходять з надійних джерел, та у відсутності обмежень, потрібних для застосування інших методів оцінювання. Подібна технологія обробки даних була успішно застосована різними групами авторів для районів різних регіонів України – Миколаївщини [97], Тернопільщини [98], Запоріжчини [93], Київщини [72], Одещини [94], Кіровоградщини [92] та інших. Для Луганщини оброблялися дані міжнародної торгівлі [29] і проводився аналіз розвитку транспортних технологій з погляду міжнародної конкуренції [203].

За допомогою технології [72, 92, 93, 94, 97, 98] можна оцінювати шляхи економічного зростання будь-якого регіону, що складається з різних районів.

Оцінимо сумарне економічне зростання районів Луганщини. Луганщина складається з 18 районів і 14 міст обласного значення, але статистичні спостереження мають 12 районів і 3 міста [204–209], оскільки 6 районів і 11 міст залишаються тимчасово окупованими з 2014 р. Для зростання експорту і виробництва Луганщини потрібно планомірно розраховувати співвідношення виробничих факторів.

За майже два роки від першого кварталу 2017 р. (2017:I) до 2018:III найбільше заробітна плата зросла у Марківському районі (на 62%), а найменше – у Сватівському районі (на 27%) (табл. 4.3). Поквартальні значення капітальних інвестицій у районах теж виявляли істотні коливання (табл. 4.4). За загальною фінансово-економічною теорією, вищі мінливості й ризики супроводжуються вищими віддачами. Про це зазначав видатний британський профспілковий діяч Томас Даннінг (Thomas Dunning, 1799–1873): «Капітал уникає розголосу і чвари, вирізняючись полохливою натурою; це правда, але не вся правда. Капітал цурається неприбутковості чи дуже малої прибутковості, як Природа не терпить порожнечі [за Аристотелем (384–322 до н.е.)]. При адекватному прибутку капітал дуже сміливий. Гарантування 10 відсотків забезпечуватиме присутність капіталу

скрізь; 20 відсотків надаватиме йому жвавність; 50 відсотків виявлятиме його позитивну зухвалість; при 100 відсотках капітал готовий зневажати всі людські закони; при 300 відсотках немає ні злочину, який би капітал не замишляв, ні ризику, на який би капітал не пішов, незважаючи не примарність шансів його власника. Якщо розголос і чвара приносить прибуток, то капітал заохочуватиме і те, і інше. Контрабанда й работоргівля розлого доводять все вищенаведене» [210]. На ці тези посилався відомий німецький економіст Карл Маркс (Karl Marx, 1818–1883).

Таблиця 4.3. Середньомісячна нарахована заробітна плата (wage) W_t (грн..) штатних працівників й обсяг праці (labor) $L_t = 3W_t$ (грн.) в кварталі t [204–209]

Район / Період	Середньомісячна зарплата W_t						Обсяг праці L_t					
	2017:I	2017:II	2017:III	2018:I	2018:II	2018:III	2017:I	2017:II	2017:III	2018:I	2018:II	2018:III
м.Лисичанськ	5346	6094	5850	6460	6871	6839	16038	18282	17550	19380	20613	20517
м.Рубіжне	6422	6900	7081	7134	8381	8628	19266	20700	21243	21402	25143	25884
м.Севєродонецьк	6437	7093	7676	8025	8960	9495	19311	21279	23028	24075	26880	28485
Біловодський	4005	4540	5094	5043	5934	5904	12015	13620	15282	15129	17802	17712
Білокуракинський	4336	5206	5841	5144	6362	6371	13008	15618	17523	15432	19086	19113
Кремінський	4334	4839	4998	5419	5911	6368	13002	14517	14994	16257	17733	19104
Марківський	4192	4754	5167	5455	6304	6783	12576	14262	15501	16365	18912	20349
Міловський	4325	4844	4637	5380	6483	6706	12975	14532	13911	16140	19449	20118
Новоайдарський	5618	6235	6618	6914	7739	8150	16854	18705	19854	20742	23217	24450
Новопсковський	4197	4574	5155	5052	5766	6016	12591	13722	15465	15156	17298	18048
Попаснянський	5521	5970	6250	7267	7530	7887	16563	17910	18750	21801	22590	23661
Сватівський	4891	5210	5593	5421	5985	6236	14673	15630	16779	16263	17955	18708
Станично-Луганський	4334	4719	4981	5645	6775	6554	13002	14157	14943	16935	20325	19662
Старобільський	4591	5404	5357	5679	6658	6596	13773	16212	16071	17037	19974	19788
Троїцький	4615	5720	5714	5449	6639	6955	13845	17160	17142	16347	19917	20865

За фактичної відсутності саморегуляції обсягів виробничих факторів через сучасні фінансові ринки та інструменти, виникають питання обґрунтованості змін

таких факторів. Для відповіді на ці питання треба враховувати виробництво сфери послуг (табл. 4.5) і промисловості (табл. 4.6).

Таблиця 4.4. Освоєно (використано) капітальних інвестицій $C_u = \sum_{t=I}^u C_t$ (тис.грн.) за період

2017_ u перших $u = I, II, III, IV$ кварталів року [204–209] й обсяг C_t (тис.грн.) капітальних інвестицій за квартал t

Район/Період	Освоєно інвестицій C_u за період					Капітальні інвестиції C_t			
	2017:I	2017_II	2017_III	2018:I	2018_III	2017:II	2017:III	2018:II	2018:III
Луганщина	541413	1054959	1782701	365187	1770544	513546	727742	618240	787117
м.Лисичанськ	23654	54944	79854	29779	85707	31290	24910	18493	37435
м.Рубіжне	13511	56648	107494	34301	206788	43137	50846	80104	92383
м.Сєверодонецьк	195488	338223	583305	108449	504651	142735	245082	176907	219295
Біловодський	6641	25871	52523	7875	63655	19230	26652	29269	26511
Білокуракинський	12194	36626	60807	6521	43921	24432	24181	10895	26505
Кремінський	36726	71446	121222	24097	134861	34720	49776	45269	65495
Марківський	17975	26889	46294	14899	50190	8914	19405	14896	20395
Міловський	13833	19838	40282	15124	39579	6005	20444	11247	13208
Новоайдарський	18479	45754	65515	6969	67782	27275	19761	28515	32298
Новопсковський	25914	39204	72136	17410	60474	13290	32932	19192	23872
Попаснянський	24006	49702	83855	17657	111400	25696	34153	33738	60005
Сватівський	44592	89108	132601	18634	95140	44516	43493	35668	40838
Станично-Луганський	13587	29749	66710	14643	77940	16162	36961	29541	33756
Старобільський	49826	102936	170692	16420	98774	53110	67756	30184	52170
Троїцький	44987	68021	96569	32409	124899	23034	28548	54322	38168

У табл. 4.4 обчислено і курсивом виділено квартальні оцінки C_t для Міловського району (при $t = 2017:I, 2017:II$). У табл. 4.6 обчислено і курсивом виділено квартальні оцінки I_t для Білокуракинського, Міловського, Новопсковського районів, оскільки для них дані I_u не оприлюднювалися з метою забезпечення виконання вимог Закону України «Про державну статистику» щодо конфіденційності статистичної інформації.

Таблиця 4.5. Чисельність N_t (осіб) наявного населення на кінець кварталу t й обсяг S_t (тис.грн.) реалізованих нефінансових послуг в кварталі t

Район / Період	Наявне населення N_t						Обсяг S_t нефінансових послуг				
	2017:I	2017:II	2017:III	2018:I	2018:II	2018:III	2017:I	2017:II	2017:III	2018:I	2018:III
м.Луганськ	439189	434143	433535	432215	431428	430601					
м.Алчевськ	109175	108264	108146	107932	107788	107602					
м.Антрацит	76422	75893	75821	75682	75594	75526					
м.Брянка	52032	51734	51695	51547	51474	51430					
м.Голубівка	32889	32661	32619	32530	32474	32414					
м.Довжанськ	96807	96098	96045	95965	95879	95791					
м.Кадіївка	89563	88985	88880	88637	88506	88363					
м.Лисичанськ	114114	113374	112945	112270	112043	111688	38643	43970	47184	48911	52306
м.Первомайськ	37582	37200	37139	37021	36952	36879					
м.Ровеньки	82512	81921	81849	81725	81640	81566					
м.Рубіжне	58381	58006	57883	57642	57506	57411	20111	23258	21328	27607	29860
м.Севєродонецьк	116059	115245	114783	114491	114148	113905	588731	694616	632743	620005	799322
м.Сорокине	102346	101714	101653	101487	101379	101247					
м.Хрустальний	121399	120618	120511	120319	120193	120037					
Антрацитівський	30375	30279	30260	30209	30173	30152					
Біловодський	23672	23549	23440	23318	23276	23197	1267	1307	1272	3619	3086
Білокуракинський	19115	19002	18951	18835	18783	18697	2591	1724	2114	1766	2179
Довжанський	11754	11738	11724	11710	11702	11698					
Кремінський	39607	39387	39246	38935	38795	38632	26401	16333	34749	19666	61090
Лутугинський	66317	65842	65787	65670	65588	65498					
Марківський	14931	14826	14730	14629	14574	14513	858	1176	961	1062	1004
Міловський	15226	15175	15142	15090	15053	15004	419	615	555	493	538
Новоайдарський	41238	41028	40875	40630	40519	40411	1255	1140	1938	1382	1777
Новопсковський	34184	34005	33883	33801	33747	33647	5088	7933	14176	5965	14994
Перевальський	64089	63757	63706	63570	63514	63435					
Попаснянський	77258	76753	76480	75920	75662	75401	7024	8048	8277	10145	9317
Сватівський	35146	34801	34591	34288	34136	34002	27028	25346	32575	23655	31385
Слов'яносербський	48975	48713	48664	48574	48519	48438					
Сорокинський	29249	29163	29147	29112	29093	29068					
Станично-Луганський	48353	48066	47949	47624	47489	47344	1054	2072	2121	1667	1753
Старобільський	44255	43987	43824	43561	43428	43230	42424	20705	43307	39089	43219
Троїцький	19869	19739	19652	19505	19453	19368	2639	1406	2322	2399	2025

Вищезазначені райони формують ряд районів, для яких, виходячи з даних решти районів (включаючи усереднені оцінки I_t) і агрегованих даних Луганщини, обчислено сумарну чисельність n_t наявного населення, сумарний обсяг I_u реалізованої промислової продукції за період 2017_ u , сумарний обсяг I_t реалізованої промислової продукції за квартал t (табл. 4.6). Для кожного з цих районів визначаються оцінки $I_u = \frac{i_u N_t}{n_t}$, $I_t = \frac{i_t N_t}{n_t}$, виділені курсивом у табл. 4.6.

Кроки побудови табл. 4.3–4.6 називають генерацією первинних даних.

Таблиця 4.6. Обсяг $I_u = \sum_{t=I}^u I_t$ (тис.грн.) реалізованої промислової продукції (товарів, послуг) без ПДВ та акцизу за період 2017_ u перших $u = I, II, III, IV$ кварталів року й обсяг I_t (тис.грн.) реалізованої промислової продукції за квартал t

Район/Період	Обсяг промислової продукції I_u						Обсяг продукції I_t		
	2017:I	2017_II	2017_III	2018:I	2018_III	2017:II	2017:III	2018:II	2018:III
Луганщина	9337969	13282222	17238228	7062411	17096215	3944252	3956006	5144771	4889033
м.Лисичанськ	370470	627257	774937	539888	1109913	256788	147679	276785	293240
м.Рубіжне	1307383	2911556	4492725	1757371	5391109	1604174	1581169	1766838	1866900
м.Севєродонецьк	1694433	2252113	2901719	2187750	3796657	557680	649606	847077	761830
Біловодський	14450	46215	76084	18030	93478	31765	29870	35088	40360
Білокуракинський	<i>990050</i>	<i>1025418</i>	<i>1053213</i>	<i>55723</i>	<i>80567</i>	<i>35368</i>	<i>27795</i>	<i>14298</i>	<i>10546</i>
Кремінський	389233	686393	975246	301099	942118	297160	288852	308135	332884
Марківський	93827	125007	142452	90758	125887	31179	17445	21633	13497
Міловський	<i>788622</i>	<i>818899</i>	<i>841525</i>	<i>44644</i>	<i>64653</i>	<i>30277</i>	<i>22627</i>	<i>11472</i>	<i>8538</i>
Новоайдарський	1345595	2082025	2771186	1015118	2992229	736430	689161	984213	992898
Новопсковський	<i>1770540</i>	<i>1835035</i>	<i>1883067</i>	<i>100000</i>	<i>144988</i>	<i>64495</i>	<i>48033</i>	<i>25805</i>	<i>19183</i>
Попаснянський	294145	462980	845095	653656	1849059	168835	382116	730661	464743
Сватівський	31308	60161	78808	46570	123601	28853	18647	45825	31206
Станично-Луганський	8790	10939	13841	10147	22368	2149	2902	5240	6981
Старобільський	233048	322246	365522	227790	327450	89198	43276	59244	40416
Троїцький	6076	15979	22810	13869	32138	9904	6830	12458	5811

Для генерації обчислювальних даних ефективності слід знайти квартальні значення обсягу $Y_t = \frac{S_t + I_t}{N_t}$ реалізованих нефінансових послуг і реалізованої промислової продукції на душу населення, а також обсягу $K_t = \frac{C_t}{N_t}$ капітальних інвестицій на душу населення (табл. 4.7).

Таблиця 4.7. Обсяг Y_t (грн.) реалізованих нефінансових послуг і реалізованої промислової продукції на душу (наявного) населення, обсяг K_t (грн.) капітальних інвестицій на душу населення за квартал t

Район / Період	Обсяг Y_t на душу населення						Обсяг K_t на душу населення					
	2017:I	2017:II	2017:III	2018:I	2018:II	2018:III	2017:I	2017:II	2017:III	2018:I	2018:II	2018:III
м.Лисичанськ	3585	2653	1725	5244	2941	3094	207	276	221	265	165	335
м.Рубіжне	22738	28056	27685	30967	31170	33038	231	744	878	595	1393	1609
м.Северодонецьк	19672	10866	11172	24524	13290	13706	1684	1239	2135	947	1550	1925
Біловодський	664	1404	1329	928	1670	1873	281	817	1137	338	1257	1143
Білокуракинський	51930	1952	1578	3052	861	681	638	1286	1276	346	580	1418
Кремінський	10494	7959	8245	8238	9001	10198	927	882	1268	619	1167	1695
Марківський	6342	2182	1250	6277	1574	999	1204	601	1317	1018	1022	1405
Міловський	51822	2036	1531	2991	800	605	909	396	1350	1002	747	880
Новоайдарський	32660	17977	16908	25018	24333	24614	448	665	483	172	704	799
Новопсковський	51943	2130	1836	3135	936	1016	758	391	972	515	569	709
Попаснянський	3898	2305	5105	8743	9775	6287	311	335	447	233	446	796
Сватівський	1660	1557	1481	2048	2033	1841	1269	1279	1257	543	1045	1201
Станично-Луганський	204	88	105	248	139	184	281	336	771	307	622	713
Старобільський	6225	2499	1976	6127	1866	1935	1126	1207	1546	377	695	1207
Троїцький	439	573	466	834	687	405	2264	1167	1453	1662	2792	1971

Маючи для кожного кварталу t 15 районних спостережень K_{tj} для обсягу K_t (грн.) капітальних інвестицій на душу населення, 15 районних спостережень L_{tj} для середнього обсягу L_t (грн.) праці штатного працівника, а також 15 районних

спостережень Y_{tj} для обсягу Y_t (грн.) виробництва, $j = 1, \dots, 15$, можна оцінювати значення параметрів a , b , c виробничої функції Кобба–Дугласа $Y_t = (e)^c (K_t)^a (L_t)^b$, де e – основа натуральних логарифмів.

Таблиця 4.8. Значення оцінок параметрів a , b , c функції Кобба–Дугласа $Y_t = (e)^c (K_t)^a (L_t)^b$ та їхніх похибок, залишків R_{tj} регресії, множинного коефіцієнта детермінації R^2 для кварталу t

Район / Період	ln K	ln L	ln Y	R	ln K	ln L	ln Y	R
	2017:I				2017:II			
м.Лисичанськ	5.33	9.68	8.18	-0.50	5.62	9.81	7.88	-0.28
м.Рубіжне	5.44	9.87	10.03	0.77	6.61	9.94	10.24	1.04
м.Севєродонецьк	7.43	9.87	9.89	-0.04	7.12	9.97	9.29	-0.24
Біловодський	5.64	9.39	6.50	-1.44	6.71	9.52	7.25	0.29
Білокуракинський	6.46	9.47	10.86	2.41	7.16	9.66	7.58	-0.29
Кремінський	6.83	9.47	9.26	0.69	6.78	9.58	8.98	1.65
Марківський	7.09	9.44	8.75	0.20	6.40	9.57	7.69	0.59
Міловський	6.81	9.47	10.86	2.30	5.98	9.58	7.62	0.57
Новоайдарський	6.11	9.73	10.39	1.30	6.50	9.84	9.80	1.19
Новопсковський	6.63	9.44	10.86	2.45	5.97	9.53	7.66	0.93
Попаснянський	5.74	9.71	8.27	-0.65	5.81	9.79	7.74	-0.38
Сватівський	7.15	9.59	7.41	-1.61	7.15	9.66	7.35	-0.51
Станично-Луганський	5.64	9.47	5.32	-2.85	5.82	9.56	4.48	-2.37
Старобільський	7.03	9.53	8.74	-0.06	7.10	9.69	7.82	-0.22
Троїцький	7.72	9.54	6.08	-2.96	7.06	9.75	6.35	-1.99
Середнє	6.47	9.58	8.76	0.00	6.52	9.70	7.85	0.00
Параметр	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	R^2	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	R^2
Оцінка	0.33	2.95	-21.60	0.27	0.36	5.44	-47.20	0.61
Похибка	0.66	3.26	32.30		0.58	2.21	21.10	

У табл. 4.8–4.10 наведено оцінки a , b , c параметрів функції лінійної регресії $\ln Y_t = a \ln K_t + b \ln L_t + c$, знайдені за допомогою MS Excel. Якщо в кварталі t для району k має місце $\ln Y_{tk} = a \ln K_{tk} + b \ln L_{tk} + c + R_{tk}$ з додатним залишком (residual) $R_{tk} > 0$, то це означає, що цей район виробляє більший обсяг Y_{tk} продукції на душу населення, ніж це передбачається теоретично, виходячи з даних обсягів факторів виробництва K_{tk} і L_{tk} ; іншими словами, цей район виявляє

економічну ефективність, вищу передбаченої. У табл. 4.8–4.10 жирним виділено значення, вищі відповідного середнього.

Таблиця 4.9. Значення оцінок параметрів a , b , c функції Кобба–Дугласа $Y_t = (e)^c (K_t)^a (L_t)^b$ та їхніх похибок, залишків R_{ij} регресії, множинного коефіцієнта детермінації R^2 для кварталу t

	ln K	ln L	ln Y	R	ln K	ln L	ln Y	R
Район / Період	2017:III				2018:I			
м.Лисичанськ	5.40	9.77	7.45	-0.48	5.58	9.87	8.56	-0.30
м.Рубіжне	6.78	9.96	10.23	1.01	6.39	9.97	10.34	0.76
м.Севєродонецьк	7.67	10.04	9.32	-0.45	6.85	10.09	10.11	-0.27
Біловодський	7.04	9.63	7.19	0.14	5.82	9.62	6.83	-0.50
Білокуракинський	7.15	9.77	7.36	-0.60	5.85	9.64	8.02	0.56
Кремінський	7.15	9.62	9.02	2.09	6.43	9.70	9.02	1.16
Марківський	7.18	9.65	7.13	-0.02	6.93	9.70	8.74	0.79
Міловський	7.21	9.54	7.33	0.90	6.91	9.69	8.00	0.14
Новоайдарський	6.18	9.90	9.74	0.97	5.14	9.94	10.13	0.89
Новопсковський	6.88	9.65	7.52	0.39	6.24	9.63	8.05	0.66
Попаснянський	6.10	9.84	8.54	0.15	5.45	9.99	9.08	-0.51
Сватівський	7.14	9.73	7.30	-0.37	6.30	9.70	7.62	-0.22
Станично-Луганський	6.65	9.61	4.65	-2.25	5.73	9.74	5.51	-2.52
Старобільський	7.34	9.68	7.59	0.20	5.93	9.74	8.72	0.63
Троїцький	7.28	9.75	6.14	-1.67	7.42	9.70	6.73	-1.28
Середнє	6.88	9.74	7.77	0.00	6.20	9.78	8.36	0.00
Параметр	a	b	c	R^2	a	b	c	R^2
Оцінка	0.02	6.59	-56.62	0.66	0.12	6.30	-53.97	0.69
Похибка	0.53	2.20	22.20		0.45	1.91	19.40	

За ефективністю економіки промисловості та сфери послуг (порівнянні дані сільського господарства Держстат не вимірював) стабільними лідерами Луганщини є два кластери: 1) суміжні м. Рубіжне, Кремінський, Новоайдарський райони, а також суміжні Старобільський, Біловодський, Попаснянський райони, де у періоди 2018:II та 2018:III показники поліпшилися; 2) прикордонний Новопсковський район, а також суміжні прикордонні Марківський та Міловський райони (додаток 2, рис. 4.1).

У кластері 1) працює більшість ВНЗ області. У м. Рубіжне працюють 5 ВНЗ (Луганський державний медичний університет, Інститут хімічних технологій Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля,

Первомайський індустріально-педагогічний технікум, Рубіжанський індустріально-педагогічний технікум, Рубіжанський політехнічний технікум імені О.Є. Порай-Кошиця Луганського національного університету імені Тараса Шевченка (Олександр Євгенович Порай-Кошиць (1877–1949) – академік у галузі органічної хімії)). У м. Старобільськ – 5 (Луганський національний аграрний університет, Луганський національний університет імені Тараса Шевченка, його Коледж і Старобільський гуманітарно-педагогічний коледж, Старобільський медичний коледж). В с. Веселе Старобільського району – Старобільський

Таблиця 4.10. Значення оцінок параметрів a , b , c функції Кобба–Дугласа $Y_t = (e)^c (K_t)^a (L_t)^b$ та їхніх похибок, залишків R_{jt} регресії, множинного коефіцієнта детермінації R^2 для кварталу t

	$\ln K$	$\ln L$	$\ln Y$	R	$\ln K$	$\ln L$	$\ln Y$	R
Район / Період	2018:II				2018:III			
м.Лисичанськ	5.11	9.93	7.99	0.16	5.81	9.93	8.04	0.38
м.Рубіжне	7.24	10.13	10.35	0.94	7.38	10.16	10.41	1.03
м.Сєвєродонецьк	7.35	10.20	9.49	-0.39	7.56	10.26	9.53	-0.56
Біловодський	7.14	9.79	7.42	0.44	7.04	9.78	7.54	1.00
Білокуракинський	6.36	9.86	6.76	-0.64	7.26	9.86	6.52	-0.58
Кремінський	7.06	9.78	9.11	2.16	7.44	9.86	9.23	2.14
Марківський	6.93	9.85	7.36	-0.03	7.25	9.92	6.91	-0.66
Міловський	6.62	9.88	6.68	-0.87	6.78	9.91	6.41	-1.09
Новоайдарський	6.56	10.05	10.10	1.31	6.68	10.10	10.11	1.15
Новопсковський	6.34	9.76	6.84	0.13	6.56	9.80	6.92	0.24
Попаснянський	6.10	10.03	9.19	0.63	6.68	10.07	8.75	0.03
Сватівський	6.95	9.80	7.62	0.59	7.09	9.84	7.52	0.57
Станично-Луганський	6.43	9.92	4.93	-2.92	6.57	9.89	5.22	-2.11
Старобільський	6.54	9.90	7.53	-0.20	7.10	9.89	7.57	0.20
Троїцький	7.93	9.90	6.53	-1.30	7.59	9.95	6.00	-1.75
Середнє	6.71	9.92	7.86	0.00	6.99	9.95	7.78	0.00
Параметр	a	b	c	R^2	a	b	c	R^2
Оцінка	0.09	6.99	-62.06	0.61	-0.02	7.50	-66.69	0.67
Похибка	0.53	2.62	25.96		0.71	2.44	23.74	

У м. Лисичанськ працюють 5 ВНЗ (Лисичанський державний гірничо-індустріальний коледж, Лисичанський нафтохімічний технікум, Лисичанський педагогічний коледж, Кадіївський педагогічний коледж і Брянківський коледж Луганського національного університету імені Тараса Шевченка), у

м. Сєвєродонецьк – 6 (Луганський державний університет внутрішніх справ імені Е.О. Дідорєнка (Едуард Олексійович Дідорєнко (1938–2007) народився у м. Ворошиловград, член-кореспондент НАПрН України), Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля та його Сєвєродонецький хіміко-механічний коледж, Луганський та Сєвєродонецький інститути ПрАТ «ВНЗ Міжрегіональна академія управління персоналом», Сєвєродонецький коледж культури і мистецтв імені Сергія Прокоф'єва).

Луганщина має можливості подальшого зростання з використанням сучасних технологій. Потенційний рівень експорту регіону на 43% вище рівня 2017р. [102].

4.3 Поквартальне оцінювання економічної ефективності й структури експорту Кіровоградщини у 2017–2018 рр.

На даних 2017–2018 рр. визначені чотири кластери з виробничих лідерів Кіровоградщини. Кластери охоплюють менше половини районів області. Районі-лідери не потребують генерації первинних даних. Після генерації обчислювальних даних знайдено оцінки параметрів функцій Кобба–Дугласа. Досяжний експорт області на 54% перевищує спостережуваний.

За даними Міжнародного валютного фонду, у 2018 р. Україна посіла останнє місце в Європі за валовим внутрішнім продуктом на душу населення. Для громадян України економічне зростання залишається актуальною метою, що вимагає міждисциплінарних зусиль і засобів інформаційної ери [35, 37].

На 2018 р. Кіровоградщина складається з 21 району і 4 міст обласного значення, для яких наявні статистичні спостереження [211–216]. Кіровоградщина має територію 24588 км², посідаючи за цим показником 14 місце серед 27 регіонів України і випереджаючи такі відомі європейські держави, як Словенія, Чорногорія, Кіпр, Люксембург, Мальта. Кіровоградщина має наявне населення 1,0 млн. осіб, посідаючи за цим показником 25 місце серед регіонів України і

випереджаючи такі європейські держави, як Кіпр, Чорногорія, Люксембург, Мальта, Ісландія. Кожна згадана держава є членом Організації Північноатлантичного договору (North Atlantic Treaty Organization, NATO; НАТО) і має значний експорт у 2017 р. При цьому експорт Кіровоградщини за кордони України у 2017 р. становив лише 0,4 млрд. дол.

Для зростання експорту і виробництва Кіровоградщини потрібно планомірно збільшувати обсяги виробничих факторів – праці й капіталу. За рік від першого кварталу 2017 р. (2017:I) до 2018:II заробітна плата зросла найбільше у Петрівському районі (на 60%), а найменше – у Компаніївському районі (на 24%) (табл. 4.11). Слід зазначити, що в сезоні 2018–2019 рр. футбольна команда «Інгулець» від Петрівського району успішно змагається у Першій лізі з найкращими клубами Дніпропетровщини, Харківщини (які мають успішний досвід виступів у єврокубках), Волині, Миколаївщини, Івано-Франківщини, Сумщини, Хмельниччини.

Поквартальні значення капітальних інвестицій у районах виявляли істотні коливання (табл. 4.12). За фактичної відсутності саморегуляції обсягів виробничих факторів через сучасні фінансові ринки та інструменти, виникають питання обґрунтованості змін таких факторів. Для відповіді на ці питання треба враховувати виробництво сфери послуг (табл. 4.13) і промисловості (табл. 4.14).

У табл. 4.13 для ряду районів (Новгородківського і Світловодського) дані S_t не оприлюднювалися відповідно до вимог Закону України «Про державну статистику» щодо конфіденційності статистичної інформації, але генерувалися за алгоритмом [44]. Аналогічно у табл. 4.14 для Благовіщенського району (за 2017:I, 2017:II, 2017:III, 2017:IV), Новоархангельського району (за 2017:I, 2017:II), Олександрівського району (за 2018:I), Вільшанського, Компаніївського, Новгородківського, Онуфріївського районів дані I_u не оприлюднювалися, але генерувалися за алгоритмом [44].

Таблиця 4.11. Середньомісячна нарахована заробітна плата (wage) W_t (грн..) штатних працівників й обсяг праці (labor) $L_t = 3W_t$ (грн.) в кварталі t [7–12]

Район/Період	Середньомісячна зарплата W_t						Обсяг праці L_t					
	2017:I	2017:II	2017:III	2017:IV	2018:I	2018:II	2017:I	2017:II	2017:III	2017:IV	2018:I	2018:II
м.Кропивницький	5267	5749	6102	6457	6612	7134	15801	17247	18306	19371	19836	21402
м.Знам'янка	5797	6892	7602	7562	8026	8771	17391	20676	22806	22686	24078	26313
м.Олександрія	4458	4782	5347	5311	5292	5933	13374	14346	16041	15933	15876	17799
м.Світловодськ	4621	4940	5149	5463	5661	6269	13863	14820	15447	16389	16983	18807
Благовіщенський	4279	4612	5309	4971	5688	5829	12837	13836	15927	14913	17064	17487
Бобринецький	4744	5244	5731	5745	5531	6271	14232	15732	17193	17235	16593	18813
Вільшанський	4576	5250	5248	5655	5230	6064	13728	15750	15744	16965	15690	18192
Гайворонський	4405	5057	5398	5758	5546	6589	13215	15171	16194	17274	16638	19767
Голованівський	5355	5745	6275	6427	6533	7364	16065	17235	18825	19281	19599	22092
Добровеличківський	5684	6663	7197	7233	7727	8419	17052	19989	21591	21699	23181	25257
Долинський	4565	5052	5355	5687	5734	6271	13695	15156	16065	17061	17202	18813
Знам'янський	4992	5711	5971	6191	6396	7362	14976	17133	17913	18573	19188	22086
Кіровоградський	5385	5939	5975	6566	6600	7659	16155	17817	17925	19698	19800	22977
Компаніївський	4670	5268	5479	5881	4881	5784	14010	15804	16437	17643	14643	17352
Маловисківський	5776	6188	6274	7335	7997	9247	17328	18564	18822	22005	23991	27741
Новгородківський	4542	5269	5907	5794	5685	6721	13626	15807	17721	17382	17055	20163
Новоархангельський	4463	5792	5149	5708	5476	6351	13389	17376	15447	17124	16428	19053
Новомиргородський	5083	5429	5352	6455	6096	6782	15249	16287	16056	19365	18288	20346
Новоукраїнський	5069	5711	6051	6337	6058	7012	15207	17133	18153	19011	18174	21036
Олександрівський	6034	6311	6208	6616	6954	7643	18102	18933	18624	19848	20862	22929
Олександрійський	5000	5514	6293	6123	6175	7170	15000	16542	18879	18369	18525	21510
Онуфріївський	4510	5019	5513	5512	5164	5884	13530	15057	16539	16536	15492	17652
Петрівський	4415	5564	5689	5684	5883	7070	13245	16692	17067	17052	17649	21210
Світловодський	4989	6031	6450	6854	5975	6840	14967	18093	19350	20562	17925	20520
Устинівський	4792	5287	6451	5546	5762	6567	14376	15861	19353	16638	17286	19701

Кроки побудови табл. 4.11–4.14 називають генерацією первинних даних. Генеровані дані виділено курсивом. Для генерації обчислювальних даних ефективності слід знайти квартальні значення обсягу $Y_t = \frac{S_t + I_t}{N_t}$ реалізованих нефінансових послуг і реалізованої промислової продукції на душу населення, а також обсягу $K_t = \frac{C_t}{N_t}$ капітальних інвестицій на душу населення (табл. 4.15).

Таблиця 4.12. Освоєно (використано) капітальних інвестицій $C_u = \sum_{t=I}^u C_t$ (тис. грн.) за

період 2017_ u перших $u = I, II, III, IV$ кварталів року [7–12] й обсяг C_t (тис. грн.) капітальних інвестицій за квартал t

Район/Період	Освоєно C_u інвестицій за період						Капітальні інвестиції C_t			
	2017:I	2017_II	2017_III	2017_IV	2018:I	2018_II	2017:II	2017:III	2017:IV	2018:II
м.Кропивницький	321160	854366	1620913	2583921	377739	720299	533206	766547	963008	342560
м.Знам'янка	6930	27109	45976	66835	3745	10714	20179	18867	20859	6969
м.Олександрія	17342	37771	79716	217957	298184	339452	20429	41945	138241	41268
м.Світловодськ	18297	59614	113317	251181	15532	36720	41317	53703	137864	21188
Благовіщенський	15477	48934	84932	112523	13884	34775	33457	35998	27591	20891
Бобринецький	25944	47428	79678	133230	25997	79578	21484	32250	53552	53581
Вільшанський	8835	19224	23489	29681	1982	4532	10389	4265	6192	2550
Гайворонський	40750	62418	88702	121677	15218	26051	21668	26284	32975	10833
Голованівський	55643	118467	166883	264648	90830	119820	62824	48416	97765	28990
Добровеличківський	53842	95147	109525	160353	32308	55474	41305	14378	50828	23166
Долинський	44583	97187	152072	191130	24926	44341	52604	54885	39058	19415
Знам'янський	41077	92410	125905	164593	14256	36961	51333	33495	38688	22705
Кіровоградський	83628	148328	221980	331496	44335	109043	64700	73652	109516	64708
Компаніївський	41060	80760	119938	159538	28316	48685	39700	39178	39600	20369
Маловисківський	43372	93575	143296	198972	9641	61482	50203	49721	55676	51841
Новгородківський	25418	83890	119612	166746	28601	63537	58472	35722	47134	34936
Новоархангельський	16153	57295	84672	116547	5760	12410	41142	27377	31875	6650
Новомиргородський	36612	86636	104883	149641	14028	39137	50024	18247	44758	25109
Новоукраїнський	37097	101933	179444	235330	44912	127312	64836	77511	55886	82400
Олександрівський	15711	54457	106958	140829	15038	27577	38746	52501	33871	12539
Олександрійський	76571	175819	229642	281008	40552	118665	99248	53823	51366	78113
Онуфріївський	14043	29610	41657	61311	5962	18066	15567	12047	19654	12104
Петрівський	49371	157595	224244	274670	26726	59669	108224	66649	50426	32943
Світловодський	18461	29027	56430	103178	25688	57467	10566	27403	46748	31779
Устинівський	36473	95284	144944	172549	20828	50448	58811	49660	27605	29620

Маючи для кожного кварталу t 25 районних спостережень K_{ij} для обсягу K_t (грн.) капітальних інвестицій на душу населення, 25 районних спостережень L_{ij} для середнього обсягу L_t (грн.) праці штатного працівника, а також 25 районних спостережень Y_{ij} для обсягу Y_t (грн.) виробництва, $j = 1, \dots, 25$, можна оцінювати значення параметрів a , b , c виробничої функції Кобба–Дугласа $Y_t = (e)^c (K_t)^a (L_t)^b$, де e – основа натуральних логарифмів. У табл. 4.16, 4.17

наведено оцінки a , b , c параметрів функції лінійної регресії $\ln Y_t = a \ln K_t + b \ln L_t + c$, знайдені за допомогою MS Excel. Нехай у кварталі t для району k має місце $\ln Y_{tk} = a \ln K_{tk} + b \ln L_{tk} + c + R_{tk}$, де $R_{tk} > 0$.

Таблиця 4.13. Чисельність N_t (осіб) наявного населення на кінець кварталу t й обсяг S_t (тис.грн.) реалізованих нефінансових послуг в кварталі t [211–216]

Район/Період	Наявне населення N_t						Обсяг S_t нефінансових послуг					
	2017:I	2017:II	2017:III	2017:IV	2018:I	2018:II	2017:I	2017:II	2017:III	2017:IV	2018:I	2018:II
м.Кропивницький	237839	237283	237341	237175	236839	236438	701672	732999	709384	726125	740937	764277
м.Знам'янка	28145	28146	28139	28004	27960	27896	750148	783319	820974	891868	918943	955119
м.Олександрія	90519	90225	90103	89847	89636	89375	64477	69429	59761	69539	62885	63044
м.Світловодськ	52912	52797	52864	52745	52679	52651	39493	34621	36461	61364	51342	64718
Благовіщенський	22608	22547	22537	22436	22349	22286	1178	1569	1868	1919	1545	2284
Бобринецький	25708	25619	25555	25448	25383	25339	961	1001	564	1114	936	996
Вільшанський	12565	12551	12510	12417	12359	12301	448	220	159	217	283	359
Гайворонський	37677	37539	37399	37254	37153	37068	3446	4709	5492	3184	2271	5147
Голованівський	30686	30584	30529	30400	30259	30146	10201	10783	20954	17321	17842	14410
Добровеличківський	33684	33628	33589	33433	33345	33297	776	1010	904	904	929	1085
Долинський	33937	33836	33720	33547	33473	33401	24960	28106	23039	35153	24359	26716
Знам'янський	22699	22625	22515	22426	22350	22288	1716	1473	4803	9975	2094	6103
Кіровоградський	36998	36940	36872	36833	36790	36749	16999	18714	19448	18933	16472	19591
Компаніївський	15296	15232	15184	15131	15082	15046	542	607	541	630	340	339
Маловисківський	42885	42700	42529	42377	42251	42139	7545	6687	6609	7202	6180	6904
Новгородківський	15494	15494	15480	15403	15332	15295	293	789	800	746	600	1381
Новоархангельський	24453	24345	24245	24167	24099	24027	421	2342	3988	762	850	3574
Новомиргородський	28391	28373	28334	28203	28131	28012	4992	6448	6430	16089	8568	1214
Новоукраїнський	41633	41472	41317	41093	40910	40831	2660	3358	3310	3999	4091	3932
Олександрівський	27021	26990	26926	26801	26675	26594	2143	2766	3126	3831	3198	4589
Олександрійський	35084	34950	34784	34683	34562	34458	25171	16932	31354	43955	25400	18150
Онуфріївський	18110	17980	17855	17767	17683	17648	6998	3591	4328	19337	8707	4734
Петрівський	23946	23866	23774	23671	23576	23489	995	1104	686	898	650	940
Світловодський	12226	12167	12153	12055	11997	11944	231	619	628	584	469	1078
Устинівський	13036	13047	13007	12934	12856	12797	184	249	198	255	210	372
Кіровоградщина							1668653	1733441	1765809	1935904	1900098	1971055
Ряд районів							524	1408	1428	1330	1069	2459

Тоді цей район виробляє більший обсяг Y_{tk} продукції на душу населення, ніж це передбачається теоретично, виходячи з даних обсягів факторів виробництва K_{tk} і L_{tk} ; іншими словами, цей район виявляє економічну ефективність, вищу передбаченої. У табл. 4.16, 4.17 жирним виділено значення, вищі відповідного

середнього. За економічною ефективністю стабільними лідерами є 4 кластери: 1) суміжні м. Кропивницький, Кіровоградський, Новомиргородський, Новоукраїнський райони, м. Знам'янка, м. Олександрія, м. Світловодськ, Світловодський район; 2) Долинський район; 3) Голованівський район; 4) Гайворонський район. Кожний такий район-лідер не потребував генерації первинних даних (додаток 3, рис. 4.2).

Таблиця 4.14. Обсяг $I_u = \sum_{t=I}^u I_t$ (тис. грн.) реалізованої промислової продукції (товарів,

послуг) без ПДВ та акцизу за період 2017_у перших $u = I, II, III, IV$ кварталів року [211–216] й обсяг I_t (тис. грн.) реалізованої промислової продукції за квартал t

Район/Період	Обсяг I_u промислової продукції				Обсяг I_t промислової продукції					
	2017:I	2017_II	2017_III	2017_IV	2018:I	2018_II	2017:II	2017:III	2017:IV	2018:II
м.Кропивницький	3286007	5842485	8335011	11872914	3965518	7268343	2556478	2492526	3537903	3302825
м.Знам'янка	39166	92337	154455	208766	29667	74774	53171	62119	54310	45106
м.Олександрія	319211	670577	1056890	1462346	437560	850743	351367	386313	405456	413183
м.Світловодськ	1416074	2615751	3709651	4908957	1153983	2581874	1199677	1093900	1199306	1427890
Благовіщенський	783	947	1789	2335	7753	17404	164	842	546	9650
Бобринецький	1065	2143	2744	3317	14137	58348	1078	601	574	44210
Вільшанський	435	527	993	1292	126	543	92	466	299	416
Гайворонський	83257	185139	302277	410148	60472	166771	101882	117138	107871	106300
Голованівський	469172	1112163	1655203	2286626	393268	1306025	642990	543041	631423	912757
Добровеличківський	6715	17139	25789	36861	8026	15263	10424	8650	11072	7238
Долинський	32033	44150	46280	68679	26996	43809	12117	2130	22399	16813
Знам'янський	23437	49851	64940	80542	11514	40727	26414	15088	15602	29213
Кіровоградський	285719	663961	1083983	1618248	368575	922130	378243	420022	534265	553554
Компаніївський	530	639	1205	1575	154	664	110	566	370	510
Маловисківський	4108	7535	11107	15870	3682	7474	3427	3573	4762	3793
Новгородківський	537	650	1229	1603	156	675	114	578	374	518
Новоархангельський	5336	10672	16008	21211	5769	15434	5336	5336	5203	9665
Новомиргородський	190286	482112	734794	1105571	260635	527772	291826	252682	370776	267137
Новоукраїнський	61161	142343	231525	329762	57218	149568	81182	89182	98237	92350
Олександрівський	3206	8862	22794	28450	3142	6283	5655	13932	5657	3142
Олександрійський	88974	100978	135869	281733	14370	29646	12004	34891	145865	15276
Онуфріївський	627	755	1417	1849	180	778	128	663	432	598
Петрівський	1988	4465	7032	10469	2707	5967	2477	2567	3437	3259
Світловодський	177638	328884	527230	644246	146396	233770	151246	198346	117016	87374
Устинівський	1078	2439	4776	6200	867	2134	1361	2337	1424	1267
Кіровоградщина	6498541	12387502	18134990	25409570	6972873	14326917	5888961	5747488	7274580	7354044
Ряд районів	2911	3518	6634	8655	617	2659				

Таблиця 4.15. Обсяг Y_t (грн.) реалізованих нефінансових послуг і реалізованої промислової продукції на душу (наявного) населення, обсяг K_t (грн.) капітальних інвестицій на душу населення за квартал t

Район/Період	Обсяг Y_t на душу населення						Обсяг K_t на душу населення					
	2017:I	2017:II	2017:III	2017:IV	2018:I	2018:II	2017:I	2017:II	2017:III	2017:IV	2018:I	2018:II
м.Кропивницький	16766	13863	13491	17978	19872	17202	1350	2247	3230	4060	1595	1449
м.Знам'янка	28045	29720	31383	33787	33927	35856	246	717	670	745	134	250
м.Олександрія	4239	4664	4951	5287	5583	5328	192	226	466	1539	3327	462
м.Світловодськ	27509	23378	21382	23901	22881	28349	346	783	1016	2614	295	402
Благовіщенський	87	77	120	110	416	536	685	1484	1597	1230	621	937
Бобринецький	79	81	46	66	594	1784	1009	839	1262	2104	1024	2115
Вільшанський	70	25	50	42	33	63	703	828	341	499	160	207
Гайворонський	2301	2839	3279	2981	1689	3007	1082	577	703	885	410	292
Голованівський	15622	21376	18474	21340	13586	30756	1813	2054	1586	3216	3002	962
Добровеличківський	222	340	284	358	269	250	1598	1228	428	1520	969	696
Долинський	1679	1189	746	1716	1534	1303	1314	1555	1628	1164	745	581
Знам'янський	1108	1233	883	1141	609	1585	1810	2269	1488	1725	638	1019
Кіровоградський	8182	10746	11919	15019	10466	15596	2260	1751	1998	2973	1205	1761
Компаніївський	70	47	73	66	33	56	2684	2606	2580	2617	1877	1354
Маловисківський	272	237	239	282	233	254	1011	1176	1169	1314	228	1230
Новгородківський	54	58	89	73	49	124	1641	3774	2308	3060	1865	2284
Новоархангельський	235	315	385	247	275	551	661	1690	1129	1319	239	277
Новомиргородський	6878	10513	9145	13717	9570	9580	1290	1763	644	1587	499	896
Новоукраїнський	1533	2038	2239	2488	1499	2358	891	1563	1876	1360	1098	2018
Олександрівський	198	312	634	354	238	291	581	1436	1950	1264	564	471
Олександрійський	3254	828	1904	5473	1151	970	2183	2840	1547	1481	1173	2267
Онуфріївський	421	207	280	1113	503	302	775	866	675	1106	337	686
Петрівський	125	150	137	183	142	179	2062	4535	2803	2130	1134	1402
Світловодський	14548	12482	16372	9755	12242	7406	1510	868	2255	3878	2141	2661
Устинівський	97	123	195	130	84	128	2798	4508	3818	2134	1620	2315

Для економічної ефективності важливі інституції, якими в інформаційну еру є вищі навчальні заклади (ВНЗ). У м. Кропивницький працюють 19 ВНЗ – Центральноукраїнський державний педагогічний університет імені Володимира Винниченка, Центральноукраїнський національний технічний університет (ЦНТУ) та його інженерний коледж, Льотна академія Національного авіаційного університету, Економіко-технологічний інститут імені Роберта Ельворті та його економіко-правовий коледж, Інститут розвитку людини та юридичний коледж ВНЗ «Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна», Інститут і

коледж приватного ВНЗ «Університет сучасних знань», приватний ВНЗ «Кропивницький інститут державного та муніципального управління»,

Таблиця 4.16. Значення оцінок параметрів a , b , c функції Кобба–Дугласа $Y_t = (e)^c (K_t)^a (L_t)^b$ та їхніх похибок, залишків R_{tj} регресії, множинного коефіцієнта детермінації R^2 для кварталу t

	ln K		ln L		ln Y		R_{tj}		ln K		ln L		ln Y		R_{tj}	
Район/Період	2017:I	2017:II	2017:I	2017:II	2017:I	2017:II	2017:I	2017:II	2017:III	2017:III	2017:III	2017:III	2017:III	2017:III	2017:III	2017:III
м.Кропивницький	7.21	9.67	9.73	2.56	7.72	9.76	9.54	2.94	8.08	9.81	9.51	2.58				
м.Знам'янка	5.51	9.76	10.24	1.12	6.57	9.94	10.30	1.23	6.51	10.03	10.35	1.86				
м.Олександрія	5.26	9.50	8.35	0.84	5.42	9.57	8.45	0.61	6.14	9.68	8.51	1.79				
м.Світловодськ	5.85	9.54	10.22	2.91	6.66	9.60	10.06	3.35	6.92	9.65	9.97	3.65				
Благовіщенський	6.53	9.46	4.46	-1.80	7.30	9.54	4.34	-1.21	7.38	9.68	4.79	-1.58				
Бобринецький	6.92	9.56	4.37	-2.30	6.73	9.66	4.40	-2.65	7.14	9.75	3.82	-3.01				
Вільшанський	6.56	9.53	4.25	-2.45	6.72	9.66	3.21	-3.85	5.83	9.66	3.91	-2.79				
Гайворонський	6.99	9.49	7.74	1.63	6.36	9.63	7.95	0.75	6.56	9.69	8.10	1.43				
Голованівський	7.50	9.68	9.66	2.61	7.63	9.75	9.97	3.28	7.37	9.84	9.82	2.57				
Добровеличківський	7.38	9.74	5.40	-2.15	7.11	9.90	5.83	-2.43	6.06	9.98	5.65	-2.67				
Долинський	7.18	9.52	7.43	1.22	7.35	9.63	7.08	0.96	7.39	9.68	6.62	0.21				
Знам'янський	7.50	9.61	7.01	0.44	7.73	9.75	7.12	0.57	7.30	9.79	6.78	-0.23				
Кіровоградський	7.72	9.69	9.01	2.09	7.47	9.79	9.28	2.19	7.60	9.79	9.39	2.45				
Компаніївський	7.90	9.55	4.25	-1.57	7.87	9.67	3.85	-1.99	7.86	9.71	4.29	-2.12				
Маловисківський	6.92	9.76	5.60	-2.41	7.07	9.83	5.47	-2.34	7.06	9.84	5.48	-1.86				
Новгородківський	7.40	9.52	3.98	-2.02	8.24	9.67	4.06	-1.38	7.74	9.78	4.49	-2.35				
Новоархангельський	6.49	9.50	5.46	-1.12	7.43	9.76	5.75	-1.21	7.03	9.65	5.95	-0.34				
Новомиргородський	7.16	9.63	8.84	1.88	7.47	9.70	9.26	2.79	6.47	9.68	9.12	2.48				
Новоукраїнський	6.79	9.63	7.33	0.12	7.35	9.75	7.62	0.67	7.54	9.81	7.71	0.69				
Олександрівський	6.37	9.80	5.29	-3.45	7.27	9.85	5.74	-1.98	7.58	9.83	6.45	-0.70				
Олександрійський	7.69	9.62	8.09	1.65	7.95	9.71	6.72	0.66	7.34	9.85	7.55	0.27				
Онуфрївський	6.65	9.51	6.04	-0.48	6.76	9.62	5.33	-1.38	6.51	9.71	5.63	-1.15				
Петрівський	7.63	9.49	4.82	-0.81	8.42	9.72	5.01	-0.61	7.94	9.74	4.92	-1.67				
Світловодський	7.32	9.61	9.59	2.88	6.77	9.80	9.43	1.48	7.72	9.87	9.70	2.39				
Устинівський	7.94	9.57	4.57	-1.39	8.41	9.67	4.82	-0.46	8.25	9.87	5.27	-1.91				
Середнє	6.97	9.60	6.87	0.00	7.27	9.72	6.82	0.00	7.17	9.78	6.95	0.00				
Параметр	a	b	c	R^2	a	b	c	R^2	a	b	c	R^2				
Оцінка	-0.76	6.83	-53.39	0.39	-1.08	6.81	-51.47	0.42	-0.26	5.32	-43.20	0.25				
Похибка	0.60	4.29	41.25		0.63	4.37	42.10		0.68	4.38	42.46					

Центральноукраїнський інститут ПрАТ «ВНЗ «Міжрегіональна Академія управління персоналом» та його коледж, кооперативний коледж економіки і права імені М.П. Сая Кіровоградської облспоживспілки, будівельний коледж, медичний

коледж імені Є.Й. Мухіна, музичний коледж, коледж механізації сільського господарства, коледж харчування та торгівлі.

Таблиця 4.17. Значення оцінок параметрів a , b , c функції Кобба–Дугласа $Y_t = (e)^c (K_t)^a (L_t)^b$ та їхніх похибок, залишків R_{ij} регресії, множинного коефіцієнта детермінації R^2 для кварталу t

	$\ln K$	$\ln L$	$\ln Y$	R_{ij}	$\ln K$	$\ln L$	$\ln Y$	R_{ij}	$\ln K$	$\ln L$	$\ln Y$	R_{ij}
Район/Період	2017:IV	2017:IV	2017:IV	2017:IV	2018:I	2018:I	2018:I	2018:I	2018:II	2018:II	2018:II	2018:II
м.Кропивницький	8.31	9.87	9.80	1.51	7.37	9.90	9.90	2.28	7.28	9.97	9.75	2.54
м.Знам'янка	6.61	10.03	10.43	2.44	4.90	10.09	10.43	2.48	5.52	10.18	10.49	2.11
м.Олександрія	7.34	9.68	8.57	2.56	8.11	9.67	8.63	2.02	6.14	9.79	8.58	1.74
м.Світловодськ	7.87	9.70	10.08	3.40	5.69	9.74	10.04	3.77	6.00	9.84	10.25	3.18
Благовіщенський	7.11	9.61	4.70	-0.63	6.43	9.74	6.03	-0.48	6.84	9.77	6.28	-0.32
Бобринецький	7.65	9.75	4.19	-2.67	6.93	9.72	6.39	-0.12	7.66	9.84	7.49	0.82
Вільшанський	6.21	9.74	3.73	-1.77	5.08	9.66	3.50	-2.15	5.33	9.81	4.14	-2.97
Гайворонський	6.79	9.76	8.00	1.87	6.02	9.72	7.43	1.18	5.68	9.89	8.01	0.68
Голованівський	8.08	9.87	9.97	1.91	8.01	9.88	9.52	1.78	6.87	10.00	10.33	2.91
Добровеличківський	7.33	9.99	5.88	-2.40	6.88	10.05	5.59	-2.73	6.54	10.14	5.52	-2.46
Долинський	7.06	9.74	7.45	1.17	6.61	9.75	7.34	0.73	6.37	9.84	7.17	0.19
Знам'янський	7.45	9.83	7.04	-0.20	6.46	9.86	6.41	-0.75	6.93	10.00	7.37	-0.04
Кіровоградський	8.00	9.89	9.62	1.47	7.09	9.89	9.26	1.73	7.47	10.04	9.65	2.24
Компаніївський	7.87	9.78	4.19	-3.03	7.54	9.59	3.49	-2.51	7.21	9.76	4.03	-2.45
Маловисківський	7.18	10.00	5.64	-2.61	5.43	10.09	5.45	-2.63	7.11	10.23	5.54	-2.64
Новгородківський	8.03	9.76	4.29	-2.96	7.53	9.74	3.90	-2.94	7.73	9.91	4.82	-2.07
Новоархангельський	7.18	9.75	5.51	-0.90	5.48	9.71	5.62	-0.41	5.62	9.85	6.31	-0.90
Новомиргородський	7.37	9.87	9.53	2.05	6.21	9.81	9.17	2.34	6.80	9.92	9.17	2.02
Новоукраїнський	7.22	9.85	7.82	0.61	7.00	9.81	7.31	0.29	7.61	9.95	7.77	0.70
Олександрівський	7.14	9.90	5.87	-1.59	6.33	9.95	5.47	-2.11	6.16	10.04	5.67	-2.06
Олександрійський	7.30	9.82	8.61	1.58	7.07	9.83	7.05	-0.10	7.73	9.98	6.88	-0.24
Онуфріївський	7.01	9.71	7.01	1.01	5.82	9.65	6.22	0.42	6.53	9.78	5.71	-1.00
Петрівський	7.66	9.74	5.21	-1.58	7.03	9.78	4.96	-1.92	7.25	9.96	5.19	-2.00
Світловодський	8.26	9.93	9.19	0.49	7.67	9.79	9.41	2.27	7.89	9.93	8.91	2.00
Устинівський	7.67	9.72	4.87	-1.75	7.39	9.76	4.43	-2.44	7.75	9.89	4.85	-1.95
Середнє	7.43	9.81	7.09	0.00	6.64	9.81	6.92	0.00	6.80	9.93	7.20	0.00
Параметр	a	b	c	R^2	a	b	c	R^2	a	b	c	R^2
Оцінка	0.87	7.37	-71.66	0.42	0.29	5.49	-48.86	0.34	-0.25	3.54	-26.32	0.23
Похибка	0.83	4.03	39.57		0.49	3.33	33.39		0.54	3.35	33.22	

В м. Кропивницький зареєстровані, але не оприлюднюють інформацію (на сайті www.vstup.info) 6 ВНЗ – кібернетико-технічний коледж, коледж Київського університету культури, коледж статистики Національної академії статистики, обліку та аудиту, факультет Київського національного університету культури і

мистецтв, відділення Навчально-наукового інституту заочного та дистанційного навчання, факультет менеджменту і бізнесу Київського університету культури.

В м. Олександрія працюють 6 ВНЗ – політехнічний коледж, коледж культури і мистецтв, педагогічний коледж імені В.О. Сухомлинського, коледж Білоцерківського національного аграрного університету (БНАУ), коледж приватного ВНЗ «Університет сучасних знань», медичне училище. У м. Світловодськ працює політехнічний коледж ЦНТУ. Отже, у кластері 1) працюють 26 ВНЗ. У кластері 4) працює єдиний ВНЗ – політехнічний коледж у м. Гайворон; кластери 3) і 4) не мають ВНЗ. Поза кластерами 1)–4) у смт. Компаніївка працює коледж ветеринарної медицини БНАУ, а у м. Бобринець – коледж імені В. Порика БНАУ. Таким чином, у кластерах 1)–4) працюють 27 з 29 ВНЗ Кіровоградщини, а 19 з 25 районів Кіровоградщини не мають ВНЗ. Сумарна віддача $(a+b)$ істотно перевищує 1, що свідчить про збільшувану віддачу від масштабу, особливо від масштабу праці.

За даними Міжнародного центру торгівлі [195], загальний світовий експорт істотно знижувався за основними групами товарів (відповідно до класифікації Гармонізованої системи [196]), починаючи з 2014 р. У табл. 4.18, 4.19, 4.20 наведено значення W_m світового експорту для кожної групи m товарів, а групи впорядковані за рівнем експорту 2017 р., де групі 0 відповідає сумарний експорт

$\sum_{m=1}^{99} W_m$. Оскільки максимальний експорт $M_m = \max_t E_{tm}$ є досяжним, то досяжним

є річний експорт $4M_m$ групи m і сумарний річний експорт $M = 4 \sum_{m=1}^{99} M_m = 0,638$

млрд. дол. Це на 54% перевищує експорт $E_{IV0} = \sum_{m=1}^{99} E_{IVm} = 0,416$ млрд. дол.

Кіровоградщини у 2017 р. і задає досяжну структуру експорту.

Кіровоградщина, спираючись на розробки НАН України і своїх ВНЗ, може започаткувати експорт за такими товарними групами (у порядку пріоритетності):

Таблиця 4.18. Експорт $E_{um} = \sum_{t=I}^u E_{tm}$ і максимальний квартальний експорт M_m (тис.

дол.) Кіровоградщини за групами $m = 0, \dots, 99$ за період 2017_у перших u кварталів року [211–216], світовий експорт W_m (млрд. дол.) за 2017 р. [195]

m/T	Сумарний експорт E_{um}						Квартальний експорт E_{tm}				M_m	$4M_m$	W_m
	2017:I	2017:II	2017:III	2017:IV	2018:I	2018:II	2017:II	2017:III	2017:IV	2018:II	Квартал	Рік	2017
0	127876	214970	311575	415702	106194	241061	87095	96604	104127	134867	134867	539466	17581
85	250	625	944	1542	585	1050	375	319	599	465	599	2394	2566
84	17671	34819	53716	69407	17645	35110	17148	18897	15691	17465	18897	75589	2082
27	3	9	16	24	2	11	7	6	9	9	9	34	1954
87	332	933	1532	1812	390	929	601	599	280	539	601	2403	1440
71													636
39	33	93	184	286	106	172	60	91	103	66	106	426	595
90	22	28	63	85	16	39	7	35	22	23	35	139	577
30													534
29	1158	2417	3318	4170	1180	2432	1259	901	852	1252	1259	5036	381
72	5	6	54	54			1	49	0		49	195	372
88	3	19	19	19	11	11	16	0	0	0	16	66	327
99													321
73	175	330	648	1200	751	1015	155	318	553	264	751	3006	283
26	5903	14007	19467	27962	6618	13102	8105	5459	8496	6485	8496	33982	259
94	556	1202	1497	2088	450	856	646	296	591	406	646	2583	243
62	1093	2346	3987	4914	1215	2382	1253	121	53	1167	1253	5010	228
61	6	9	130	183	15	211	3	355	154	196	355	1419	226
38	145	689	1043	1198	159	287	544	355	154	128	544	2175	189
40	425	773	1248	1631	401	833	349	475	384	433	475	1898	185
76				2	4	4			2	0	4	16	177
48	9	14	15	18	7	65	4	1	3	58	58	231	162
74	1	52	277	619	284	802	52	225	342	518	518	2070	147
64													144
44	1530	3249	5093	6606	2055	4046	1719	1844	1513	1991	2055	8220	136
89													135
33	53	89	132	209	82	137	36	43	78	54	82	330	128
2						130				130	130	520	125
3													119
95				37					37		37	148	116
8	11	11	11	11		10	1	0	0	10	11	42	116
22	1	3	5	5	1	1	2	2	1	1	2	8	115
28		2	2	2			2	0	0		2	8	112
10	33246	58243	70638	88033	22334	61448	24998	12394	17396	39114	39114	156458	103
15	48118	64267	96000	133336	36631	77282	16149	31733	37336	40651	48118	192473	99
12	1956	4474	12276	16012	3064	4277	2518	7802	3736	1213	7802	31206	98
4	2417	4375	7914	11403	995	2308	1958	3539	3489	1313	3539	14157	85
32	39	61	100	145	32	84	22	38	46	52	52	208	80
42	0	5	6	6		7	5	1	0	7	7	26	78
7	74	318	1619	2578	216	388	244	1301	959	173	1301	5204	72
70		0	1	1		6	0	1	0	6	6	26	72
19	150	372	616	941	215	425	222	244	326	210	326	1303	71
23	6588	9524	12786	18484	6224	18689	2936	3262	5698	12465	12465	49861	70

Таблиця 4.19. Експорт $E_{um} = \sum_{t=I}^u E_{tm}$ і максимальний квартальний експорт M_m (тис.

дол.) Кіровоградщини за групами $m = 1, \dots, 99$ за період 2017_ u перших u кварталів року [211–216], світовий експорт W_m (млрд. дол.) за 2017 р. [195]

m/T	Сумарний експорт E_{um}						Квартальний експорт E_{tm}				M_m	$4M_m$	W_m
	2017:I	2017 II	2017 III	2017 IV	2018:I	2018 II	2017:II	2017:III	2017:IV	2018:II	Квартал	Рік	2017
21	230	948	1768	2131	572	1620	718	820	363	1048	1048	4193	69
83	0	0	4	4	0	3	0	4	0	3	4	17	67
82	5	20	23	40	31	48	15	3	18	17	31	123	65
63	1	2	3	4	2	2	1	1	1	0	2	6	63
20	130	198	257	419	82	146	68	59	162	64	162	648	62
34	159	280	630	809	76	272	120	350	179	197	350	1402	59
52	1	2	2	3	8	8	1	0	1	1	8	30	56
69	52	73	73	90	22	47	21	0	17	24	52	208	53
9													52
96	0	0	10	10	13	13	0	10	0	1	13	52	51
68	34	307	553	645	169	406	273	247	92	237	273	1091	51
31						89				89	89	356	51
91													50
18	543	883	1129	1881	519	771	340	247	752	252	752	3008	49
16	2	3	6	16	2	4	0	3	10	2	10	39	49
47													48
17	3875	6296	7462	9172	2197	6823	2421	1166	1710	4626	4626	18502	48
54	0	1	9	11	0	0	0	9	2	0	9	34	47
25	292	954	1989	2627	307	1095	662	1035	638	788	1035	4140	42
24													42
86	1	92	185	270	176	206	92	92	86	30	176	704	37
49	14	131	152	173	26	41	117	22	21	15	117	468	37
55	1	1	1	1	12	13	0	0	0	1	12	48	36
60	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	2	35
35				1					1		1	2	29
97													28
41	45	136	174	292	0	48	91	39	118	48	118	471	26
59	1	1	1	1			0	0	0		1	5	25
56	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	1	3	25
1	418	1142	1626	1840	259	681	724	485	213	422	724	2895	22
6													21
75													20
81	6	6	6	6	27	51	0	0	0	24	27	109	20
79													19
11	68	68	68	98	0	110	0	0	30	110	110	442	18
57					0	0					0	2	15
93													15
37													15
51		0	1	13	0	0	0	1	12	0	12	48	13
58	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	12
5	10	16	20	26	6	15	6	5	6	8	10	39	10
65													9
43													9

71 (перли природні або культивовані, дорогоцінне або напівдорогоцінне каміння, дорогоцінні метали, метали, плаковані дорогоцінними металами, та вироби з них;

біжутерія; монети), 30 (фармацевтична продукція), 64 (взуття, гетри та аналогічні вироби; їх частини), 89 (судна, човни та інші плавучі засоби), 3 (риба і ракоподібні, молюски та інші водяні безхребетні), 47 (маса з деревини або з інших волокнистих целюлозних матеріалів; папір або картон, одержані з відходів та макулатури), 24 (тютюн і промислові замітники тютюну), 97 (твори мистецтва, предмети колекціонування та антикваріат), 6 (живі дерева та інші рослини; цибулини, коріння та інші аналогічні частини рослин; зрізані квіти і декоративна зелень), 75 (нікель і вироби з нього).

Незважаючи на високий наявний потенціал, Кіровоградщина має можливості подальшого зростання з використанням сучасних технологій.

Таблиця 4.20. Експорт $E_{um} = \sum_{t=I}^u E_{tm}$ і максимальний квартальний експорт M_m (тис. дол.) Кіровоградщини за групами $m = 1, \dots, 99$ за період 2017_у перших u кварталів року [211–216], світовий експорт W_m (млрд. дол.) за 2017 р. [195]

m/T	Сумарний експорт E_{um}						Квартальний експорт E_{tm}				M_m Квартал	$4M_m$ Рік	W_m 2017
	2017:I	2017_II	2017_III	2017_IV	2018:I	2018:II	2017:II	2017:III	2017:IV	2018:II			
78													9
67													8
13													7
92													6
80													6
36													4
53													4
66													3
46													2
50													2
45													2
14	19	52	65	88			34	13	24		34	134	1
M												638091	

4.4 Поквартальне оцінювання економічної ефективності й структури експорту Тернопільщини у 2017–2018 рр.

На даних 2017–2018 рр. визначено два кластери з виробничих лідерів Тернопільщини. Кластери охоплюють менше половини районів області. Райони-лідери не потребують генерації первинних даних. Після генерації обчислювальних даних знайдено оцінки параметрів функцій Кобба–Дугласа. Досяжний експорт області на 64% перевищує спостережуваний.

Таблиця 4.21. Середньомісячна нарахована заробітна плата W_t (грн.) штатних працівників й обсяг праці $L_t = 3W_t$ (грн.) в кварталі t [217–223]

Район/Період	Середньомісячна зарплата W_t							Обсяг праці L_t						
	2017:	2017:	2017:	2017:	2018:	2018:	2018:	2017:	2017:	2017:	2017:	2018:	2018:	2018:
м.Тернопіль	5198	5882	6106	6600	6483	7208	7648	15594	17646	18318	19800	19449	21624	22944
м.Бережани	4671	6137	5992	6027	5583	6780	6567	14013	18411	17976	18081	16749	20340	19701
м.Кременець	4637	5063	5181	5340	5643	6030	5957	13911	15189	15543	16020	16929	18090	17871
м.Чортків	4709	5181	5661	6268	5892	6910	7082	14127	15543	16983	18804	17676	20730	21246
Бережанський	4574	5408	5399	5209	5414	6496	5729	13722	16224	16197	15627	16242	19488	17187
Борщівський	4342	4847	4690	5191	5096	5983	5594	13026	14541	14070	15573	15288	17949	16782
Бучацький	4643	5420	5241	5510	5933	7170	7257	13929	16260	15723	16530	17799	21510	21771
Гусятинський	4335	4714	5019	5801	5416	6030	6324	13005	14142	15057	17403	16248	18090	18972
Заліщицький	4290	4734	4681	4776	5237	5593	5806	12870	14202	14043	14328	15711	16779	17418
Збаразький	4223	4878	5096	5739	5567	6120	6091	12669	14634	15288	17217	16701	18360	18273
Зборівський	4416	4651	4908	4995	5011	5672	5847	13248	13953	14724	14985	15033	17016	17541
Козівський	4583	5100	5267	6203	7545	8553	9836	13749	15300	15801	18609	22635	25659	29508
Кременецький	4615	5179	5406	5413	5301	6149	6379	13845	15537	16218	16239	15903	18447	19137
Лановецький	4512	5206	4906	5235	5437	6421	6948	13536	15618	14718	15705	16311	19263	20844
Монастирський	4662	5083	4895	5295	5261	5946	5611	13986	15249	14685	15885	15783	17838	16833
Підволочиський	4596	5089	5171	5692	5663	6588	6945	13788	15267	15513	17076	16989	19764	20835
Підгаєцький	4158	4556	4254	4955	6407	8918	8735	12474	13668	12762	14865	19221	26754	26205
Теребовлянський	4346	4879	4900	5442	5645	6195	6002	13038	14637	14700	16326	16935	18585	18006
Тернопільський	5507	6437	6700	7876	7052	8492	8403	16521	19311	20100	23628	21156	25476	25209
Чортківський	4885	5730	5992	7234	6405	7527	7401	14655	17190	17976	21702	19215	22581	22203
Шумський	4637	5163	5091	6563	5548	6396	6223	13911	15489	15273	19689	16644	19188	18669

За півтора року від першого кварталу 2017 р. (2017:I) до 2018:III заробітна плата у Козівському районі зросла найбільше (на 115%), а в Монастирському

районі – найменше (на 20%) (табл. 4.21). Поквартальні значення капітальних інвестицій у районах теж виявляли істотні коливання (табл. 4.22).

Таблиця 4.22. Освоєно (використано) капітальних інвестицій $C_u = \sum_{t=I}^u C_t$ (тис. грн.) за

період 2017_у перших у кварталів року [217–223] й обсяг C_t (тис. грн.) капітальних інвестицій

Район/Період	Освоєно C_u інвестицій за період						Капітальні інвестиції C_t			
	2017:I	2017_II	2017_IV	2018:I	2018_II	2018_III	2017:II	2017:IV	2018:II	2018:III
м.Тернопіль	541960	1348914	3008723	497963	1088736	1806787	806954	969590	590773	718051
м.Бережани	4138	9607	38461	3144	9632	21758	5469	16112	6488	12126
м.Кременець	4106	19133	58080	10260	19525	39141	15027	26326	9265	19616
м.Чортків	7472	20435	51330	5007	12470	27246	12963	20791	7463	14776
Бережанський	769	5441	21886	1522	9857	25050	4672	5964	8335	15193
Борщівський	26133	54559	158937	19597	48419	87164	28426	67110	28822	38745
Бучацький	110080	230173	332428	61103	176088	239027	120093	65495	114985	62939
Гусятинський	14871	54501	173004	52280	117617	208649	39630	70964	65337	91032
Заліщицький	4712	25239	105046	37117	66264	97040	20527	49276	29147	30776
Збаразький	34398	87710	199185	27353	53331	114517	53312	52402	25978	61186
Зборівський	8361	20405	58051	18795	39198	50937	12044	27272	20403	11739
Козівський	22871	46557	119526	30948	60056	122273	23686	40784	29108	62217
Кременецький	12024	19873	75602	10694	19860	38787	7849	29031	9166	18927
Лановецький	16437	33647	95920	7501	56948	168495	17210	32361	49447	111547
Монастирський	2360	12044	28990	1532	10565	27815	9684	9767	9033	17250
Підволочиський	43741	129606	301342	35377	160636	250826	85865	97765	125259	90190
Підгаєцький	756	2907	9822	30	84582	109213	2151	5572	84552	24631
Теребовлянський	58023	106591	318486	48005	143111	236280	48568	134440	95106	93169
Тернопільський	158256	419365	1043421	348144	638583	1083270	261109	283035	290439	444687
Чортківський	37901	71309	247484	72161	118490	208405	33408	121527	46329	89915
Шумський	15012	40202	92780	7535	31887	69722	25190	32794	24352	37835

На 2018 р. Тернопільщина складається з 17 районів і 4 міст міст обласного значення, для яких наявні статистичні спостереження [217–223]. Тернопільщина має територію 13824 км², посідаючи за цим показником 23 місце серед 27 регіонів України і випереджаючи такі європейські держави, як Чорногорія, Кіпр, Люксембург, Мальта. Тернопільщина має наявне населення 1,0 млн. осіб, посідаючи за цим показником 21 місце серед регіонів України і випереджаючи такі європейські держави, як Кіпр, Чорногорія, Люксембург, Ісландія. У 2017 р. експорт кожної згаданої держави перевищував експорт Тернопільщини.

За фактичної відсутності саморегуляції обсягів виробничих факторів (праці й капіталу) Тернопільщини через фінансові ринки та інструменти, виникають питання обґрунтованості змін таких факторів. Для відповіді на ці питання треба враховувати виробництво сфери послуг (табл. 4.23) і промисловості (табл. 4.24).

Таблиця 4.23. Чисельність N_t (осіб) наявного населення на кінець кварталу t й обсяг S_t (тис. грн.) реалізованих нефінансових послуг в кварталі t [217–223]

Район/Період	Наявне населення N_t						Обсяг S_t нефінансових послуг					
	2017:I	2017:II	2017:IV	2018:I	2018:II	2018:III	2017:I	2017:II	2017:IV	2018:I	2018:II	2018:III
м.Тернопіль	217753	217665	218653	219085	219683	221127	805076	1100582	1387971	982403	1743822	1797611
м.Бережани	19661	19632	19484	19441	19355	19289	5760	6399	7968	7120	7638	8926
м.Кременець	21341	21275	21235	21176	21167	21117	12527	11949	17035	9819	8912	11921
м.Чортків	29124	29076	29057	28985	28893	28768	12776	94742	74967	100868	103055	131246
Бережанський	21076	21007	20891	20812	20804	20764	20	21	23	23	30	2114
Борщівський	66894	66753	66399	66244	66124	65992	22223	19837	50095	17452	19454	30946
Бучацький	63451	63343	63110	63026	62930	62809	5945	7737	8564	7125	8853	10912
Гусятинський	59830	59683	59321	59135	58975	58733	8939	9728	38467	20431	28444	12312
Заліщицький	46498	46361	46059	45952	45822	45651	1444	1709	2304	2367	2710	6124
Збаразький	57503	57397	57083	56956	56808	56520	7304	8801	9532	7764	8500	16830
Зборівський	41361	41267	41035	40875	40747	40589	6479	7309	17614	10048	9040	13443
Козівський	37832	37724	37489	37385	37222	37088	7718	1544	65964	16681	4151	3187
Кременецький	46850	46768	46584	46493	46360	46306	1680	2155	2788	2455	2609	2695
Лановецький	29552	29517	29325	29226	29106	28940	4288	3894	5769	5136	11525	5241
Монастирський	27672	27513	27151	26980	26814	26624	398	478	639	548	661	623
Підволочиський	42194	42078	41868	41714	41596	41441	4270	5350	5074	5900	6942	5190
Підгаєцький	18312	18251	18125	18044	17966	17864	876	506	340	952	539	724
Теребовлянський	65343	65186	64833	64641	64428	64157	20487	16252	70762	29367	18532	21000
Тернопільський	67139	67070	67093	67079	67064	67056	26779	31363	40171	53459	56102	63085
Чортківський	44479	44340	44130	43970	43824	43660	171	221	286	218	288	222
Шумський	33464	33481	33387	33322	33234	33129	1184	1368	2991	1446	1122	1331

У табл. 4.24 відповідно до вимог Закону України «Про державну статистику» щодо конфіденційності статистичної інформації для ряду районів (Підгаєцького району і м. Кременець) дані I_u реалізованої промислової продукції не оприлюднювалися, але генерувалися за алгоритмом [44].

Кроки побудови табл. 4.21–4.24 називають генерацією первинних даних. Для генерації обчислювальних даних ефективності слід знайти квартальні значення

обсягу $Y_t = \frac{S_t + I_t}{N_t}$ реалізованих нефінансових послуг і реалізованої промислової

продукції на душу населення, а також обсягу $K_t = \frac{C_t}{N_t}$ капітальних інвестицій на

душу населення (табл. 4.25).

Таблиця 4.24. Обсяг $I_u = \sum_{t=I}^u I_t$ (тис. грн.) реалізованої промислової продукції (товарів, послуг) без ПДВ та акцизу за період 2017_ u перших $u = I, II, III, IV$ кварталів року [217–223] й обсяг I_t (тис. грн.) реалізованої промислової продукції за квартал t

Район/Період	Обсяг I_u промислової продукції						Обсяг I_t промислової продукції			
	2017:I	2017_II	2017_IV	2018:I	2018_II	2018_III	2017:II	2017:IV	2018:II	2018:III
м.Тернопіль	3097849	5145549	10469962	3516902	5773807	8157770	2047700	3224943	2256904	2383963
м.Бережани	30492	54090	137320	32855	72883	111207	23598	43708	40028	38325
м.Кременець	1427	3036	5925	1921	4598	7622	1608	1250	2677	3024
м.Чортків	27756	61545	144945	43577	106858	157269	33788	54544	63281	50411
Бережанський	7715	23508	57866	8255	21573	36890	15793	17032	13317	15317
Борщівський	135163	268318	531394	159646	362665	556270	133155	156779	203019	193605
Бучацький	16727	33902	76440	21036	41449	73162	17175	24210	20413	31713
Гусятинський	95806	183819	884324	205647	330748	527581	88013	607991	125101	196833
Заліщицький	29967	64181	125198	25714	48654	76770	34213	25705	22941	28116
Збаразький	80860	197489	745548	176428	381073	599021	116629	387030	204644	217948
Зборівський	29726	71206	173472	33977	86565	137699	41479	60129	52589	51134
Козівський	55971	128965	512183	83835	372179	615769	72995	272006	288344	243591
Кременецький	77280	181013	365336	84215	188840	285924	103733	78065	104625	97084
Лановецький	160336	303081	572907	83418	193463	311955	142745	103659	110045	118492
Монастирський	21100	43302	112648	13738	43186	77601	22202	30357	29448	34415
Підволочиський	147423	250945	504890	73227	190554	353669	103522	154161	117328	163114
Підгаєцький	1225	2604	5057	1637	3903	6448	1380	1060	2266	2545
Теребовлянський	77471	220567	559499	92765	228913	371210	143096	157560	136149	142297
Тернопільський	252649	664069	1706309	444488	1096262	1755218	411419	547345	651774	658956
Чортківський	183056	391629	1860683	354182	614670	836779	208574	1107912	260488	222110
Шумський	8729	16169	32507	10478	20515	28089	7441	9160	10037	7575
Тернопільщина	4538728	8308986	19584413	5467938	10183356	15083924				
Ряд районів	2652	5640	10983	3558	8501	14070				

Отже, для кожного кварталу $t \in 21$ районне спостереження K_{ij} для обсягу K_t (грн.) капітальних інвестицій на душу населення і 21 районне спостереження L_{ij} для середнього обсягу L_t (грн.) праці штатного працівника.

Таблиця 4.25. Обсяг Y_t (грн.) реалізованих нефінансових послуг і реалізованої промислової продукції на душу (наявного) населення, обсяг K_t (грн.) капітальних інвестицій на душу населення за квартал t

Район/Період	Обсяг Y_t на душу населення						Обсяг K_t на душу населення					
	2017:I	2017:II	2017:IV	2018:I	2018:II	2018:III	2017:I	2017:II	2017:IV	2018:I	2018:II	2018:III
м.Тернопіль	15242	13106	19963	20537	18211	18910	2489	3707	4434	2273	2689	3247
м.Бережани	2532	1495	2608	2056	2463	2450	210	279	827	162	335	629
м.Кременець	1056	664	731	554	548	708	192	706	1240	485	438	929
м.Чортків	1941	1601	4239	4983	5757	6315	257	446	716	173	258	514
Бережанський	1351	753	816	398	642	839	36	222	285	73	401	732
Борщівський	3007	2328	3038	2673	3364	3403	391	426	1011	296	436	587
Бучацький	1254	365	536	447	465	679	1735	1896	1038	969	1827	1002
Гусятинський	2583	1624	10714	3823	2604	3561	249	664	1196	884	1108	1550
Заліщицький	1626	769	640	611	560	750	101	443	1070	808	636	674
Збаразький	2389	2159	6928	3234	3752	4154	598	929	918	480	457	1083
Зборівський	1700	1162	1747	1077	1512	1591	202	292	665	460	501	289
Козівський	2460	2140	7711	2689	7858	6654	605	628	1088	828	782	1678
Кременецький	2638	2254	1728	1864	2313	2155	257	168	623	230	198	409
Лановецький	6405	4981	3806	3030	4177	4275	556	583	1104	257	1699	3854
Монастирський	1725	821	1135	530	1123	1316	85	352	360	57	337	648
Підволочиський	4476	2562	3799	1897	2988	4061	1037	2041	2335	848	3011	2176
Підгаєцький	1042	124	107	144	156	183	41	118	307	2	4706	1379
Теребовлянський	2167	2509	2991	1889	2401	2545	888	745	2074	743	1476	1452
Тернопільський	4762	6533	8756	7423	10555	10768	2357	3893	4219	5190	4331	6632
Чортківський	5097	4708	25110	8060	5951	5092	852	753	2754	1641	1057	2059
Шумський	1251	258	353	358	336	269	449	752	982	226	733	1142

Враховуючи також 21 районних спостережень Y_{tj} для обсягу Y_t (грн.) виробництва, $j = 1, \dots, 21$, можна оцінювати значення параметрів a , b , c виробничої функції Кобба–Дугласа $Y_t = (e)^c (K_t)^a (L_t)^b$, де e – основа натуральних логарифмів. У табл. 4.26, 4.27 наведено оцінки a , b , c параметрів функції лінійної регресії $\ln Y_t = a \ln K_t + b \ln L_t + c$, знайдені за допомогою MS Excel. Якщо у кварталі t для району k має місце $\ln Y_{tk} = a \ln K_{tk} + b \ln L_{tk} + c + R_{tk}$, де $R_{tk} > 0$, то цей район виробляє більший обсяг Y_{tk} продукції на душу населення, ніж це передбачається теоретично, виходячи з даних обсягів виробничих факторів. K_{tk} і L_{tk} : цей район виявляє економічну ефективність, вищу передбаченої. У табл. 4.26, 4.27 жирним виділено значення, вищі відповідного середнього. За

економічною ефективністю стабільними лідерами є кластери: 1) суміжні Кременецький, Збаразький, Лановецький, Козівський райони, м. Тернопіль, м. Бережани; 2) суміжні Гусятинський, Чортківський Борщівський райони, м. Чортків (додаток 4, рис. 4.3).

Таблиця 4.26. Значення оцінок параметрів a , b , c функції Кобба–Дугласа $Y_t = (e)^c (K_t)^a (L_t)^b$ та їхніх похибок, залишків R_{tj} регресії, множинного коефіцієнта детермінації R^2 для кварталу t

	ln K	ln L	ln Y	R_{tj}	ln K	ln L	ln Y	R_{tj}	ln K	ln L	ln Y	R_{tj}
Район/Період	2017:I	2017:I	2017:I	2017:I	2017:II	2017:II	2017:II	2017:II	2017:III	2017:III	2017:III	2017:III
м.Тернопіль	7.82	9.65	9.63	0.96	8.22	9.78	9.48	0.91	8.06	9.82	9.59	0.51
м.Бережани	5.35	9.55	7.84	0.14	5.63	9.82	7.31	-0.27	6.48	9.80	7.76	-0.12
м.Кременець	5.26	9.54	6.96	-0.69	6.56	9.63	6.50	-0.79	6.39	9.65	6.46	-0.87
м.Чортків	5.55	9.56	7.57	-0.21	6.10	9.65	7.38	0.21	5.85	9.74	8.36	1.12
Бережанський	3.60	9.53	7.21	0.05	5.40	9.69	6.62	-0.39	6.22	9.69	6.72	-0.62
Борщівський	5.97	9.47	8.01	0.33	6.05	9.58	7.75	0.85	6.33	9.55	7.55	0.59
Бучацький	7.46	9.54	7.13	-1.14	7.55	9.70	5.90	-2.07	6.37	9.66	6.02	-1.33
Гусятинський	5.52	9.47	7.86	0.30	6.50	9.56	7.39	0.40	6.68	9.62	7.45	0.01
Заліщицький	4.62	9.46	7.39	0.12	6.09	9.56	6.65	-0.19	6.49	9.55	6.69	-0.39
Збаразький	6.39	9.45	7.78	0.05	6.83	9.59	7.68	0.41	6.94	9.63	8.00	0.32
Зборівський	5.31	9.49	7.44	-0.10	5.68	9.54	7.06	0.47	5.53	9.60	7.09	0.56
Козівський	6.40	9.53	7.81	-0.14	6.44	9.64	7.67	0.41	6.75	9.67	8.00	0.35
Кременецький	5.55	9.54	7.88	0.15	5.12	9.65	7.72	0.99	6.35	9.69	7.75	0.31
Лановецький	6.32	9.51	8.76	0.88	6.37	9.66	8.51	1.21	6.92	9.60	8.66	1.12
Монастирський	4.45	9.55	7.45	0.01	5.86	9.63	6.71	-0.28	5.57	9.59	7.28	0.72
Підволочиський	6.94	9.53	8.41	0.30	7.62	9.63	7.85	0.07	7.47	9.65	7.83	-0.29
Підгаєцький	3.72	9.43	6.95	0.01	4.77	9.52	4.82	-1.29	4.30	9.45	4.65	-0.52
Теребовлянський	6.79	9.48	7.68	-0.23	6.61	9.59	7.83	0.65	7.08	9.60	8.02	0.37
Тернопільський	7.77	9.71	8.47	-0.34	8.27	9.87	8.78	-0.14	8.53	9.91	8.97	-0.77
Чортківський	6.75	9.59	8.54	0.33	6.62	9.75	8.46	0.69	7.12	9.80	9.01	0.67
Шумський	6.11	9.54	7.13	-0.76	6.62	9.65	5.55	-1.84	6.38	9.63	5.54	-1.73
Середнє	5.89	9.53	7.80	0.00	6.43	9.65	7.32	0.00	6.56	9.66	7.49	0.00
Параметр	a	b	c	R^2	a	b	c	R^2	a	b	c	R^2
Оцінка	0.28	2.63	-18.89	0.68	0.44	3.67	-30.92	0.58	0.73	3.29	-29.03	0.77
Похибка	0.12	2.09	19.57		0.26	2.66	24.88		0.28	2.38	21.79	

Для економічної ефективності важливі інституції, якими в інформаційну еру є вищі навчальні заклади (ВНЗ). В м. Тернопіль працюють 15 ВНЗ – Тернопільський державний медичний університет імені І.Я. Горбачевського, Тернопільський

Таблиця 4.27. Значення оцінок параметрів a , b , c функції Кобба–Дугласа $Y_t = (e)^c (K_t)^a (L_t)^b$ та їхніх похибок, залишків R_{ij} регресії, множинного коефіцієнта детермінації R^2 для кварталу t

	$\ln K$	$\ln L$	$\ln Y$	R_{ij}	$\ln K$	$\ln L$	$\ln Y$	R_{ij}	$\ln K$	$\ln L$	$\ln Y$	R_{ij}
Район/Період	2017:IV	2017:IV	2017:IV	2017:IV	2018:I	2018:I	2018:I	2018:I	2018:III	2018:III	2018:III	2018:III
м.Тернопіль	8.40	9.89	9.90	0.41	7.73	9.88	9.93	1.39	8.09	10.04	9.85	1.47
м.Бережани	6.72	9.80	7.87	0.14	5.09	9.73	7.63	0.66	6.44	9.89	7.80	0.47
м.Кременець	7.12	9.68	6.59	-1.10	6.18	9.74	6.32	-1.19	6.83	9.79	6.56	-0.96
м.Чортків	6.57	9.84	8.35	0.63	5.15	9.78	8.51	1.40	6.24	9.96	8.75	1.51
Бережанський	5.65	9.66	6.70	0.38	4.29	9.70	5.99	-0.54	6.60	9.75	6.73	-0.63
Борщівський	6.92	9.65	8.02	0.60	5.69	9.63	7.89	0.85	6.38	9.73	8.13	0.91
Бучацький	6.94	9.71	6.28	-1.35	6.88	9.79	6.10	-1.84	6.91	9.99	6.52	-1.13
Гусятинський	7.09	9.76	9.28	1.35	6.78	9.70	8.25	0.56	7.35	9.85	8.18	0.32
Заліщицький	6.98	9.57	6.46	-0.75	6.69	9.66	6.42	-1.16	6.51	9.77	6.62	-0.70
Збаразький	6.82	9.75	8.84	1.18	6.17	9.72	8.08	0.61	6.99	9.81	8.33	0.71
Зборівський	6.50	9.61	7.47	0.53	6.13	9.62	6.98	-0.23	5.67	9.77	7.37	0.55
Козівський	6.99	9.83	8.95	0.89	6.72	10.03	7.90	-0.51	7.43	10.29	8.80	0.71
Кременецький	6.43	9.70	7.45	0.32	5.44	9.67	7.53	0.52	6.01	9.86	7.68	0.61
Лановецький	7.01	9.66	8.24	0.72	5.55	9.70	8.02	0.89	8.26	9.94	8.36	-0.08
Монастирський	5.89	9.67	7.03	0.46	4.04	9.67	6.27	-0.07	6.47	9.73	7.18	-0.10
Підволочиський	7.76	9.75	8.24	-0.21	6.74	9.74	7.55	-0.22	7.69	9.94	8.31	0.21
Підгаєцький	5.73	9.61	4.67	-1.56	0.51	9.86	4.97	-0.17	7.23	10.17	5.21	-2.71
Теребовлянський	7.64	9.70	8.00	-0.20	6.61	9.74	7.54	-0.16	7.28	9.80	7.84	0.05
Тернопільський	8.35	10.07	9.08	-0.93	8.55	9.96	8.91	-0.20	8.80	10.13	9.28	0.44
Чортківський	7.92	9.99	10.13	0.77	7.40	9.86	8.99	0.64	7.63	10.01	8.54	0.44
Шумський	6.89	9.89	5.87	-2.28	5.42	9.72	5.88	-1.23	7.04	9.83	5.59	-2.07
Середнє	6.97	9.75	7.78	0.00	5.89	9.76	7.41	0.00	7.04	9.91	7.70	0.00
Параметр	a	b	c	R^2	a	b	c	R^2	a	b	c	R^2
Оцінка	0.88	3.20	-29.51	0.71	0.47	2.24	-17.22	0.69	0.60	0.43	-0.75	0.43
Похибка	0.40	2.35	21.20		0.13	2.01	19.42		0.40	1.98	18.15	

національний економічний університет (ТНЕУ) і його коледж економіки, права та інформаційних технологій, Тернопільський національний педагогічний університет імені Володимира Гнатюка, Тернопільський національний технічний університет (ТНТУ) імені Івана Пулюя та його технічний коледж, приватний ВНЗ «Тернопільський інститут соціальних та інформаційних технологій», Тернопільський інститут ПрАТ «Вищий навчальний заклад «Міжрегіональна Академія управління персоналом», Галицький коледж імені В'ячеслава Чорновола, коледж харчових технологій і торгівлі, приватний ВНЗ

«Медичний коледж», коледж ВНЗ «Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна», кооперативний торговельно-економічний коледж, вище професійне училище ресторанного сервісу і торгівлі, державне музичне училище імені С. Крушельницької.

В м. Тернопіль зареєстроване, але не оприлюднює інформацію на сайті www.vstup.info відділення Навчально-наукового інституту заочного та дистанційного навчання. У м. Бережани працює агротехнічний інститут Національного університету біоресурсів і природокористування (НУБіП) України. У м. Гусятин працює коледж ТНТУ, а в м. Борщів працює агротехнічний коледж. У м. Чортків працюють 4 ВНЗ – навчально-науковий інститут підприємництва і бізнесу і коледж економіки та підприємництва ТНЕУ, медичний коледж, гуманітарно-педагогічний коледж імені Олександра Барвінського. Отже, у кластері 1) працюють 16 ВНЗ, а в кластері 2) – 6 ВНЗ.

Поза кластерами працюють 11 ВНЗ: у м. Кременець – лісотехнічний коледж (с. Білокриниця), гуманітарно-педагогічна академія імені Тараса Шевченка та її педагогічний коледж, медичне училище імені Арсена Річинського; у м. Бучач – приватний ВНЗ «Бучацький інститут менеджменту і аудиту» та його коледж економіки, управління та інформатики, коледж Подільського державного аграрно-технічного університету (с. Трибухівці); у м. Тербовля – вище училище культури, у м. Підгайці – приватний ВНЗ «Галицький медичний коледж», у м. Зборів – коледж ТНТУ, у м. Заліщики – аграрний коледж імені Є. Храпливого НУБіП. Таким чином, 10 з 21 району Тернопільщини не мають ВНЗ.

У табл. 4.22 для Підгаєцького району дані C_t за періоди 2018:I і 2018:II не оприлюднювалися, але генерувалися, виходячи з агрегованих даних Тернопільщини. Тому у табл. 4.27 значення R^2 за ці періоди виявилось нижчим.

Таблиця 4.28. Експорт $E_{um} = \sum_{t=I}^u E_{tm}$ і максимальний квартальний експорт M_m (тис.

дол.) Тернопільщини за групами $m=0, \dots, 99$ за період 2017_у перших $u=I, II, III, IV$ кварталів року [217–223], світовий експорт W_m (млрд. дол.) за 2017 р. [195]

m/T	Сумарний експорт E_{um}						Квартальний експорт E_{tm}				M_m	$4M_m$	W_m
	2017:I	2017 II	2017 IV	2018:I	2018 II	2018 III	2017:II	2017:IV	2018:II	2018:III	Квартал	Рік	2017
0	92557	164714	380193	115723	229421	334844	72156	117361	113699	105422	117361	469446	17581
85	31876	67339	152709	45959	97245	136072	35463	46784	51286	38827	51286	205144	2566
84	627	1032	2132	621	1474	2177	404	495	853	703	853	3413	2082
27													1954
87	47	95	179	63	113	153	48	48	49	40	63	254	1440
71	1259	2877	5613	2087	3965	5354	1618	1835	1878	1389	2087	8348	636
39	1784	3763	7664	2347	4362	6436	1979	1839	2015	2074	2347	9389	595
90	177	286	511	111	272	410	108	82	161	137	177	710	577
30	193	321	612	56	122	184	128	136	66	62	193	771	534
29	11	30	59	31	54	72	19	19	24	18	31	122	381
72	302	583	1434	707	1099	1543	281	289	391	445	707	2830	372
88													327
99													321
73	364	908	2079	663	1560	2516	544	499	897	956	956	3824	283
26													259
94	2089	4724	16252	4637	10751	18453	2635	5429	6114	7703	7703	30810	243
62	1281	2362	4546		2620	3734	1080	1132	2620	1114	2620	10479	228
61	20	20	190		86	214	0	32	86	128	139	554	226
38		1	3	1	1	5	1	0	1	4	4	15	189
40	4	5	14	13	42	56	1	3	30	14	30	118	185
76	1	4	23	10	46	58	3	2	36	12	36	145	177
48	65	353	943	136	521	1052	289	89	386	531	531	2123	162
74	0	0	6	6	10	10	0	4	4	0	6	22	147
64													144
44	3150	6429	12145	3394	6763	9912	3279	2710	3369	3149	3394	13576	136
89													135
33	6	12	22		38	38	6	0	38	0	38	151	128
2	5578	12631	31408	7347	17648	27574	7054	10730	10300	9927	10730	42919	125
3													119
95	261	1040	2492	417	1324	2604	779	401	907	1280	1280	5118	116
8	125	223	1201	91	441	1475	98	284	350	1034	1034	4136	116
22	0	0	1	6	9	23	0	0	3	15	15	58	115
28													112
10	18295	25495	54522	23838	43856	52824	7200	20191	20018	8968	23838	95350	103
15	5837	9019	13779	3260	4880	8367	3182	1417	1620	3487	5837	23348	99
12	4061	4922	24312	8619	9507	23492	861	9673	888	13985	13985	55939	98
4	753	1559	5980	1388	2540	3681	806	2106	1152	1141	2316	9263	85
32	0	0	10				0	10			10	39	80
42	3	8	16	7	11	14	5	4	5	2	7	27	78
7	258	831	2227	153	172	281	573	1220	18	110	1220	4879	72
70	118	188	338	51	148	232	70	72	97	85	118	472	72
19	105	297	543	166	514	779	192	100	348	265	348	1393	71
23	1893	3105	4768	351	705	950	1212	739	354	245	1893	7572	70

За даними Міжнародного центру торгівлі [195], загальний світовий експорт знижувався за основними групами товарів (відповідно до класифікації Гармонізованої системи [196]) з 2014 р. У табл. 4.28, 4.29 наведено значення W_m світового експорту для кожної групи m товарів. Групи впорядковані за рівнем експорту 2017 р., де групі 0 відповідає сумарний експорт $\sum_{m=1}^{99} W_m$. Оскільки максимальний експорт $M_m = \max_t E_{tm}$ є досяжним, то досяжним є річний експорт $4M_m$ групи m .

Тоді досяжним є сумарний річний експорт $M = 4 \sum_{m=1}^{99} M_m = 0,623$ млрд. дол. Це

на 64% перевищує експорт $E_{IV0} = \sum_{m=1}^{99} E_{IVm} = 0,380$ млрд. дол. Тернопільщини у 2017 р. і задає досяжну структуру експорту. У табл. 4.29 не вказані дані за групами 45, 50, 66, 36, 80, 92, 13, 67, 78, 51, 37, 93, 79, 75, 86, 24, 54, 47, 16, які у 2017–2018 рр. вважаються нульовими і неперіоритетними через низьку місткість їхніх світових ринків.

Стабілізація квартальних обсягів експорту на досяжних рівнях усіх товарних груп і започаткування експорту за групами 27, 88, 99, 26, 64, 89, 3, 28 з високою місткістю світових ринків, спираючись на розробки НАН України і своїх ВНЗ, дозволить розвивати економіку Тернопільщини.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі досліджено децентралізовані системи, проаналізовано та розроблено механізми підвищення їх ефективності на основі математичних алгоритмів та моделей, застосовано запропоновані рішення на реальних економічних даних регіонів України. В якості децентралізованих систем досліджено мережі ланцюгів постачання, інформаційно-комунікаційні мережі, ринок інноваційного продукту (на прикладі вакцини проти COVID-19), розвиток регіонів країни за стратегії економічної децентралізації.

Отримано наступні наукові та практичні результати:

1. Розроблено ігрову модель мережі ланцюгів постачання, що складається з ряду роздрібних торговців продуктом і ряду ринків збуту даного продукту, де роздрібні торговці некооперативно конкурують, максимізуючи свої сподівані прибутки шляхом визначення своїх оптимальних трансакцій для продукту, а також оптимальних інвестицій у кібербезпеку, які входять у нелінійні бюджетні обмеження. Встановлено що для розв'язання задачі пошуку рівноважних інвестицій у кібербезпеку мережі ланцюгів постачання можна запропонувати ітеративний алгоритм, який на кожній ітерації дає в явному вигляді співвідношення для трансакцій продукту, рівнів безпеки та множників Лагранжа, пов'язаних з бюджетними обмеженнями.

2. Вперше обґрунтовано застосування дифузійної моделі інновацій Басса до поширення вакцинацій. Отримано формулу, яка дозволяє оцінити очікувану тривалість часу до моменту первинної закупівлі інноваційного товару (отримання вакцини проти COVID-19) довільно обраним покупцем (громадянином). Враховано вплив покупців-новаторів, які приймають рішення придбати (застосувати) інноваційний продукт відразу з його появою, а також вплив покупців-наслідувачів, які приймають рішення, щодо купівлі (застосування) інноваційного продукту з певним лагом, після того як інноваційний продукт

насичує ринок та з'являється більше інформації й відгуків щодо нього від покупців-новаторів.

3. Встановлено функцію реакції послідовника (провайдера Інтернет сервісу) на рішення лідера (контент провайдера). Враховуючи такі основні параметри як ціну послуги, частку доходу контент провайдера, обсяг ринку, витрати на одиницю розширення та обслуговування спроможності мережі провайдер Інтернет сервісу вирішує якою мірою розширити спроможність наявної мережі.

4. Розроблено алгоритм оцінки ефективності та алгоритм пошуку оптимальної структури експорту регіону. Запропоновані алгоритми лежать в основі механізмів підвищення економічної ефективності регіонів, зокрема шляхом запозичення кращих практик управління районів лідерів, інвестиції яких, для прикладу, в покращену логістичну інфраструктуру сприяють пожвавленню підприємницької діяльності, а інвестиції в освіту мають за результат гарно підготовлений кваліфікований кадровий потенціал. Інший аспект успішного стратегічного розвитку – прозорість та налагодження відносин з потенційними інвесторами та відповідний пошук нереалізованих експортних можливостей регіону. Загалом, створення сприятливих умов ведення бізнесу та прояву підприємницької ініціативи.

5. На основі розроблених алгоритмів та аналізу реальних макроекономічних даних знайдено райони лідери Тернопільщини, Кіровоградщини та Луганщини. Також, оцінено експортний потенціал даних регіонів. Дослідження та оцінки на реальних емпіричних даних виконано в рамках проекту Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України «Розробка програмно-комп'ютерних засобів поквартального оцінювання економічної ефективності та цільової структури експорту регіонів України» відділу математичних методів дослідження операцій (номер державної реєстрації 0118U0017306).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Gorbachuk V., Dunaievskyi M., Suleimanov S.-B. Modeling of agency problems in complex decentralized systems under information asymmetry. *IEEE Conference on Advanced Trends in Information Theory* (December 18–20, 2019, Kyiv, Ukraine). Kyiv: Taras Shevchenko National University of Kyiv, 2019. P. 449–454.
DOI: 10.1109/ATIT49449.2019.9030498
2. Gorbachuk V.M., Dunaievskyi M.S., Syrku A.A., Suleimanov S.-B. Substantiating the diffusion model of innovation implementation and its application to vaccine propagation. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2022, January. Vol. 58. No. 1. P. 84–94.
DOI: 10.1007/s10559-022-00438-1
3. Gorbachuk V., Dunaievskyi M. Nash equilibrium and its modern applications. *Modern optimization methods for decision making under risk and uncertainty*. A.A. Gaivoronski, P.S. Knopov, V.A. Zaslavskyi (eds.) Boca Raton, FL: CRC Press, 2023. P. 196–224.
DOI: 10.1201/9781003260196
4. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Морозов О.О. Рівноважні інвестиції у кібербезпеку мережі ланцюгів постачання. *Вісник Київського університету. Серія: фізико-математичні науки*. 2017. № 2. С. 47–52.
DOI: 10.32626/2308-5916.2019-19.31-37
5. Горбачук В.М., Гавриленко С.О., Голоцуков Г.В., Дунаєвський М.С., Ніколенко Д.І. До інтегрованого менеджменту і фінансового забезпечення інфраструктури охорони здоров'я районів Запоріжчини. *Кібернетика та комп'ютерні технології*. 2020. № 4. С. 87–99.
DOI: 10.34229/2707-451X.20.4.6
6. Дунаєвський М.С., Лефтеров О.В., Большаков В.М. Використання загальнодоступного програмного забезпечення у моделюванні епідеміологічних трендів. *Кібернетика та комп'ютерні технології*. 2020. № 3. С. 32–42.
DOI: 10.34229/2707-451X.20.3.4

7. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Сулейманов С.-Б. Прогнозування ефективності багатокомпонентних обчислювальних систем. *Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології*. 2021. 32. С. 96–100.

DOI: 10.15407/fmmit2021.32.096

8. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Сулейманов С.-Б., Батіг Л.О., Симонов Д.І. Моделі прийняття рішень на ринку хмарних послуг. *Кібернетика та комп'ютерні технології*. 2021. № 3. С. 53–64.

DOI: 10.34229/2707-451X.21.3.5

9. Гайворонський О.О., Горбачук В.М., Дунаєвський М.С. Стратегічна взаємодія провайдерів диференційованих Інтернет-послуг. *Проблеми керування та інформатики*. 2021. № 6. С. 102–113.

DOI: 10.34229/1028-0979-2021-6-10

10. Горбачук В.М., Голоцуков Г.В., Дунаєвський М.С., Сирку А.А., Сулейманов С.-Б. Теоретико-ігрові та оптимізаційні моделі і методи підвищення безпеки кіберінфраструктур. *Проблеми керування та інформатики*. 2022. № 2. С. 92–105.

DOI: 10.34229/2786-6505-2022-2-6

11. Gaivoronski A., Gorbachuk V., Dunaievskyi M., Suleimanov S.-B. Digital platforms to close the information asymmetry gaps. *Проблеми керування та інформатики*. 2022. № 6. P. 67–82.

<https://jais.net.ua/index.php/files/article/view/64/186>

12. Bidyuk P., Kuznietsova N. Integrated Approach to Financial Data Analysis, Modeling and Forecasting. *System Analysis & Intelligent Computing. Studies in Computational Intelligence*. 2022. Zgurovsky M., Pankratova N. (eds). Vol. 1022. Springer, Cham. P. 315–337.

13. Dovbysh, A.S., Budnyk, M.M., Piatachenko, V.Y. et al. Information-Extreme Machine Learning of On-Board Vehicle Recognition System. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2020. V. 56. P. 534–543. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10559-020-00269-y>

14. Глушков В.М. Основы безбумажной информатики. Изд. 2-е, испр. М.:

Наука, 1987. 552 с.

15. Bazilevych K.O., Chumachenko D.I., Hulianytskyi L.F., Menialov I.S., Yakovlev S.V. Intelligent decision-support system for epidemiological diagnostics. I. A concept of architecture design. *Cybernetic and System Analysis*. 2022. Vol. 58. No. 3. P. 343–353. DOI: 10.1007/s10559-022-00466-x
16. Zaslavskyi, V., Pasichna, M. Optimization Techniques for Modelling Energy Generation Portfolios in Ukraine and the EU: Comparative Analysis. In: Zamojski, W., Mazurkiewicz, J., Sugier, J., Walkowiak, T., Kacprzyk, J. (eds) *Contemporary Complex Systems and Their Dependability*. DepCoS-RELCOMEX. 2018. Advances in Intelligent Systems and Computing. Vol 761. Springer, Cham. P. 545–555. DOI: 10.1007/978-3-319-91446-6_51
17. Кирилюк В.С. Поліедральна когерентна міра ризику та робастна за розподілом оптимізація портфеля. *Кібернетика та системний аналіз*. 2023. Т. 59 (№1). С. 85–103.
18. Кнопов П.С. Асимптотические свойства некоторого класса М-оценок. *Кібернетика и системный анализ*. 1997. № 4. С. 10–27.
19. Kuzmenko V., Chikrii G. Solving the soft convergence problem for controlled oscillatory systems based on the time dilation principle. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2023. Т. 59 (N. 3). P. 428–438.
20. Letychevskyi, O.O. et. al. Modeling Method for Development of Digital System Algorithms Based on Programmable Logic Devices. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2020. N. 56(5). P. 710-717. DOI: 10.1007/s10559-020-00289-8
21. Волошин О.Ф., Мащенко С.О. Моделі та методи прийняття рішень: навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів. 2010. К: «Київський університет», 2010. 336с.
22. Ermoliev Y.M., Ermolieva T.Y., MacDonald G.J., Norkin V.I. Stochastic optimization of insurance portfolios for managing exposure to catastrophic risks. *Annals of operations research*. 2000. Vol. 99(1). P. 207–225.

23. Lebedeva T.T., Semenova N.V., Sergienko T.I. Multi-objective optimization problem: Stability against perturbations of input data in vector-valued criterion. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2020. Vol. 56(6). P. 953–958. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10559-020-00315-9>
24. Сергиенко И.В., Михалевич М.В., Стецюк П.И., Кошлай Л.Б. Модели и информационные технологии для поддержки принятия решений при проведении структурно-технологических преобразований. *Кибернетика и системный анализ*. 2009. № 2. С. 26–49.
25. Стецюк П.И., Стовба В.О., Жмуд О.О. Про швидкість збіжності субградієнтних методів з кроком Поляка. *Науковий вісник Ужгородського університету. Серія: Математика і інформатика*. 2019. В.1. С. 94–101.
26. Пепеляев В.А., Голодніков О.М., Голоднікова Н.О. Моделювання квантилей розподілу ймовірностей врожайності в умовах зміни клімату (на прикладі кукурудзи). *Кибернетика та комп'ютерні технології: Збірник наукових праць*. 2020. № 1. С. 53–61. DOI: 10.34229/2707-451X.20.1.6
27. Kalenchuk-Porkhanova A., Tulchinsky V. Solving environmental problems according to the concept of sustainable development of the earth. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2021. T. 57. N.4. P. 638–646.
28. Дунаєвський М.С. Перспективи використання алгоритмів машинного навчання в системах підтримки прийняття рішень в сфері роздрібної торгівлі. *Штучний інтелект та інтелектуальні системи* (17–18 жовтня 2017 р., Київ, Україна). Київ. 2017. С. 63–66.
29. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Сулейманов С.-Б., Аллахвердієв А. Динаміка індексів виявленої порівняльної переваги Луганщини за групами товарів у 2011–2016 роках. *Глобальні виміри захисту економічної конкуренції* (27 жовтня 2017 р., Київ, Україна). Київ: Центр комплексних досліджень з питань антимонопольної політики, 2017. С. 27–30.
30. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Сирку А.А., Сулейманов С.-Б. Економіка

кібербезпеки. *Інформаційні технології та взаємодії* (8–10 листопада 2017 р., Київ, Україна). Київ: КНУ імені Т. Шевченка, 2017. С. 207–208.

31. Горбачук В.М., Макаренко О.С., Самородов Є.Л., Дунаєвський М.С., Сирку А.А., Сулейманов С.-Б. До інтегрованих систем візуалізації, аналізу та застосування часово-просторових даних. *Глушковські читання* (13 грудня 2017 р., Київ, Україна). Київ: НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського», 2017. С. 35–37.

32. Горбачук В.М., Макаренко О.С., Дунаєвський М.С., Новодережкін В.І., Сулейманов С.-Б. Вимірювання економічної ефективності регіонів України за перші квартали 2017 р. *Сучасна інформатика: проблеми, досягнення та перспективи розвитку* (13–15 грудня 2017 р., Київ, Україна). Київ: Інститут кібернетики імені В.М.Глушкова НАН України, 2017. С. 258–260.

33. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Сирку А.А., Сулейманов С.-Б. Особливості державних оборонних замовлень. *Глобальні виміри захисту економічної конкуренції* (28 лютого 2018 р., Київ, Україна). Київ: Центр комплексних досліджень з питань антимонопольної політики, 2018. С. 36–39.

34. Gorbachuk V.M., Dunaievskiy M.S., Suleimanov S.-B. The Golden rule for overlapping generations. *Nonlinear analysis and applications* (April 12, 2018, Kyiv, Ukraine). Kyiv: NTUU «KPI», 2018. P. 24.

35. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Сулейманов С.-Б. Алгоритми збільшення ефективності та експорту регіонів України. *Інноваційні ідеї в економічній науці: пошуки вирішення сучасних проблем* (19–20 квітня 2018 р., Київ, Україна). Київ: Знання України, 2018. С. 40–44.

36. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Сулейманов С.-Б. Обчислення оптимальної спеціалізованої експортної структури регіону. *Інформаційно-комп'ютерні технології – 2018* (20 квітня 2018 р., Житомир, Україна). Житомир: Житомирський державний технологічний університет, 2018. С. 61–62.

37. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Сулейманов С.-Б. Алгоритми охоплення даних для підвищення економічної ефективності й експорту держави та її регіонів.

Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання (14–19 травня 2018 р., Івано-Франківськ, Україна). Івано-Франківськ: Прикарпатський національний університет імені В.Стефаника, 2018. С. 109–112.

38. Горбачук В.М., Кошулько А.І., Дунаєвський М.С. Питання асиметрії інформації та несприятливого відбору в організації охорони здоров'я. *Здоров'я і суспільні виміри в академічному просторі та поза ним* (23 травня 2018 р., Київ, Україна). Київ: НаУКМА, 2018. С. 27–29.

39. Gorbachuk V., Dunaievskiy M., Morozov O. The method of finding target export structure. *PDMU* (July 3–8, 2018, Lankaran–Baku, Azerbaijan). Kyiv: Taras Shevchenko University of Kyiv, 2018.

40. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Сулейманов С.-Б. Математичне моделювання міжнародної конкуренції. *Матеріали ХІХ міжнародної конференції з математичного моделювання, присвяченої 250-річчю з дня народження Жана Батиста Жозефа Фур'є* (17–21 вересня 2018 р., Херсон, Україна). Херсон: Херсонський національний технічний університет, 2018. С. 10.

41. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Сулейманов С.-Б. До розв'язання проблеми ефективності й рівності. *Контроль і управління в складних системах* (15–17 жовтня 2018 р., Вінниця, Україна). Вінниця: ВНТУ, 2018. С. 61.

42. Dunaievskiy M.S., Suleimanov S.-B. Dynamic assessment of economic efficiency in territorial-administrative units. *Modelare matematica, optimizare si tehnologii informationale* (November 12–16, 2018, Chisinau, Moldova). Chisinau, Moldova: Academia de transporturi, informatica si comunicatii, 2018.

43. Горбачук В.М., Кошулько А.І., Дунаєвський М.С. Залежність рівнів безпеки, ціни й вартості ядерної енергії. *Проблеми сучасної ядерної енергетики* (14–16 листопада, Харків, Україна). Харків: Харківський національний університет імені В.Н.Каразина, 2018. С. 49–50.

44. Горбачук В.М., Колесник Ю.С., Шпиґа С.П., Дунаєвський М.С. Алгоритм поквартального оцінювання економічної ефективності районів і міст регіону

України. *Інформаційні технології та взаємодії* (20–21 листопада 2018 р., Київ, Україна). Київ: КНУ КНУ імені Т.Шевченка, 2018. С. 344–345.

45. Дунаєвський М.С. Від ЗДАС до Розумної Держави (smart state). *Історія, сьогодення та перспективи розвитку інформаційних технологій в Україні та світі. Глушковські читання* (21 листопада 2018 р., Київ, Україна). Київ: НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського», 2018. С. 45.

46. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С. Аналіз результатів оцінювання динаміки економічної ефективності та експорту регіонів України за допомогою програмно-комп'ютерних засобів. *Нейронауки та когнітивні системи в економіці* (19 лютого 2019 р., Київ, Україна). Київ: НаУКМА, 2019. С. 7–10.

47. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Сулейманов С.-Б. До ефективності торгівлі високотехнологічною продукцією. *Інноваційні ідеї в економічній науці: пошуки вирішення сучасних проблем* (11–12 квітня 2019 р., Київ, Україна). Київ: НаУКМА, 2019. С. 22–24.

48. Горбачук В.М., Єрмольєв Ю.М., Єрмольєва Т.Ю., Дунаєвський М.С. Застосування квантильної регресії для оцінювання еколого-економічних ризиків. *Обчислювальний інтелект* (15–20 квітня 2019 р., Ужгород, Україна). Ужгород: УжНУ, 2019. С. 188–189.

49. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Сирку А.А., Сулейманов С.-Б. До розробки сучасних конкурсів. *Теорія прийняття рішень* (15–20 квітня 2019 р., Ужгород, Україна). Ужгород: УжНУ, 2019. С. 15–16.

50. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Сулейманов С.-Б. Аналіз ланцюгів вартості на основі нових технологій енергонакопичення. *Удосконалювання енергоустановок методами математичного і фізичного моделювання* (8–10 жовтня 2019 р., Харків, Україна). Секція 3. Харків: Інститут проблем машинобудування імені А.М.Підгорного НАН України, 2019. С. 20–21.

51. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С. До економічної організації децентралізації. *Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем* (20–22

- листопада 2019 р., Дніпро, Україна). Дніпро: ДНУ імені О.Гончара, 2019. С. 69–70.
52. Дунаєвський М.С., Таран Л.О. Порівняльний аналіз ролі фактору водних ресурсів для економіки районів Дніпропетровщини та Запоріжчини. *Тенденції розвитку публічних та корпоративних секторів економіки України в умовах макроекономічної нестабільності* (29 січня 2020 р., Київ, Україна). Київ: НаУКМА, 2020. С. 34–36.
53. Дунаєвський М.С. Оцінка готовності Одещини до пом'якшення карантинних антисоvіd-19 заходів. *Проблеми міжнародної міграції: оцінка та перспективи вирішення* (16 травня 2020 р., Одеса, Україна). Одеса: ОНУ імені І.І. Мечникова, 2020. С. 115–119.
54. Горбачук В., Гавриленко С., Голоцуков Г., Дунаєвський М. Засади розвитку хмарних технологій. *Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання* (18–19 травня 2020 р., Івано-Франківськ, Україна). Івано-Франківськ: Прикарпатський національний університет імені В.Стефаника, 2020. С. 82–83.
55. Dunaievskiy M.S., Lefterov O.V. Epidemiological trends: models and software. *International Conference High Performance Computing HPC-UA 2020* (November 6–7, 2020, Kyiv, Ukraine). Kyiv, Ukraine: NTUU «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», 2020.
56. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Морозов О.О. Лідерство в сучасних ланцюгах постачання. *Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем* (18–20 листопада 2020 р., Дніпро, Україна). Дніпро: ДНУ імені О.Гончара, 2020.
57. Дунаєвський М.С. Кібернетика та методи біоінформатики в сфері охорони здоров'я. *Глушковські читання* (18 грудня 2020 р., Київ, Україна). Київ: КНУ імені Т.Шевченка, 2020. С. 58–61.
58. Gorbachuk V., Dunaievskiy M., Syrku A. Epidemic effects in network industries. *International Conference on Software Engineering* (April 12–14, 2021, Kyiv, Ukraine). Kyiv: National Aviation University, 2021. P. 68–72.
59. Горбачук В., Гавриленко С., Дунаєвський М. До участі України в

Європейській хмарі відкритої науки. *Global and regional problems of informatization in society and nature using 2021* (May 13–14, 2021, Kyiv, Ukraine). Kyiv: National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, 2021. P. 169–171.

60. Dunaievskiy M. Suleimanov S.-B. The target function for economic-ecological system at high risk *Modern Stochastics: Theory and Applications V* (June 1–4, 2021, Kyiv, Ukraine). Kyiv: Taras Shevchenko National University of Kyiv, 2021. P. 66.

61. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Сулейманов С.-Б., Симонов Д.І., Батіг Л.О. Обчислення рівноважного внеску до мережевої громади. *Actual problems of fundamental science* (June 1–5, 2021, Lutsk, Ukraine). Lutsk: Lesya Ukrainka Volyn National University, 2021. P. 160–163.

62. Горбачук В., Голоцуков Г., Дунаєвський М., Ніколенко Д. Машинне навчання та прийняття рішень. *Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання* (5–10 липня 2021 р., Івано-Франківськ, Україна). Івано-Франківськ: Прикарпатський національний університет імені В.Стефаника, 2021. С. 92–93.

63. Горбачук В., Дунаєвський М., Батіг Л. Нова енергетика й економічні зміни. *Економіка. Фінанси. Бізнес. Парадигмальні зрушення в економічній теорії XXI ст.* (28 вересня – 1 жовтня 2021р., Київ, Україна) А.І. Ігнатюк (ред.) Київ: КНУ імені Т.Шевченка, 2021. С. 45–47.

64. Дунаєвський М.С. Емпіричні середні в задачах стохастичного програмування. *Інтелектуальні рішення* (29 вересня 2021 р., Київ, Україна). В.Є. Снитюк (ред.). Київ – Ужгород: КНУ імені Т.Шевченка, 2021. С. 111–112.

65. Dunaievskiy M.S. Optimal inventory management in condition of uncertainty. *Mathematical Modeling, Optimization and Information Technologies* (November 15–19, 2021, Chisinau (Moldova), Kyiv (Ukraine), Batumi (Georgia)). Chisinau: Moldova State University; Kyiv: V.M.Glushkov Institute of Cybernetics of the NAS of Ukraine; Batumi: Batumi Shota Rustaveli State University, 2021. P. 47–50.

66. Дунаєвський М.С. Оптимальне управління запасами як складова автоматизованого організаційного управління. *Глушковські читання* (2 грудня

2021, Київ, Україна). Київ: НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», 2021. С. 80–83.

67. Gorbachuk V.M., Dunaievskyi M.S., Suleimanov S.-B., Batih L.O. To advanced technologies of modern conflict. *Nonlinear analysis and applications. applications* (April 4–6, 2022, Kyiv, Ukraine). Kyiv: NTUU «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», 2022. P. 23.

68. Горбачук В.М., Бардадим Т.О., Лупей М.І., Ніколенко Д.І., Дунаєвський М.С., Сулейманов С.-Б., Батіг Л.О., Симонов Д.І. Інноваційні технології великих даних для підвищення безпеки АЕС. *Перспективи впровадження інновацій у атомну енергетику* (30 вересня 2022 р., Київ, Україна). Київ: Українське ядерне товариство, 2022. С. 15–16.

69. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С. Математичні моделі підвищення ефективності децентралізованих систем та їх застосування. *Проблеми вищої математичної освіти: виклики сучасності* (11–12 жовтня 2022 р., Вінниця, Україна). Вінниця: Вінницький національний політехнічний університет, 2022. 13 с.

70. Gaivoronski A., Gorbachuk V., Dunaievskyi M., Suleimanov S.-B. Digital platforms to deal with the information asymmetry problem. *Information Technology and Implementation* (December 01, 2022, Kyiv, Ukraine). V.Snytyuk (ed.). Kyiv: Taras Shevchenko National University of Kyiv, 2022. P. 44–45.

71. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Сирку А.А., Сулейманов С.-Б. Оптимізаційні питання оцінювання щільності на реальних даних. *Штучний інтелект*. 2017. № 3-4. С. 101–110.

72. Кнопов П.С., Горбачук В.М., Кирилюк В.С., Атоєв К.Л., Дунаєвський М.С., Сирку А.А. Інтелектуальні засоби поквартального оцінювання економічної ефективності й цільової структури експорту у 2017–2018 рр. на прикладі Київщини. *Штучний інтелект*. 2018. 3. С. 111–125.
<http://dspace.nbuu.gov.ua/handle/123456789/162450>

73. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Морозов О.О. Характеристики рівноваг

ланцюгів постачання. *Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: технічні науки*. 2019. Вип. 19. С. 31–37.

DOI: 10.32626/2308-5916.2019-19.31-37

74. Gorbachuk V., Dunaievskiy M., Suleimanov S.-B. An interdisciplinary approach to the security of modern energy. *Modern approaches to ensuring sustainable development*. V.Smachylo, O.Nestorenko (eds.) Katowice, Poland: University of Technology, Katowice, 2023. P. 142–149.

75. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Сулейманов С.-Б. Управління та адміністрування в сфері послуг охорони здоров'я. *Management and administration in the field of services: selected examples*. Т.Pokusa, Т.Nestorenko (eds.) Opole: Academy of Management and Administration, 2020. P. 268–279.

76. Dunaievskiy M. Applied mathematics for optimal economic and healthcare benefits trade-off. Improving living standards: current opportunities and limitations. *Improving living standards: current opportunities and limitations*. W.Duczmal, I.Ostopolets (eds.) Opole: Academy of Management and Administration, 2020. P. 266–276.

77. Горбачук В.М., Лупей М.І., Дунаєвський М.С. Підходи до резильєнтності критичних інфраструктур. *Science and education for sustainable development*. A.Ostenda, V.Smachylo (eds.) Katowice, Poland: University of Technology, Katowice, 2022. P. 87–95.

78. Горбачук В.М., Лупей М.І., Ніколенко Д.І., Дунаєвський М.С., Сулейманов С.-Б., Батіг Л.О. Процеси генерації цифрових даних та їх застосування. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І.Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2022. Т. 33 (72). № 5. С. 64–72.

DOI: 10.32782/2663-5941/2022.5/09

79. Горбачук В., Дунаєвський М., Сулейманов С.-Б. Підхід до обчислення рівноважних потоків продукції конкурентних фірм через мережі ланцюгів постачання при ресурсних обмеженнях і ризикованих умовах. *Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології*. 2023. № 36. С. 58–62.

DOI: 10.15407/10.15407/fmmit2023.36.058

80. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Сирку А.А., Сулейманов С.-Б. Вартості досконалої інформації та стохастичного рішення. *Компьютерная математика*. 2017. № 2. С. 108–117.

http://nbuv.gov.ua/UJRN/Koma_2017_2_16

81. Дунаєвський М.С. Надійна модель контролю забруднення агровиробництвом за невизначених погодних умов. *Компьютерная математика*. 2018. № 1. С. 36–45.

<http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/161847>

82. Дунаєвський М.С. Моделювання системи оптимального використання водних, енергетичних та продовольчих ресурсів. *Компьютерная математика*. 2019. № 1. С. 3–9.

<http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/161927>

83. Дунаєвський М.С. Економічне зростання суміжних районів за децентралізації. *Теорія оптимальних рішень*. 2019. № 18. С. 94–99.

<http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/161680>

84. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Сулейманов С.-Б. Податкова конкуренція і кооперація за світові корпорації. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2018. № 3 (66). Т. 1. С. 45–54.

85. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Сулейманов С.-Б. Інституційні питання розвитку внутрішніх водних шляхів України та сусідніх держав через басейн Дунаю. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Економіка і управління*. 2019. 30 (69). № 6. Ч. 2. С. 121–127.

86. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Сулейманов С.-Б. До динамічного розрахунку цільової структури товарного експорту України та її регіонів. *Інфраструктура ринку*. 2018. Випуск 16. С. 206–215.

87. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Неботов П.Г. До регулювання ринку природного газу. *Східна Європа: економіка, бізнес та управління*. 2018. Випуск 2 (13). С. 266–273.

88. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Неботов П.Г. Алгоритм розрахунку цільової досяжної структури товарного експорту України та її регіонів. *Глобальні та національні проблеми економіки*. 2018. Вип. 22. С. 1023–1033.
89. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Сулейманов С.-Б. Обчислення цільової досяжної структури товарного експорту Закарпаття. *Науковий вісник Ужгородського національного університету. Серія: Міжнародні економічні відносини та світове господарство*. 2018. Випуск 18. Ч. 1. С. 113–124.
90. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Сулейманов С.-Б. Поквартальне оцінювання економічної ефективності та цільової структури експорту Закарпаття у 2017–2018 рр. *Науковий вісник Ужгородського національного університету. Серія: Міжнародні економічні відносини та світове господарство*. 2018. Випуск 22. Ч. 1. С. 61–69.
91. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Сулейманов С.-Б. Організація забезпечення громадських і клубних продуктів для рекреації та охорони здоров'я. *Приазовський економічний вісник*. 2018. Вип. 2. С. 156–162.
92. Горбачук В.М., Шпиґа С.П., Дунаєвський М.С. Поквартальне оцінювання економічної ефективності й структури експорту Кіровоградщини у 2017–2018 рр. *Вісник Одеського національного університету імені І.І.Мечникова. Економіка*. 2018. Т. 23. Вип. 5 (70). С. 177–185.
93. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Сулейманов С.-Б. Поквартальне оцінювання економічної ефективності й цільової структури експорту Запоріжчини у 2017–2018 рр. *Приазовський економічний вісник*. 2018. Вип. 4. С. 165–175.
94. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Сулейманов С.-Б. Поквартальне оцінювання економічної ефективності й цільової структури експорту Одещини у 2017–2018 рр. *Інфраструктура ринку*. 2018. Вип. 22. С. 269–281.
95. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Скороход Д.А. Моделювання фінансових криз. *Інфраструктура ринку*. 2018. Вип. 23. С. 375–382.
96. Горбачук В.М., Колесник Ю.С., Дунаєвський М.С. Втрати агрегованої

ефективності при досягненні міжрегіональної рівності. *Економіка та суспільство*. 2018. Вип. 18. С. 1077–1086.

97. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Сулейманов С.-Б. Поквартальне оцінювання економічної ефективності й структури експорту Миколаївщини у 2017–2018 рр. *Інфраструктура ринку*. 2018. Вип. 25. С. 897–909.

98. Горбачук В.М., Неботов П.Г., Дунаєвський М.С. Поквартальне оцінювання економічної ефективності й структури експорту Тернопільщини у 2017–2018 рр. *Приазовський економічний вісник*. 2018. Вип. 6 (11). С. 574–584.

99. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Сулейманов С.-Б. Модель зростання децентралізованої економіки з виробничими функціями Кобба–Дугласа. *Східна Європа: економіка, бізнес та управління*. 2019. Випуск 6 (23). С. 738–746.

100. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Сирку А.А. Сучасні питання генерування та накопичення енергії в енергосистемі України. *Східна Європа: економіка, бізнес та управління*. 2020. Випуск 1 (24). С. 260–268.

101. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Сулейманов С.-Б. Аналіз невтільених активів на недосконалих ринках. *Приазовський економічний вісник*. 2020. 4 (21). С. 110–117.

102. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Симонов Д.І. Поквартальне оцінювання економічної ефективності й цільової структури експорту Луганщини. *Східна Європа: економіка, бізнес та управління*. 2021. Випуск 3 (30). С. 102–113.

103. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Сулейманов С.-Б. Моделювання самопідтримуваних стратегій для урядової фінансової системи, державної банківської системи та інвестиційної системи відновлюваної енергогенерації. *Економічний простір*. 2022. № 179. С. 146–152.

104. Maheswaran R., Basar T. Efficient signal proportional allocation ESPA mechanisms: decentralized social welfare maximization for divisible resources. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 2006. 24 (5). P. 1000–1009.

105. Горбачук В.М. Методи індустріальної організації. Кейси та вправи. Економіка та організація виробництва. Економічна кібернетика. Економіка підприємства. К.:

A.C.K., 2010. 224 с.

106. Voznyak H., Kloba T. Smart specialization as an innovative strategy for the regional economic growth: experience of Central and Eastern European countries for Ukraine. *Бізнес Інформ*. 2020. 11. С. 59–68.

107. Горбачук В.М. Установление платы за трафик по сети связи. *Компьютерная математика*. 2013. №1. С. 3–12.

108. Wilson R. Auctions of shares. *Quarterly Journal of Economics*. 1979. 93 (4). P. 675–689.

109. Vickrey W. Counterspeculation, auctions, and competitive sealed tenders. *Journal of Finance*. 1961. 16 (1). P. 8–37.

110. Clarke E. H. Multipart pricing of public goods. *Public Choice*. 1971. 11. P. 17–33.

111. Groves T. Incentives in teams. *Econometrica*. 1973. 41. P. 617–631.

112. Nisan N., Ronen A. Computationally feasible VCG mechanisms. *Proceedings of ACM Conference Electronic Commerce* (October 2000, Minneapolis, USA). P. 242–252.

113. MacKie-Mason J. K., Varian H. R. Pricing the internet. In *Public Access to the Internet* (eds. Kahin B., Keller J.). Cambridge, MA: MIT Press, 1995. P. 269–314.

114. Semret N. Market mechanisms for network resource sharing. *Ph.D. dissertation*. Columbia University, New York, 1999.

115. Kelly F., Maulloo A., Tan D. Rate control for communication networks: shadow prices, proportional fairness and stability. *Journal of the Operational Research Society*. 1998. 49 (3). P. 237–252.

116. Yaiche H., Mazumdar R., Rosenberg C. A game theoretic framework for bandwidth allocation and pricing in broadband networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2000. 8 (5). P. 667–678.

117. Johari R., Tsitsiklis J. Efficiency loss in a network resource allocation game. *Mathematics of Operations Research*. 2004. 29 (3). P. 407–435.

118. Sanghavi S., Hajek B. Optimal allocation of a divisible good to strategic buyers. In *Proceedings of 43rd IEEE Conference Decision and Control* (Dec. 14–17, 2004, Paradise Island, Bahamas). P. 2748–2753.

119. Maheswaran R., Basar T. Social welfare for selfish agents: Motivating efficiency for divisible resources. In *Proceedings of 43rd IEEE Conference Decision and Control* (Dec. 14–17, 2004, Paradise Island, Bahamas). P. 1550–1555.
120. Nagurney A., Nagurney L.S., Shukla S. A supply chain game theory framework for cybersecurity investments under network vulnerability. *Computation, cryptography, and network security*. N. Daras, M. Th. Rassias (eds.). Springer International Publishing, 2015. P. 381–398.
121. Shetty N.G. Design of network architectures: role of game theory and economics. *PhD dissertation*. Technical Report UCB/EECS-2010-91. Berkeley, CA: Electrical Engineering and Computer Sciences, University of California at Berkeley, 2010.
122. Shetty N., Schwartz G., Felegehazy M., Walrand J. Competitive cyber-insurance and Internet security. *Proceedings of the 8-th Workshop on the Economics of Information Security (WEIS 2009)*. London, UK: University College London, 2009.
123. Akerlof G.A. The market for lemons: quality uncertainty and the market mechanism. *Quarterly journal of economics*. 1970. 84(3). P. 488–500.
124. Gorbachuk V.M. Cournot–Nash equilibria and Bertrand–Nash equilibria for a heterogenous duopoly of differentiated products. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2010. V. 46. № 1. P. 25–33.
125. Nagurney A. Network economics: a variational inequality approach. 2-nd, revised edition. Boston, MA: Kluwer Academic Publishers, 1999.
126. Nagurney A. Supply chain network economics: dynamics of prices, flows, and profits. Cheltenham, UK: Edward Elgar Publishing, 2006.
127. Daniele P. Dynamic networks and evolutionary variational inequalities. – Cheltenham, UK: Edward Elgar Publishing, 2006.
128. Gabay D., Moulin H. On the uniqueness and stability of Nash equilibria in noncooperative games. *Applied stochastic control in econometrics and management science*. Bensoussan A., Kleindorfer P., Tapiero C.S. (eds.). Amsterdam, The Netherlands: North-Holland, 1980. P. 271–294.
129. Gorbachuk V. Methods for Nash equilibria search. *Nonsmooth analysis and its*

applications to mathematical economics. Баку: Ас. Sci. USSR, 1991. P. 65.

130. Киндерлерер Д., Стампакья Г. Введение в вариационные неравенства и их приложения. М.: Мир, 1983. 256 с.

131. Costinot A., Vogel J., Wang S. An elementary theory of global supply chains. *Review of economic studies*. 2013. 80(1). P. 109–144.

132. Nagurney A., Dong I., Zhang D. A supply chain network equilibrium model. *Transportation research. Part E: Logistics and transportation review*. 2002. 38(5). P. 281–303.

133. Горбачук В.М., Єрмольєв Ю.М., Єрмольєва Т.Ю. Двоетапна модель еколого-економічних рішень. *Вісник Одеського національного університету. Економіка*. 2016. Т. 21. Вип. 9. С. 142–147.

134. Ermoliev Yu., Ermolieva T., Kahil T., Obersteiner M., Gorbachuk V., Knopov P. Stochastic optimization models for risk-based reservoir management. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2019. 55(1). P. 55–64.

135. Allen F., Gale D. Understanding financial crises. New York, NY: Oxford University Press, 2007. P. 303.

136. Ferguson N. The ascent of money: a financial history of the world. The Penguin Press, 2008. P. 432.

137. Горбачук В. Фінансові методи. К.: Альтерпрес, 2002. С. 175.

138. Горбачук В. Фінансові рішення. К.: Альтерпрес, 2003. С. 175.

139. Tschoegl A. Modeling the behaviour of Japanese stock indices. *Japanese capital markets: new developments in regulations and institutions*. S. Takagi (ed.). Oxford: Blackwell, 1993. P. 371–400.

140. Heiskanen R. The banking crisis in the Nordic countries. *Kansallis economic review*. 1993. 2. P. 13–19.

141. Allen F., Gale D. Bubbles and crises. *Economic journal*. 2000. 110. P. 236–255.

142. Allen F., Gorton G. Churning bubbles. *Review of economic studies*. 1993. 60. P. 813–836.

143. Allen F., Gale D. Asset price bubbles and monetary policy. *Global governance and financial crises*. M. Desai, Y. Said (eds.). New York and London: Routledge, 2004. P. 19–42.

144. Jensen M., Meckling W. Theory of the firm: managerial behavior, agency cost and ownership structure. *Journal of financial economics*. 1976. 3. P. 305–360.
145. Stiglitz J., Weiss A. Credit rationing in markets with imperfect information. *American economic review*. 1981. 71. P. 393–410.
146. White E. Crashes and panics: the lessons from history. Homewood, IL: Dow Jones Irwin, 1990.
147. Bass F.M. A new product growth for model consumer durables. *Management Science*. 1969. V. 15. № 5. P. 215-227.
148. Bass F.M. The theory of stochastic preference and brand switching. *Journal of Marketing Research*. 1974. V. 11. № 1. P. 1–20.
149. Bass F.M., Norton J.A. A diffusion theory model of adoption and substitution for successive generations of high-technology products. *Management Science*. 1987. V. 33. № 9. P. 1069–1086.
150. Mahajan V., Muller E., Bass F. New product diffusion models in marketing: a review and directions for research. *Journal of Marketing*. 1990. V. 54. № 1. P. 1–26.
151. Bass F.M. A new product growth model for consumer durables. *Institute for Research in the Behavioral, Economic, and Management Sciences. Institute Paper № 175*. Lafayette, IN: Herman C. Krannert Graduate School of Industrial Administration; Purdue University, 1967. 33 p.
152. Bass F.M. A dynamic model of market share and sales behavior. *Proceedings. Winter Conference. American Marketing Association*. Chicago, IL: AMA, 1963. P. 263–276.
153. Горбачук М.Л., Пивторак Н.И. О решениях эволюционных уравнений параболического типа с вырождением. *Дифференциальные уравнения*. 1985. Т. 21. № 8. С. 1317–1324.
154. Кнопов P.S., Deriyeva O.N. *Estimation and Control Problems for Stochastic Partial Differential Equations*. New York, NY: Springer, 2013. 183 p.
155. Наконечний О.Г., Капустян О.А., Чикрій А.О. Наближені гарантовані середньоквадратичні оцінки функціоналів від розв'язків параболических задач зі

швидкоколивними коефіцієнтами при нелінійних спостереженнях. *Кибернетика и системный анализ*. 2019. Т. 55. № 5. С. 95–105.

156. Кнопов П.С., Норкін В.І., Атоєв К.Л., Горбачук В.М., Кирилюк В.С., Біла Г.Д., Самосьонок О.С., Богданов О.В. *Деякі підходи використання стохастичних моделей епідеміології до проблеми COVID-19*. Київ: Інститут кібернетики імені В.М.Глушкова НАН України, 2020. 17 с.

157. Вагис А.А., Гупал А.М., Гупал Н.А. Определение групп рисков при заболеваниях, вызванных COVID-19. *Кибернетика та комп'ютерні технології*. 2020. № 3. С. 25–31.

158. Yakovlev S., Bazilevych K., Chumachenko D., Chumachenko T., Hulianytskyi L., Meniailov I., Tkachenko A. The concept of developing a decision support system for the epidemic morbidity control. *CEUR Workshop Proceedings*. 2020. V. 2753. P. 265–274.

159. Gurumurthy K., Mukherjee A. The Bass Model: a parsimonious and accurate approach to forecasting mortality caused by COVID-19. *International Journal of Pharmaceutical and Healthcare Marketing*. 2020. V. 14. № 3. P. 349–360.

160. Allenby G., Gengler L., Sood A., Tellis G.J., Winer R.S. Commentaries: The Bass model: a parsimonious and accurate approach to forecasting mortality caused by COVID-19. *Ibid.* P. 361–365.

161. Горбачук В., Гавриленко С. Аналіз динаміки поширення COVID-19 в Україні та сусідніх державах 1–10 травня 2020 р. *Global and Regional Problems of Informatization in Society and Nature Using 2020*. Київ: National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, 2020. С. 56–60.

162. Горбачук В.М., Шулінок Г.О. Моделювання поведінки фармацевтичної фірми. *Теорія оптимальних рішень*. 2017. С. 147–153.

163. Gorbachuk V.M. An asymmetric Cournot–Nash equilibrium under uncertainty as a generalized Cournot–Stackelberg–Nash equilibrium. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2007. V. 43. № 4. P. 471–477.

164. Gorbachuk V., Ermoliev Y., Zagorodniy A., Bogdanov V., Ermolieva T.,

Rovenskaya E., Komendantova N., Borodina O., Knopov P., Norkin V., Gaivoronski A. Iterative Stochastic Quasigradient procedures for robust estimation, machine learning and decision making problems. *31-st European Conference on Operational Research* (July 11–14, 2021, Athens, Greece). The Association of European Operational Research Societies, 2021. P. 184–185.

165. Gorbachuk V.M. Generalized Cournot–Stackelebrg–Nash equilibrium. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2006. V. 42. № 1. P. 25–33.

166. Bartlett M. S. *Stochastic Population Models in Ecology and Epidemiology*. London: Methuen, 1960. 90 p.

167. Бартлетт М.С. Введение в теорию случайных процессов. М.: Издательство иностранной литературы, 1958. 384 с.

168. Мэнсфилд Э. Экономика научно-технического прогресса. М.: Прогресс, 1970. 237 с.

169. Роджерс Е.М. Дифузія інновацій. К.: Києво-Могилянська академія, 2009. 592 с.

170. Krivonos Y., Gorbachuk V., Wojcik W., Smailova S Time series regression and Granger causality. *Current Problems in Information and Computational Technologies*. V. 2. W.Wojcik, J.Sikora (eds.) Lublin: Politechnika Lubelska, 2012. P. 7–49.

171. Горбачук В.М. Визначення критичної маси поширення мережевих продуктів. *Науково-технічна інформація*. 2013. № 4. С. 50–55.

172. Gorbachuk V., Chumakov B. A computable critical mass on market of new network product. *Transport Systems and Logistics*. Chisinau: Academia de Transporturi, Informatică și Comunicații, 2013. P. 272–281.

173. Mathieu E., Ritchie H., Ortiz-Ospina E., Roser M., Hasell J., Appel C., Giattino C., Rodes-Guirao L. A global database of COVID-19 vaccinations. *Nature Human Behavior*. 2021. V. 5. P. 947–953.

174. Bardadym T.O., Gorbachuk V.M., Novoselova N.A., Osypenko S.P., Skobtsov V.Yu. Intelligent analytical system as a tool to ensure the reproducibility of biomedical calculations. *Штучний інтелект*. 2020. № 3. P. 67–81.

175. Новоселова Н.А., Скобцов В.Ю., Том І.Е., Бардадим Т.А., Горбачук В.М., Осипенко

С.П. Сучасні можливості розробки та організації інтелектуальних аналітичних систем. *Глушковські читання*. Київ: КНУ імені Т. Шевченка, 2020. С. 113–116.

176. Горбачук В., Скобцов Ю., Том І. Економічні аспекти забезпечення здоров'я в інформаційну еру. *National Health as Determinant of Sustainable Development of Society*. Dubrovina N., Filip S. (eds.) Bratislava, Slovakia: School of Economics and Management in Public Administration, 2021. P. 697–720.

177. Bardadym T., Gorbachuk V., Novoselova N., Osypenko S., Skobtsov V., Tom I. On biomedical computations in cluster and cloud environment. *Cybernetics and Computer Technologies*. 2021. № 2. P. 76–84.

178. Gorbachuk V., Gavrilenko S., Golotsukov G., Nikolenko D. To digital technologies of patent processing for development of critical products. Information and Digital Technologies 2021 (June 22–24, 2021, Zilina, Slovakia), 2021. P. 131–141.

179. Gaivoronski A.A., Nesse P.J., Erdal O.B., Johansen F.-T. Internet service provision and content services: peering and service differentiatio. *Advances in Service-Oriented and Cloud Computing*. ESOC 2015 Workshops. A.Celesti, P.Leitner (eds.) Communications in Computer and Information Science (CCIS). V. 567. Cham: Springer, 2016. P. 63–78.

180. Gaivoronski A.A., Nesse P.-J., Østerbo O.-N., Lønsethagen H. Risk-balanced dimensioning and pricing of End-to-End differentiated services. *European Journal of Operational Research*. 2016. 254 (2). P. 644–655.

181. Gaivoronski A.A., Nesse P.J., Erdal O.B. Internet service provision and content services: paid peering and competition between internet providers. *Netnomics: Economic Research and Electronic Networking*. 2017. V. 18. № 1. P. 43–79.

182. von Stackelberg H. *The Theory of Market Economy*. New York, NY: Oxford University Press, 1952. 328 p.

183. Mitra D., Ramakrishnan K.G., Wang Q. Combined economic modeling, traffic engineering: joint optimization of pricing and routing in multi-service networks. *Teletraffic Engineering in the Internet Era. Proceedings of 17-th International*

Teletraffic Congress (24–28 September, 2001, Salvador, Brasil). *Teletraffic Science and Engineering*. V. 4. de Souza J.M., da Fonseca N.L.S., de Souza e Silva E.A. (eds.) Amsterdam: Elsevier, 2001. P. 73–85.

184. Горбачук В.М., Гаркуша Н.І. Втрата ефективності в рівновагах Неша. *Математичне моделювання в економіці*. 2013. 3. С. 79–89.

185. Горбачук В.М. Парето-неефективність рівноваги стійкого стану конкурентної економіки. *Аналіз, моделювання, управління*. 2018. 3. С. 153–168.

186. Горбачук В.М., Сулейманов С.-Б. Динамічне оцінювання економічної ефективності у територіально-адміністративних одиницях. *Продуктивна спроможність націй: приклад України*. К.: КНУ імені Т.Шевченка, 2017. С. 64–65.

187. Mera K. Tradeoff between aggregate efficiency and interregional equity: a static analysis. *Quarterly journal of economics*. 1967. Vol. 81. P. 658–674.

188. Dorfman R., Samuelson P.A., Solow R.M. *Linear programming and economic analysis*. New York: McGraw Hill, 1958.

189. Samuelson P.A. *Foundations of economic analysis*. Cambridge, MA.: Harvard University Press, 1947.

190. Mera K. Efficiency and equalization in interregional economic development. PhD thesis. Cambridge, MA: Harvard University, 1965.

191. Minhas B.S. *International comparison of factor costs and factor use*. Amsterdam: North Holland Publishing, 1963.

192. Arrow K.J., Chenery H.B., Minhas B.S., Solow R.M. Capital-labor substitution and economic efficiency. *Review of economics and statistics*. 1961, August. P. 225–250.

193. Горбачук В.М. На порозі Четвертої промислової революції. *Причорноморські економічні студії*. 2016. Вип. 8. С. 216–220.

194. Горбачук В.М. Аналіз експорту держав Східної Європи за групами агропромислових товарів у 2001–2015 рр. *Східна Європа: економіка, бізнес та управління*. 2017. Випуск 2 (07). С. 316–324.

195. International trade statistics 2001–2017. URL: <http://www.intracen.org/itc/market->

info-tools/trade-statistics/

196. Додаток до Закону України «Про Митний тариф України» від 19 вересня 2013 року N 584-VII. URL:

http://ukurier.gov.ua/media/documents/2013/10/23/2013_10_23_584z.pdf

197. Горбачук В.М. Глобальні інвестиції у майбутній людський капітал. *Глобальні та національні проблеми економіки*. 2016. Вип. 13. С. 633–638.

198. Статистичний збірник «*Регіони України*» 2016. Частина II. – К.: Державна служба статистики України, 2016. – 692 с.

199. Статистичний збірник «*Регіони України*» 2014. Частина II. – К.: Державна служба статистики України, 2014. – 724 с.

200. Статистичний збірник «*Регіони України*» 2011. Частина II. – К.: Державна служба статистики України, 2011. – 783 с.

201. Статистичний збірник «*Регіони України*» 2009. Частина II. – К.: Державна служба статистики України, 2009. – 757 с.

202. Горбачук В.М., Бохонко В.П., Демків С.А. Питання оптимальності змін середньої заробітної плати і капітальних інвестицій районів Одещини у 2015–2016 рр. *Європейська інтеграція: історичний досвід та економічні перспективи*. Одеса: Одеський національний університет імені І.І. Мечникова, 2017. С. 150–154.

203. Симонов Д.И. Проблемы развития современных отечественных транспортных систем на примере предприятия «Лугансктепловоз». *Глушковські читання*. Київ: КНУ імені Т. Шевченка, 2020. С. 135–139.

204. *Соціально-економічне становище Луганської області за січень–квітень 2017 року*. Сєверодонецьк: Головне управління статистики у Луганській області, 2017. 92 с.

205. *Соціально-економічне становище Луганської області за січень–липень 2017 року*. Сєверодонецьк: Головне управління статистики у Луганській області, 2017. 83 с.

206. *Соціально-економічне становище Луганської області за січень–жовтень 2017 року*. Сєверодонецьк: Головне управління статистики у Луганській області, 2017. 83 с.

207. *Соціально-економічне становище Луганської області за січень–квітень 2018*

- року. Северодонецьк: Головне управління статистики у Луганській області, 2018. 86 с.
208. *Соціально-економічне становище Луганської області за січень–липень 2018 року*. Северодонецьк: Головне управління статистики у Луганській області, 2018. 83 с.
209. *Соціально-економічне становище Луганської області за січень–жовтень 2018 року*. Северодонецьк: Головне управління статистики у Луганській області, 2018. 84 с.
210. Dunning T.J. *Trade's unions and strikes: their philosophy and intention*. London, UK: M. Harley, 1860. 52 p.
211. *Соціально-економічне становище Кіровоградської області за січень–квітень 2017 року*. Кропивницький: Головне управління статистики у Кіровоградській області, 2017.
212. *Соціально-економічне становище Кіровоградської області за січень–липень 2017 року*. Кропивницький: Головне управління статистики у Кіровоградській області, 2017.
213. *Соціально-економічне становище Кіровоградської області за січень–жовтень 2017 року*. Кропивницький: Головне управління статистики у Кіровоградській області, 2017.
214. *Соціально-економічне становище Кіровоградської області за січень 2018 року*. Кропивницький: Головне управління статистики у Кіровоградській області, 2018.
215. *Соціально-економічне становище Кіровоградської області за січень–квітень 2018 року*. Кропивницький: Головне управління статистики у Кіровоградській області, 2018.
216. *Соціально-економічне становище Кіровоградської області за січень–червень 2018 року*. Кропивницький: Головне управління статистики у Кіровоградській області, 2018.
217. *Соціально-економічне становище Тернопільської області за січень–квітень 2017 року*. Тернопіль: Головне управління статистики у Тернопільській області, 2017.
218. *Соціально-економічне становище Тернопільської області за січень–липень 2017 року*. Тернопіль: Головне управління статистики у Тернопільській області, 2017.
219. *Соціально-економічне становище Тернопільської області за січень–жовтень 2017 року*. Тернопіль: Головне управління статистики у Тернопільській області, 2017.
220. *Соціально-економічне становище Тернопільської області за січень 2018 року*. Тернопіль: Головне управління статистики у Тернопільській області, 2018.
221. *Соціально-економічне становище Тернопільської області за січень–квітень 2018*

року. Тернопіль: Головне управління статистики у Тернопільській області, 2018.

222. *Соціально-економічне становище Тернопільської області за січень–червень 2018 року*. Тернопіль: Головне управління статистики у Тернопільській області, 2018.

223. *Соціально-економічне становище Тернопільської області за січень–жовтень 2018 року*. Тернопіль: Головне управління статистики у Тернопільській області, 2018.

ДОДАТКИ

Додаток 1. Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації

Публікації у наукових виданнях, проіндексованих у базах даних

Web of Science Core Collection та/або Scopus

1. Gorbachuk V., Dunaievskyi M., Suleimanov S.-B. Modeling of agency problems in complex decentralized systems under information asymmetry. *IEEE Conference on Advanced Trends in Information Theory* (December 18–20, 2019, Kyiv, Ukraine). Kyiv: Taras Shevchenko National University of Kyiv, 2019. P. 449–454.

DOI: 10.1109/ATIT49449.2019.9030498

2. Gorbachuk V.M., Dunaievskyi M.S., Syrku A.A., Suleimanov S.-B. Substantiating the diffusion model of innovation implementation and its application to vaccine propagation. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2022, January. Vol. 58. No. 1. P. 84–94.

DOI: 10.1007/s10559-022-00438-1

3. Gorbachuk V., Dunaievskyi M. Nash equilibrium and its modern applications. *Modern optimization methods for decision making under risk and uncertainty*. A.A. Gaivoronski, P.S. Knopov, V.A. Zaslavskyi (eds.) Boca Raton, FL: CRC Press, 2023. P. 196–224.

DOI: 10.1201/9781003260196

Статті у наукових виданнях, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України за спеціальністю 113

4. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Морозов О.О. Рівноважні інвестиції у кібербезпеку мережі ланцюгів постачання. *Вісник Київського університету. Серія: фізико-математичні науки*. 2017. № 2. С. 47–52.

DOI: 10.32626/2308-5916.2019-19.31-37

5. Горбачук В.М., Гавриленко С.О., Голоцуков Г.В., Дунаєвський М.С.,

Ніколенко Д.І. До інтегрованого менеджменту і фінансового забезпечення інфраструктури охорони здоров'я районів Запоріжчини. *Кібернетика та комп'ютерні технології*. 2020. № 4. С. 87–99.

DOI: 10.34229/2707-451X.20.4.6

6. Дунаєвський М.С., Лефтеров О.В., Большаков В.М. Використання загальнодоступного програмного забезпечення у моделюванні епідеміологічних трендів. *Кібернетика та комп'ютерні технології*. 2020. № 3. С. 32–42.

DOI: 10.34229/2707-451X.20.3.4

7. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Сулейманов С.-Б. Прогнозування ефективності багатокомпонентних обчислювальних систем. *Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології*. 2021. 32. С. 96–100.

DOI: 10.15407/fmmit2021.32.096

8. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Сулейманов С.-Б., Батіг Л.О., Симонов Д.І. Моделі прийняття рішень на ринку хмарних послуг. *Кібернетика та комп'ютерні технології*. 2021. № 3. С. 53–64.

DOI: 10.34229/2707-451X.21.3.5

9. Гайворонський О.О., Горбачук В.М., Дунаєвський М.С. Стратегічна взаємодія провайдерів диференційованих Інтернет-послуг. *Проблеми керування та інформатики*. 2021. № 6. С. 102–113.

DOI: 10.34229/1028-0979-2021-6-10

10. Горбачук В.М., Голоцуков Г.В., Дунаєвський М.С., Сирку А.А., Сулейманов С.-Б. Теоретико-ігрові та оптимізаційні моделі і методи підвищення безпеки кіберінфраструктур. *Проблеми керування та інформатики*. 2022. № 2. С. 92–105.

DOI: 10.34229/2786-6505-2022-2-6

11. Gaivoronski A., Gorbachuk V., Dunaievskyi M., Suleimanov S.-B. Digital platforms to close the information asymmetry gaps. *Проблеми керування та інформатики*. 2022. № 6. Р. 67–82.

<https://jais.net.ua/index.php/files/article/view/64/186>

Розділи у монографіях, виданих у державах ЄС

12. Gorbachuk V., Dunaievskiy M., Suleimanov S.-B. An interdisciplinary approach to the security of modern energy. Modern approaches to ensuring sustainable development. V.Smachylo, O.Nestorenko (eds.) Katowice, Poland: University of Technology, Katowice, 2023. P. 142–149.
13. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Сулейманов С.-Б. Управління та адміністрування в сфері послуг охорони здоров'я. *Management and administration in the field of services: selected examples*. Т. Pokusa, Т. Nestorenko (eds.) Opole: Academy of Management and Administration, 2020. P. 268–279.
14. Dunaievskiy M. Applied mathematics for optimal economic and healthcare benefits trade-off. Improving living standards: current opportunities and limitations. *Improving living standards: current opportunities and limitations*. W.Duczmal, I.Ostopolets (eds.) Opole: Academy of Management and Administration, 2020. P. 266–276.
15. Горбачук В.М., Лупей М.І., Дунаєвський М.С. Підходи до резильєнтності критичних інфраструктур. *Science and education for sustainable development*. A.Ostenda, V.Smachylo (eds.) Katowice, Poland: University of Technology, Katowice, 2022. P. 87–95.

Статті у наукових виданнях, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України за іншими спеціальностями

16. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Морозов О.О. Характеристики рівноваг ланцюгів постачання. *Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: технічні науки*. 2019. Вип. 19. С. 31–37.
DOI: 10.32626/2308-5916.2019-19.31-37
17. Горбачук В.М., Лупей М.І., Ніколенко Д.І., Дунаєвський М.С., Сулейманов С.-Б., Батіг Л.О. Процеси генерації цифрових даних та їх застосування. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І.Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2022. Т. 33 (72). № 5. С. 64–72.
DOI: 10.32782/2663-5941/2022.5/09

18. Горбачук В., Дунаєвський М., Сулейманов С.-Б. Підхід до обчислення рівноважних потоків продукції конкурентних фірм через мережі ланцюгів постачання при ресурсних обмеженнях і ризикованих умовах. *Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології*. 2023. № 36. С. 58–62.

DOI: 10.15407/10.15407/fmmit2023.36.058

19. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Сирку А.А., Сулейманов С.-Б. Вартості досконалої інформації та стохастичного рішення. *Компьютерная математика*. 2017. № 2. С. 108–117.

http://nbuv.gov.ua/UJRN/Koma_2017_2_16

20. Кнопов П.С., Горбачук В.М., Кирилюк В.С., Атоєв К.Л., Дунаєвський М.С., Сирку А.А. Інтелектуальні засоби поквартального оцінювання економічної ефективності й цільової структури експорту у 2017–2018 рр. на прикладі Київщини. *Штучний інтелект*. 2018. 3. С. 111–125.

<http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/162450>

21. Дунаєвський М.С. Надійна модель контролю забруднення агропромисловим виробництвом за невизначених погодних умов. *Компьютерная математика*. 2018. № 1. С. 36–45.

<http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/161847>

22. Дунаєвський М.С. Моделювання системи оптимального використання водних, енергетичних та продовольчих ресурсів. *Компьютерная математика*. 2019. № 1. С. 3–9.

<http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/161927>

23. Дунаєвський М.С. Економічне зростання суміжних районів за децентралізації. *Теорія оптимальних рішень*. 2019. № 18. С. 94–99.

<http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/161680>

24. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Сулейманов С.-Б. Податкова конкуренція і кооперація за світові корпорації. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2018. № 3 (66). Т. 1. С. 45–54.

25. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Сулейманов С.-Б. Інституційні питання

розвитку внутрішніх водних шляхів України та сусідніх держав через басейн Дунаю. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Економіка і управління*. 2019. 30 (69). № 6. Ч. 2. С. 121–127.

26. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Сирку А.А., Сулейманов С.-Б. Оптимізаційні питання оцінювання щільності на реальних даних. *Штучний інтелект*. 2017. № 3-4. С. 101–110.

27. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Сулейманов С.-Б. До динамічного розрахунку цільової структури товарного експорту України та її регіонів. *Інфраструктура ринку*. 2018. Випуск 16. С. 206–215.

28. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Неботов П.Г. До регулювання ринку природного газу. *Східна Європа: економіка, бізнес та управління*. 2018. Випуск 2 (13). С. 266–273.

29. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Неботов П.Г. Алгоритм розрахунку цільової досяжної структури товарного експорту України та її регіонів. *Глобальні та національні проблеми економіки*. 2018. Вип. 22. С. 1023–1033.

30. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Сулейманов С.-Б. Обчислення цільової досяжної структури товарного експорту Закарпаття. *Науковий вісник Ужгородського національного університету. Серія: Міжнародні економічні відносини та світове господарство*. 2018. Випуск 18. Ч. 1. С. 113–124.

31. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Сулейманов С.-Б. Поквартальне оцінювання економічної ефективності та цільової структури експорту Закарпаття у 2017–2018 рр. *Науковий вісник Ужгородського національного університету. Серія: Міжнародні економічні відносини та світове господарство*. 2018. Випуск 22. Ч. 1. С. 61–69.

32. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Сулейманов С.-Б. Організація забезпечення громадських і клубних продуктів для рекреації та охорони здоров'я. *Приазовський економічний вісник*. 2018. Вип. 2. С. 156–162.

33. Горбачук В.М., Шпиґа С.П., Дунаєвський М.С. Поквартальне оцінювання

економічної ефективності й структури експорту Кіровоградщини у 2017–2018 рр. *Вісник Одеського національного університету імені І.І.Мечникова. Економіка*. 2018. Т. 23. Вип. 5 (70). С. 177–185.

34. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Сулейманов С.-Б. Поквартальне оцінювання економічної ефективності й цільової структури експорту Запоріжчини у 2017–2018 рр. *Приазовський економічний вісник*. 2018. Вип. 4. С. 165–175.

35. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Сулейманов С.-Б. Поквартальне оцінювання економічної ефективності й цільової структури експорту Одещини у 2017–2018 рр. *Інфраструктура ринку*. 2018. Вип. 22. С. 269–281.

36. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Скороход Д.А. Моделювання фінансових криз. *Інфраструктура ринку*. 2018. Вип. 23. С. 375–382.

37. Горбачук В.М., Колесник Ю.С., Дунаєвський М.С. Втрати агрегованої ефективності при досягненні міжрегіональної рівності. *Економіка та суспільство*. 2018. Вип. 18. С. 1077–1086.

38. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Сулейманов С.-Б. Поквартальне оцінювання економічної ефективності й структури експорту Миколаївщини у 2017–2018 рр. *Інфраструктура ринку*. 2018. Вип. 25. С. 897–909.

39. Горбачук В.М., Неботов П.Г., Дунаєвський М.С. Поквартальне оцінювання економічної ефективності й структури експорту Тернопільщини у 2017–2018 рр. *Приазовський економічний вісник*. 2018. Вип. 6 (11). С. 574–584.

40. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Сулейманов С.-Б. Модель зростання децентралізованої економіки з виробничими функціями Кобба–Дугласа. *Східна Європа: економіка, бізнес та управління*. 2019. Випуск 6 (23). С. 738–746.

41. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Сирку А.А. Сучасні питання генерування та накопичення енергії в енергосистемі України. *Східна Європа: економіка, бізнес та управління*. 2020. Випуск 1 (24). С. 260–268.

42. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Сулейманов С.-Б. Аналіз невітлених активів на недосконалих ринках. *Приазовський економічний вісник*. 2020. 4 (21). С. 110–117.

43. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Симонов Д.І. Поквартальне оцінювання економічної ефективності й цільової структури експорту Луганщини. *Східна Європа: економіка, бізнес та управління*. 2021. Випуск 3 (30). С. 102–113.
44. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Сулейманов С.-Б. Моделювання самопідтримуваних стратегій для урядової фінансової системи, державної банківської системи та інвестиційної системи відновлюваної енергогенерації. *Економічний простір*. 2022. № 179. С. 146–152.

**Список публікацій здобувача, які засвідчують
апробацію матеріалів дисертації**

45. Дунаєвський М.С. Перспективи використання алгоритмів машинного навчання в системах підтримки прийняття рішень в сфері роздрібної торгівлі. *Штучний інтелект та інтелектуальні системи* (17–18 жовтня 2017 р., Київ, Україна). Київ. 2017. С. 63–66.
46. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Сулейманов С.-Б., Аллахвердієв А. Динаміка індексів виявленої порівняльної переваги Луганщини за групами товарів у 2011–2016 роках. *Глобальні виміри захисту економічної конкуренції* (27 жовтня 2017 р., Київ, Україна). Київ: Центр комплексних досліджень з питань антимонопольної політики, 2017. С. 27–30.
47. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Сирку А.А., Сулейманов С.-Б. Економіка кібербезпеки. *Інформаційні технології та взаємодії* (8–10 листопада 2017 р., Київ, Україна). Київ: КНУ імені Т. Шевченка, 2017. С. 207–208.
48. Горбачук В.М., Макаренко О.С., Самородов Є.Л., Дунаєвський М.С., Сирку А.А., Сулейманов С.-Б. До інтегрованих систем візуалізації, аналізу та застосування часово-просторових даних. *Глушковські читання* (13 грудня 2017 р., Київ, Україна). Київ: НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського», 2017. С. 35–37.
49. Горбачук В.М., Макаренко О.С., Дунаєвський М.С., Новодережкін В.І., Сулейманов С.-Б. Вимірювання економічної ефективності регіонів України за перші квартали 2017 р. *Сучасна інформатика: проблеми, досягнення та*

перспективи розвитку (13–15 грудня 2017 р., Київ, Україна). Київ: Інститут кібернетики імені В.М.Глушкова НАН України, 2017. С. 258–260.

50. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Сирку А.А., Сулейманов С.-Б. Особливості державних оборонних замовлень. *Глобальні виміри захисту економічної конкуренції* (28 лютого 2018 р., Київ, Україна). Київ: Центр комплексних досліджень з питань антимонопольної політики, 2018. С. 36–39.

51. Gorbachuk V.M., Dunaievskiy M.S., Suleimanov S.-B. The Golden rule for overlapping generations. *Nonlinear analysis and applications* (April 12, 2018, Kyiv, Ukraine). Kyiv: NTUU «KPI», 2018. P. 24.

52. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Сулейманов С.-Б. Алгоритми збільшення ефективності та експорту регіонів України. *Інноваційні ідеї в економічній науці: пошуки вирішення сучасних проблем* (19–20 квітня 2018 р., Київ, Україна). Київ: Знання України, 2018. С. 40–44.

53. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Сулейманов С.-Б. Обчислення оптимальної спеціалізованої експортної структури регіону. *Інформаційно-комп'ютерні технології – 2018* (20 квітня 2018 р., Житомир, Україна). Житомир: Житомирський державний технологічний університет, 2018. С. 61–62.

54. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Сулейманов С.-Б. Алгоритми охоплення даних для підвищення економічної ефективності й експорту держави та її регіонів. *Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання* (14–19 травня 2018 р., Івано-Франківськ, Україна). Івано-Франківськ: Прикарпатський національний університет імені В.Стефаника, 2018. С. 109–112.

55. Горбачук В.М., Кошулько А.І., Дунаєвський М.С. Питання асиметрії інформації та несприятливого відбору в організації охорони здоров'я. *Здоров'я і суспільні виміри в академічному просторі та поза ним* (23 травня 2018 р., Київ, Україна). Київ: НаУКМА, 2018. С. 27–29.

56. Gorbachuk V., Dunaievskiy M., Morozov O. The method of finding target export structure. *PDMU* (July 3–8, 2018, Lankaran–Baku, Azerbaijan). Kyiv: Taras

Shevchenko University of Kyiv, 2018.

57. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Сулейманов С.-Б. Математичне моделювання міжнародної конкуренції. *Матеріали ХІХ міжнародної конференції з математичного моделювання, присвяченої 250-річчю з дня народження Жана Батиста Жозефа Фур'є (17–21 вересня 2018 р., Херсон, Україна)*. Херсон: Херсонський національний технічний університет, 2018. С. 10.

58. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Сулейманов С.-Б. До розв'язання проблеми ефективності й рівності. *Контроль і управління в складних системах (15–17 жовтня 2018 р., Вінниця, Україна)*. Вінниця: ВНТУ, 2018. С. 61.

59. Dunaievskiy M.S., Suleimanov S.-B. Dynamic assessment of economic efficiency in territorial-administrative units. *Modelare matematica, optimizare si tehnologii informationale (November 12–16, 2018, Chisinau, Moldova)*. Chisinau, Moldova: Academia de transporturi, informatica si comunicatii, 2018.

60. Горбачук В.М., Кошулько А.І., Дунаєвський М.С. Залежність рівнів безпеки, ціни й вартості ядерної енергії. *Проблеми сучасної ядерної енергетики (14–16 листопада, Харків, Україна)*. Харків: Харківський національний університет імені В.Н.Каразина, 2018. С. 49–50.

61. Горбачук В.М., Колесник Ю.С., Шпиґа С.П., Дунаєвський М.С. Алгоритм поквартального оцінювання економічної ефективності районів і міст регіону України. *Інформаційні технології та взаємодії (20–21 листопада 2018 р., Київ, Україна)*. Київ: КНУ імені Т.Шевченка, 2018. С. 344–345.

62. Дунаєвський М.С. Від ЗДАС до Розумної Держави (smart state). *Історія, сьогодення та перспективи розвитку інформаційних технологій в Україні та світі. Глушковські читання (21 листопада 2018 р., Київ, Україна)*. Київ: НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського», 2018. С. 45.

63. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С. Аналіз результатів оцінювання динаміки економічної ефективності та експорту регіонів України за допомогою програмно-комп'ютерних засобів. *Нейронауки та когнітивні системи в економіці (19 лютого*

2019 р., Київ, Україна). Київ: НаУКМА, 2019. С. 7–10.

64. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Сулейманов С.-Б. До ефективності торгівлі високотехнологічною продукцією. *Інноваційні ідеї в економічній науці: пошуки вирішення сучасних проблем* (11–12 квітня 2019 р., Київ, Україна). Київ: НаУКМА, 2019. С. 22–24.

65. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Сирку А.А., Сулейманов С.-Б. До розробки сучасних конкурсів. *Теорія прийняття рішень* (15–20 квітня 2019 р., Ужгород, Україна). Ужгород: УжНУ, 2019. С. 15–16.

66. Горбачук В.М., Єрмольєв Ю.М., Єрмольєва Т.Ю., Дунаєвський М.С. Застосування квантильної регресії для оцінювання еколого-економічних ризиків. *Обчислювальний інтелект* (15–20 квітня 2019 р., Ужгород, Україна). Ужгород: УжНУ, 2019. С. 188–189.

67. Горбачук В., Гавриленко С., Голоцуков Г., Дунаєвський М. Засади розвитку хмарних технологій. *Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання* (18–19 травня 2020 р., Івано-Франківськ, Україна). Івано-Франківськ: Прикарпатський національний університет імені В.Стефаника, 2020. С. 82–83.

68. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Сулейманов С.-Б. Аналіз ланцюгів вартості на основі нових технологій енергонакопичення. *Удосконалювання енергоустановок методами математичного і фізичного моделювання* (8–10 жовтня 2019 р., Харків, Україна). Секція 3. Харків: Інститут проблем машинобудування імені А.М.Підгорного НАН України, 2019. С. 20–21.

69. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С. До економічної організації децентралізації. *Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем* (20–22 листопада 2019 р., Дніпро, Україна). Дніпро: ДНУ імені О.Гончара, 2019. С. 69–70.

70. Дунаєвський М.С., Таран Л.О. Порівняльний аналіз ролі фактору водних ресурсів для економіки районів Дніпропетровщини та Запоріжчини. *Тенденції розвитку публічних та корпоративних секторів економіки України в умовах макроекономічної нестабільності* (29 січня 2020 р., Київ, Україна). Київ:

НаУКМА, 2020. С. 34–36.

71. Дунаєвський М.С. Оцінка готовності Одещини до пом'якшення карантинних антисоvіd-19 заходів. *Проблеми міжнародної міграції: оцінка та перспективи вирішення* (16 травня 2020 р., Одеса, Україна). Одеса: ОНУ імені І.І. Мечникова, 2020. С. 115–119.

72. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Морозов О.О. Лідерство в сучасних ланцюгах постачання. *Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем* (18–20 листопада 2020 р., Дніпро, Україна). Дніпро: ДНУ імені О.Гончара, 2020.

73. Дунаєвський М.С. Кібернетика та методи біоінформатики в сфері охорони здоров'я. *Глушковські читання* (18 грудня 2020 р., Київ, Україна). Київ: КНУ імені Т.Шевченка, 2020. С. 58–61.

74. Gorbachuk V., Dunaievskiy M., Syrku A. Epidemic effects in network industries. *International Conference on Software Engineering* (April 12–14, 2021, Kyiv, Ukraine). Kyiv: National Aviation University, 2021. P. 68–72.

75. Горбачук В., Гавриленко С., Дунаєвський М. До участі України в Європейській хмарі відкритої науки. *Global and regional problems of informatization in society and nature using 2021* (May 13–14, 2021, Kyiv, Ukraine). Kyiv: National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, 2021. P. 169–171.

76. Dunaievskiy M. Suleimanov S.-B. The target function for economic-ecological system at high risk *Modern Stochastics: Theory and Applications V* (June 1–4, 2021, Kyiv, Ukraine). Kyiv: Taras Shevchenko National University of Kyiv, 2021. P. 66.

77. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С., Сулейманов С.-Б., Симонов Д.І., Батіг Л.О. Обчислення рівноважного внеску до мережевої громади. *Actual problems of fundamental science* (June 1–5, 2021, Lutsk, Ukraine). Lutsk: Lesya Ukrainka Volyn National University, 2021. P. 160–163.

78. Горбачук В., Голоцуков Г., Дунаєвський М., Ніколенко Д. Машинне навчання та прийняття рішень. *Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання* (5–10 липня 2021 р., Івано-Франківськ, Україна). Івано-Франківськ: Прикарпатський

національний університет імені В.Стефаника, 2021. С. 92–93.

79. Горбачук В., Дунаєвський М., Батіг Л. Нова енергетика й економічні зміни. *Економіка. Фінанси. Бізнес. Парадигмальні зрушення в економічній теорії XXI ст.* (28 вересня – 1 жовтня 2021р., Київ, Україна) А.І. Ігнатюк (ред.) Київ: КНУ імені Т.Шевченка, 2021. С. 45–47.

80. Дунаєвський М.С. Емпіричні середні в задачах стохастичного програмування. *Інтелектуальні рішення* (29 вересня 2021 р., Київ, Україна). В.Є. Снитюк (ред.). Київ – Ужгород: КНУ імені Т.Шевченка, 2021. С. 111–112.

81. Dunaievskiy M.S. Optimal inventory management in condition of uncertainty. *Mathematical Modeling, Optimization and Information Technologies* (November 15–19, 2021, Chisinau (Moldova), Kyiv (Ukraine), Batumi (Georgia)). Chisinau: Moldova State University; Kyiv: V.M.Glushkov Institute of Cybernetics of the NAS of Ukraine; Batumi: Batumi Shota Rustaveli State University, 2021. P. 47–50.

82. Дунаєвський М.С. Оптимальне управління запасами як складова автоматизованого організаційного управління. *Глушковські читання* (2 грудня 2021, Київ, Україна). Київ: НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», 2021. С. 80–83.

83. Gorbachuk V.M., Dunaievskiy M.S., Suleimanov S.-B., Batih L.O. To advanced technologies of modern conflict. *Nonlinear analysis and applications. applications* (April 4–6, 2022, Kyiv, Ukraine). Kyiv: NTUU «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», 2022. P. 23.

84. Горбачук В.М., Бардадим Т.О., Лупей М.І., Ніколенко Д.І., Дунаєвський М.С., Сулейманов С.-Б., Батіг Л.О., Симонов Д.І. Інноваційні технології великих даних для підвищення безпеки АЕС. *Перспективи впровадження інновацій у атомну енергетику* (30 вересня 2022 р., Київ, Україна). Київ: Українське ядерне товариство, 2022. С. 15–16.

85. Горбачук В.М., Дунаєвський М.С. Математичні моделі підвищення ефективності децентралізованих систем та їх застосування. *Проблеми вищої*

математичної освіти: виклики сучасності (11–12 жовтня 2022 р., Вінниця, Україна). Вінниця: Вінницький національний політехнічний університет, 2022. 13 с.

86. Gaivoronski A., Gorbachuk V., Dunaievskiy M., Suleimanov S.-B. Digital platforms to deal with the information asymmetry problem. Information Technology and Implementation (December 01, 2022, Kyiv, Ukraine). V.Snytyuk (ed.). Kyiv: Taras Shevchenko National University of Kyiv, 2022. P. 44–45.

Відомості про апробацію результатів дисертації

Результати дисертації обговорювались на міжнародних та вітчизняних науково-практичних конференціях:

«IEEE Conference on Advanced Trends in Information Theory» (December 18–20, 2019, Kyiv, Ukraine) [1];

«Штучний інтелект та інтелектуальні системи» (17–18 жовтня 2017 р., Київ, Україна) [28];

«Глобальні виміри захисту економічної конкуренції» (27 жовтня 2017 р., Київ, Україна) [29];

«Інформаційні технології та взаємодії» (8–10 листопада 2017 р., Київ, Україна) [30];

«Глушковські читання» (13 грудня 2017 р., Київ, Україна) [31];

«Сучасна інформатика: проблеми, досягнення та перспективи розвитку» (13–15 грудня 2017 р., Київ, Україна) [32];

«Глобальні виміри захисту економічної конкуренції» (28 лютого 2018 р., Київ, Україна) [33];

«Nonlinear analysis and applications» (April 12, 2018, Kyiv, Ukraine) [34];

«Інноваційні ідеї в економічній науці: пошуки вирішення сучасних проблем» (19–20 квітня 2018 р., Київ, Україна) [35];

«Інформаційно-комп'ютерні технології – 2018» (20 квітня 2018 р., Житомир, Україна) [36];

«Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання» (14–19 травня 2018 р., Івано-Франківськ, Україна) [37];

«Здоров'я і суспільні виміри в академічному просторі та поза ним» (23 травня 2018 р., Київ, Україна) [38];

«PDMU-2018» (July 3–8, 2018, Lankaran–Baku, Azerbaijan) [39];

«Міжнародна конференція з математичного моделювання, присвячена 250-річчю з дня народження Жана Батиста Жозефа Фур'є» (17–21 вересня 2018 р., Херсон, Україна) [40];

«Контроль і управління в складних системах» (15–17 жовтня 2018 р., Вінниця, Україна) [41];

Modelare matematica, optimizare si tehnologii informationale. (November 12–16, 2018, Chisinau, Moldova) [42];

«Проблеми современной ядерной энергетики» (14–16 ноября 2018 г., Харьков, Украина) [43];

«Інформаційні технології та взаємодії» (20–21 листопада 2018 р., Київ, Україна) [44];

«Глушковські читання» (21 листопада 2018 р., Київ, Україна) [45];

«Нейронауки та когнітивні системи в економіці» (19 лютого 2019 р., Київ, Україна) [46];

«Інноваційні ідеї в економічній науці: пошуки вирішення сучасних проблем» (11–12 квітня 2019 р., Київ, Україна) [47];

«Обчислювальний інтелект» (15–20 квітня 2019 р., Ужгород, Україна) [48];

«Теорія прийняття рішень» (15–20 квітня 2019 р., Ужгород, Україна) [49];

«Norwegian-Eurasian workshop on new resilience challenges in ecological-economic problems at the digital era» (Київ, вересень 23–25, 2019);

«Удосконалювання енергоустановок методами математичного і фізичного моделювання» (8–10 жовтня 2019 р., Харків, Україна) [50];

«Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем» (20–22 листопада 2019 р., Дніпро, Україна) [51];

«Тенденції розвитку публічних та корпоративних секторів економіки України в умовах макроекономічної нестабільності» (29 січня 2020 р., Київ, Україна) [52];

«Проблеми міжнародної міграції: оцінка та перспективи вирішення» (16 травня 2020 р., Одеса, Україна) [53];

«Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання» (18–19 травня 2020 р., Івано-Франківськ, Україна) [54];

«International Conference High Performance Computing HPC-UA 2020» (6–7 November 2020, Kyiv, Ukraine) [55];

«Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем» (18–20 листопада 2020 р., Дніпро, Україна) [56];

«Глушковські читання» (18 грудня 2020 р., Київ, Україна) [57];

«International Conference on Software Engineering» (April 12–14 2021, Kyiv, Ukraine) [58];

«Global and regional problems of informatization in society and nature using 2021» (13–14 May 2021, Kyiv, Ukraine) [59];

«Modern Stochastics: Theory and Applications V» (June 1–4 2021, Kyiv, Ukraine) [60];

«Actual problems of fundamental science» (1–5 June 2021, Lutsk, Ukraine) [61];

«Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання» (5–10 липня 2021р, Івано-Франківськ, Україна) [62];

«Економіка. Фінанси. Бізнес. Парадигмальні зрушення в економічній теорії XXI ст.» (28 вересня – 1 жовтня 2021 р., Київ, Україна) [63];

«Інтелектуальні рішення – Симпозіум» (29 вересня 2021 р., Київ – Ужгород, Україна) [64];

«Mathematical Modeling, Optimization and Information Technologies» (November 15–19 2021, Chisinau (Moldova), Kyiv (Ukraine), Batumi (Georgia)) [65];

«Глушковські читання» (2 грудня 2021 р., Київ, Україна) [66];

«Nonlinear analysis and applications» (April 4–6 2022, Kyiv, Ukraine) [67];

«Перспективи впровадження інновацій у атомну енергетику» (30 вересня 2022 р., Київ, Україна) [68];

«Проблеми вищої математичної освіти: виклики сучасності» (11–12 жовтня 2022 р., Вінниця, Україна) [69];

«Information Technology and Implementation» (December 01 2022, Kyiv, Ukraine) [70];

Штучний інтелект (17–19 жовтня 2017 р., Київ, Україна) [71];

Штучний інтелект (18–19 жовтня 2018 р., Київ, Україна) [72];

«Питання оптимізації обчислень» (24 –27 вересня 2019 р., Київ, Україна) [73].

Додаток 2. Порівняльна ефективність районів Луганщини

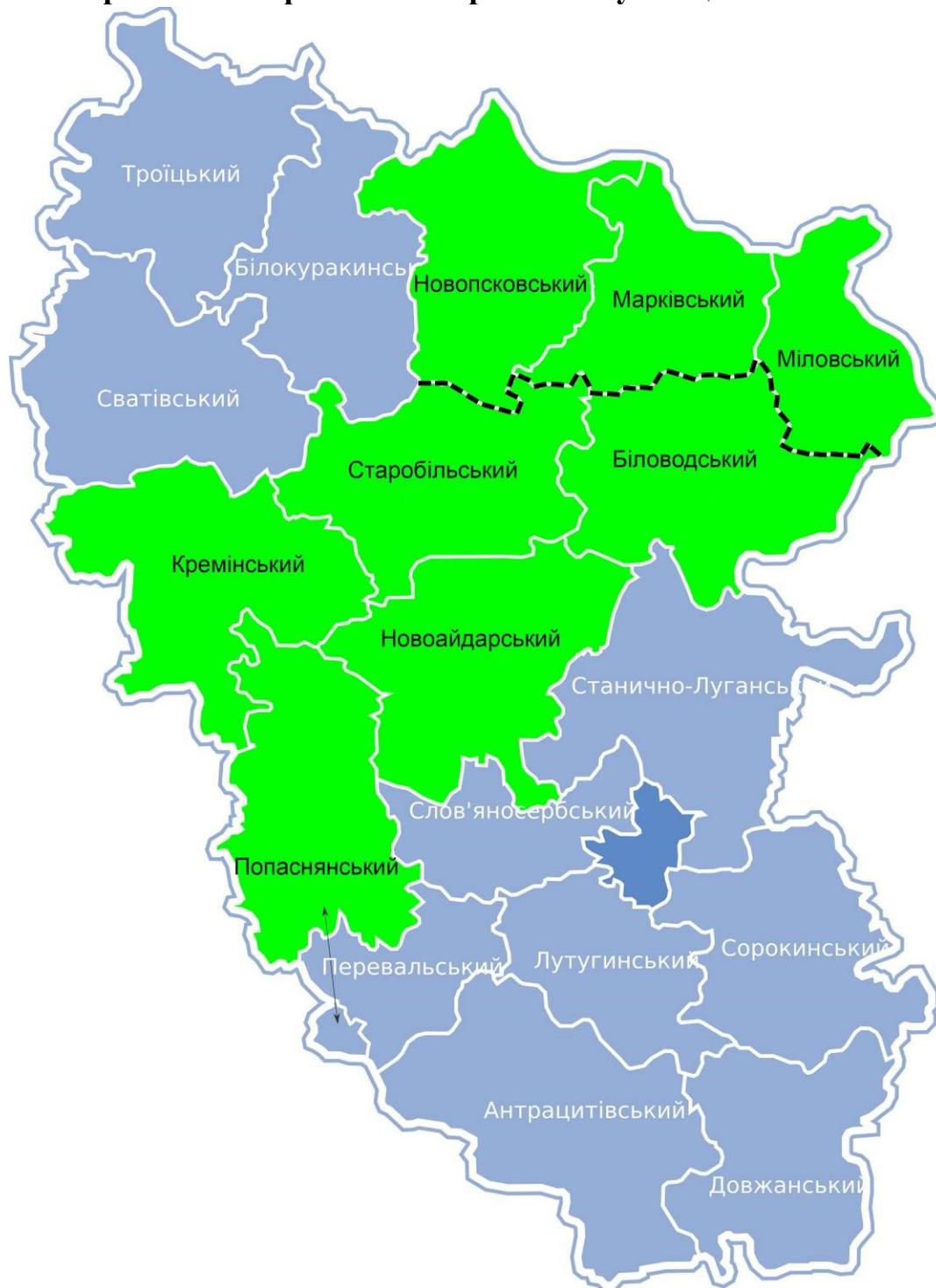


Рисунок 4.1. Райони лідери Луганської області за економічною ефективністю (позначені зеленим кольором, 2 кластери) (без врахування тимчасово окупованих територій) (на основі статистичних даних за I-IV кв 2017 р. – I-III кв. 2018 р.)

Додаток 3. Порівняльна ефективність районів Кіровоградщини

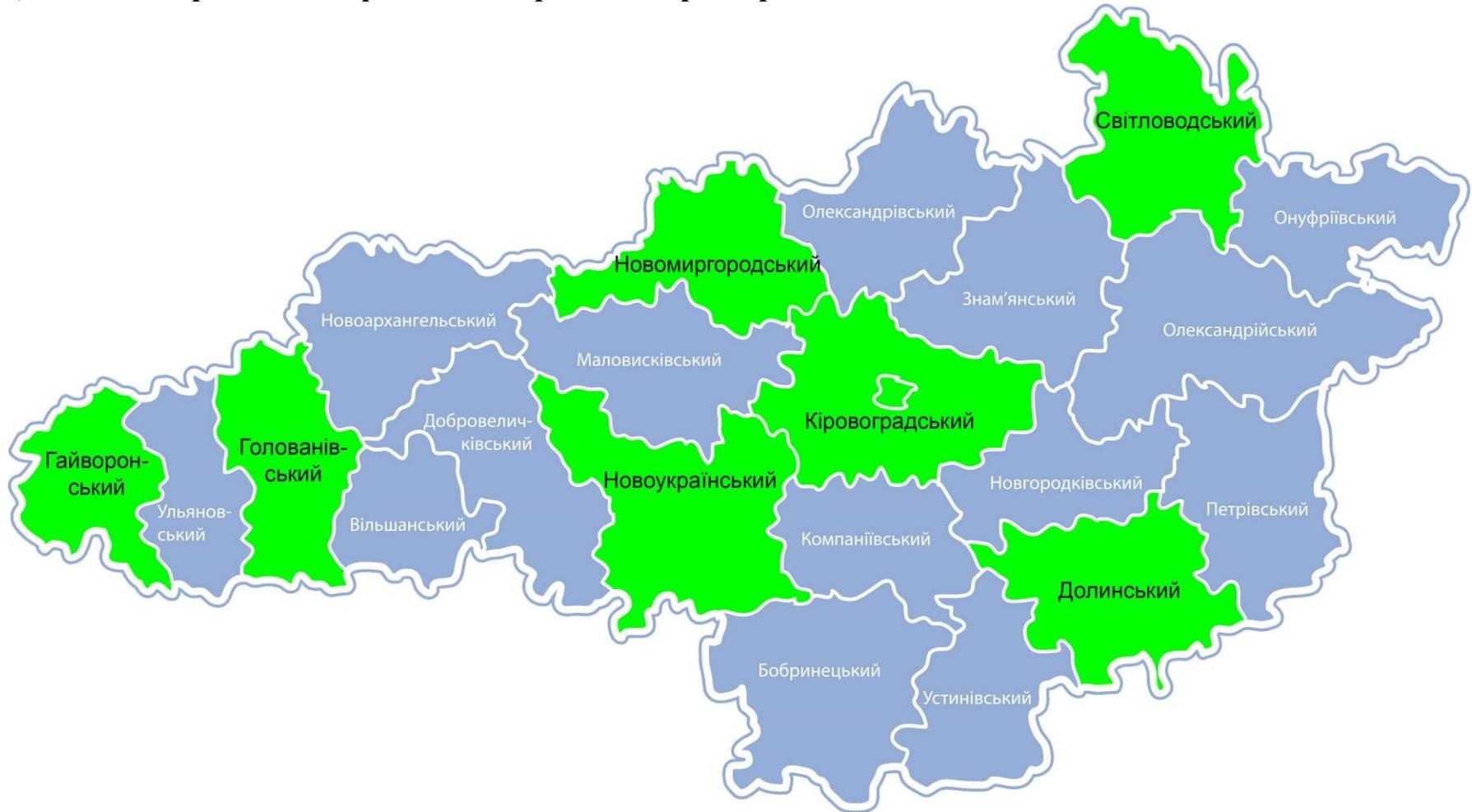


Рисунок 4.2. Райони лідери Кіровоградської області за економічною ефективністю (позначені зеленим кольором) (на основі статистичних даних за період I-IV кв 2017 р. – I-II кв. 2018 р.)

Додаток 4. Порівняльна ефективність районів Тернопільщини

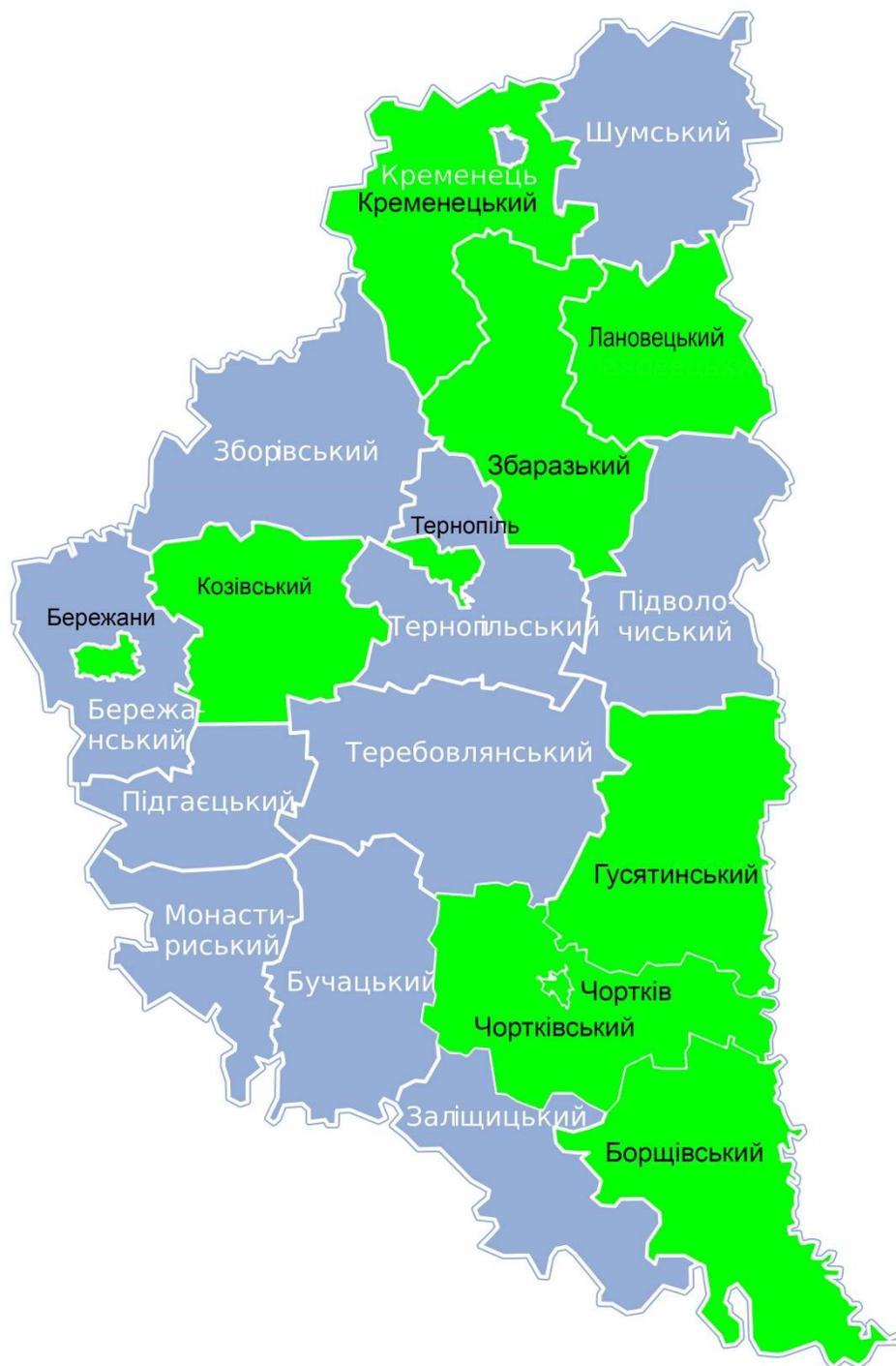


Рисунок 4.3. Райони та міста лідери Тернопільської області за економічною ефективністю (позначені зеленим кольором) (на основі статистичних даних за період I-IV кв 2017 р. – I-III кв. 2018 р.)