

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет менеджменту та маркетингу

Кафедра економічної кібернетики

ДО ЗАХИСТУ ДОПУЩЕНО

Завідувач кафедри

_____ Катерина БОЯРИНОВА

«_____» червня 2025 р.

ДИПЛОМНА РОБОТА

**на здобуття ступеня бакалавра
за освітньо-професійною програмою
«Економічна кібернетика»
спеціальності 051 «Економіка»**

**на тему: «Економіко-математичне моделювання розвитку меблевої індустрії
України»**

Виконав:

студент IV курсу, групи УК-11

Стаднюк Роман Дмитрович

Керівник:

доцент кафедри економічної кібернетики, к.ф.-м.н., доцент

Лазаренко Ірина Сергіївна

Рецензент:

професор кафедри міжнародної економіки, д.т.н., професор

Гавриш Олег Анатолійович

Засвідчую, що в цій дипломній роботі
немає запозичень з праць інших авторів
без відповідних посилань.

Студент

Київ – 2025

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Факультет менеджменту та маркетингу

Кафедра економічної кібернетики

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність 051 «Економіка»

Освітньо-професійна програма «Економічна кібернетика»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Катерина БОЯРИНОВА

«05» лютого 2025 р.

ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Стаднюку Роману Дмитровичу

1. Тема роботи: «Економіко-математичне моделювання розвитку меблевої індустрії України»

керівник роботи **Лазаренко Ірина Сергіївна**, к.ф.-м.н., доцент

затверджені наказом по університету від «26» травня 2025 р. № 1747-с

2. Термін подання студентом роботи: 02.06.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи: наукова та навчально-методична література, публікації вітчизняних та іноземних учених, наукові статті, аналітичні звіти Української асоціації меблевиків, офіційні статистичні дані Державної служби статистики України, Національного банку України, Державного агентства лісових ресурсів України, статистичної бази даних *Eurostat*, бази даних з міжнародної торгівлі *UN Comtrade*, а також інформація, отримана в рамках проходження переддипломної практики у ННЦ «Світовий центр даних з геоінформатики та сталого розвитку».

4. Зміст пояснювальної записки:

а) теоретична частина:

- дослідити теоретико-методичні основи моделювання меблевої галузі;
- розкрити сутність, особливості та тенденції розвитку меблевої індустрії;
- проаналізувати методи оптимізації структури експорту в умовах динамічної макроекономіки.

б) аналітична частина:

- провести аналіз сучасного стану меблевої індустрії України та її зовнішньоторговельної діяльності;
- формалізувати задачу динамічного моделювання оптимальної структури експорту меблів і побудувати її економіко-математичну модель;
- здійснити моделювання оптимальної структури експорту меблів, апробувати модель та провести аналіз результатів.

в) рекомендаційна частина:

- здійснити аналіз та оцінку ефективності запропонованої моделі в контексті розвитку галузі;
- розробити рекомендації щодо реалізації моделі в практиці зовнішньоекономічної політики підприємств та держави.

5. Перелік ілюстративного матеріалу:

1. Типологія економіко-математичних моделей у галузевому аналізі.
2. Динаміка кількості діючих підприємств і діючих фізичних осіб-підприємців меблевої галузі України за 2014-2023 рр.
3. Динаміка чистого прибутку та рентабельності підприємств меблевої галузі України за 2014-2023 рр.
4. Динаміка співвідношення обсягів реалізованої меблевої продукції в Україні та за її межами та частки експорту в загальних реалізованих обсягах за 2014-2024 рр.
5. Динаміка обсягів експорту меблів до країн ЄС та їх частки до загальних обсягів експорту меблів України за 2018-2024 рр.
6. Динаміка структури експорту меблів до топ-10 країн-імпортерів ЄС та решти країн світу за 2022-2024 рр.
7. Перевірка статусу успішності оптимізації структури експорту меблів на 2024 рік та її результат.
8. Порівняння фактичних й оптимальних обсягів експорту меблів по країнах та зміна оптимальних обсягів відносно фактичних для 2024 року.
9. Перевірка статусу успішності оптимізації структури експорту меблів на 2025 рік та її результат.
10. Порівняння прогнозованих й оптимальних обсягів експорту меблів по країнах та зміна оптимальних обсягів відносно прогнозованих для 2025 року.

6. Дата видачі завдання: «05» лютого 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Збір необхідної інформації теоретичного та методичного характеру, вивчення та аналіз літературних джерел щодо моделювання розвитку меблевої галузі і оптимізації її діяльності	06.02.2025 – 23.02.2025	
2.	Розгляд теоретико-методичних засад дослідження розвитку меблевої галузі та вивчення методів оптимізації її зовнішньоторговельної діяльності	24.02.2025 – 23.03.2025	
3.	Вибір ключових параметрів для дослідження та постановка економічної задачі	24.03.2025 – 30.03.2025	
4.	Побудова та формалізація економіко-математичної моделі оптимізації структури експорту меблів з України до країн ЄС	31.03.2025 – 13.04.2025	
5.	Вибір програмного забезпечення, розробка програмного коду для автоматизації розрахунків і виконання моделювання	14.04.2025 – 27.04.2025	
6.	Економіко-математичне моделювання оптимальної структури експорту меблів з України до топ-10 країн ЄС	28.04.2025 – 11.05.2025	
7.	Аналіз отриманих результатів моделювання, порівняння структур експорту й оцінка ефективності оптимальної структури експорту	12.05.2025 – 18.05.2025	
8.	Прогностичне моделювання та формування рекомендацій щодо реалізації моделі в практиці зовнішньоекономічної політики підприємств меблевої галузі та держави	19.05.2025 – 25.05.2025	
9.	Оформлення дипломної роботи першого (бакалаврського) рівня вищої освіти	26.05.2025 – 01.06.2025	

Студент

Роман СТАДНЮК

(підпис)

Керівник дипломної роботи

Ірина ЛАЗАРЕНКО

(підпис)

РЕФЕРАТ

Дипломна робота на тему «Економіко-математичне моделювання розвитку меблевої індустрії України» містить 90 сторінок, 8 таблиць, 14 рисунків, 4 додатків. Перелік посилань нараховує 34 найменування.

Метою роботи є визначення теоретико-методичних засад, розробка економіко-математичної моделі оптимізації структури експорту меблів з України до країн ЄС з урахуванням динаміки макроекономічних факторів і реальних обмежень на зміну експортної політики та формування рекомендацій щодо реалізації моделі в практиці зовнішньоекономічної політики підприємств і держави.

Об'єктом дипломної роботи є меблева галузь України в умовах міжнародної економічної взаємодії.

Предмет дипломної роботи – сукупність теоретичних аспектів, методів, моделей та процес формування та оптимізації структури експорту меблів з України на основі економіко-математичних моделей.

Методи дослідження. Використовувалися такі методи: метод абстрагування й узагальнення використовувався для формування теоретичних підходів до оцінки ефективності експорту меблів, а також для формалізації ключових факторів впливу; аналіз і синтез економічної інформації забезпечили обробку статистичних показників; порівняльний аналіз дозволив співставити фактичну й оптимальну структури експорту, виявивши резерви підвищення ефективності; економіко-математичне моделювання лягло в основу побудови моделі оптимального розподілу експортного ресурсу з урахуванням низки обмежень і цільової функції; прогнозування на основі емпіричних даних було використано для формування очікуваної структури експорту на 2025 рік та визначення ресурсного обмеження для моделі на цей же рік; візуалізація даних дала змогу проілюструвати результати моделювання в наочному форматі.

Результати роботи. У результаті виконання дипломної роботи було побудовано, формалізовано та реалізовано економіко-математичну модель оптимізації структури експорту меблів з України до країн ЄС, яка враховує сукупність економічних, логістичних і ринкових чинників. На основі реальних статистичних даних здійснено розрахунок інтегрального показника ефективності експорту до кожної країни, проведено моделювання оптимальної структури експорту меблів на 2024 та 2025 роки з урахуванням динамічного підходу, інерційності змін і ефекту насичення ринку. Апробація моделі показала її здатність виявляти перспективні напрями експорту, а також обґрунтовано пропонувати корекцію поточної структури постачань.

Рекомендації щодо використання результатів роботи. Практична цінність отриманих результатів полягає в можливості використання моделі як аналітичного інструменту для стратегічного планування зовнішньоекономічної діяльності меблевих підприємств, галузевих об'єднань та органів державної політики у сфері підтримки експорту.

Ключові слова: економіко-математичне моделювання, структура експорту, меблева індустрія України, динамічна модель, інтегральний показник ефективності, зовнішньоекономічна діяльність, прогнозування обсягів експорту.

ABSTRACT

The bachelor's thesis titled «Economic and Mathematical Modeling of the Development of Ukraine's Furniture Industry» includes 90 pages, 8 tables, 14 drawings, and 4 attachments. The bibliography list consists of 34 items.

The purpose of the work is to determine the theoretical and methodological foundations and to develop an economic and mathematical model for optimizing the structure of furniture exports from Ukraine to EU countries, taking into account the dynamics of macroeconomic factors and real constraints on export policy shifts. The study also provides recommendations for implementing the model in the practice of foreign economic policy at both enterprise and national levels.

The object of the thesis is the furniture industry of Ukraine within the context of international economic interaction.

The subject of the thesis is the complexes of theoretical aspects, methods, models, and the process of forming and optimizing the structure of furniture exports from Ukraine based on economic and mathematical modeling.

Research methods. The following methods were employed in the study: the method of abstraction and generalization was used to formulate theoretical approaches to assessing the efficiency of furniture exports and to formalize key influencing factors; analysis and synthesis of economic data facilitated the processing of statistical indicators; comparative analysis enabled the juxtaposition of actual and optimal export structures, revealing potential efficiency improvements; economic and mathematical modeling served as the basis for constructing the optimal allocation model of export resources, considering various constraints and the objective function; forecasting based on empirical data was applied to estimate the expected export structure for 2025 and define the resource constraints for that year; data visualization was used to present the modeling results in a comprehensible format.

Results of work. As a result of the thesis, an economic and mathematical model for optimizing the structure of furniture exports from Ukraine to EU countries was constructed, formalized, and implemented. The model accounts for a set of economic, logistical, and market factors. Using actual statistical data, an integral indicator of export efficiency for each target country was calculated. The optimal export structure for 2024 and 2025 was modeled with consideration of a dynamic approach, change inertia, and market saturation effects. Model testing demonstrated its ability to identify promising export directions and justify adjustments to the current supply structure.

Recommendations for the use of work results. The practical value of the developed model lies in its potential use as an analytical tool for strategic planning of foreign trade activities by furniture enterprises, industry associations, and government institutions responsible for export promotion.

Keywords: *economic and mathematical modeling, export structure, furniture industry of Ukraine, dynamic model, integral efficiency indicator, foreign economic activity, export volume forecasting.*

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ МОДЕЛЮВАННЯ РОЗВИТКУ МЕБЛЕВОЇ ГАЛУЗІ В УМОВАХ ЗОВНІШНЬОЕКОНОМІЧНОЇ ВЗАЄМОДІЇ.....	12
1.1 Теоретико-методичні основи моделювання розвитку меблевої галузі	12
1.2 Сутність, особливості та тенденції розвитку меблевої індустрії України	18
1.3 Аналіз методів оптимізації структури експорту в умовах динамічної макроекономіки	25
Висновки до першого розділу	33
2 АНАЛІЗ СТАНУ МЕБЛЕВОЇ ІНДУСТРІЇ УКРАЇНИ ТА ПОБУДОВА МОДЕЛІ ОПТИМІЗАЦІЇ СТРУКТУРИ ЕКСПОРТУ	35
2.1 Аналіз сучасного стану меблевої індустрії України	35
2.2 Формалізація задачі динамічного моделювання оптимальної структури експорту меблів з України до країн ЄС в контексті її розвитку	50
2.3 Реалізація економіко-математичного моделювання оптимальної структури експорту для розвитку меблевої індустрії	57
Висновки до другого розділу	63
3 РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО РЕАЛІЗАЦІЇ МОДЕЛІ РОЗВИТКУ МЕБЛЕВОЇ ІНДУСТРІЇ УКРАЇНИ	65
3.1 Аналіз результатів та оцінка ефективності моделі в контексті розвитку меблевої галузі.....	65
3.2 Рекомендації щодо реалізації моделі в практиці експортоорієнтованого розвитку підприємств та держави	70
Висновки до третього розділу.....	75
ВИСНОВКИ.....	77
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	80
ДОДАТКИ.....	83

ВСТУП

У сучасних умовах глобалізації та зростаючої міжнародної конкуренції особливої актуальності набувають питання підвищення ефективності зовнішньоекономічної діяльності галузей національної економіки. Експортна стратегія країни має формуватися на основі об'єктивного аналізу ринкової кон'юнктури, адаптації до макроекономічних змін та ефективного використання внутрішніх ресурсів. Особливо це стосується тих галузей, які мають значний експортний потенціал, зокрема меблевої індустрії України.

Меблева індустрія є динамічною складовою українського виробництва, яка демонструє стійкі темпи зростання експорту до країн Європейського Союзу, особливо з початком російсько-української війни, внаслідок якої одна частина ринків припинила своє існування для України, а інша частина стала важкодоступною з точки зору логістики. Разом із тим, ефективність цієї діяльності значною мірою залежить від здатності адаптувати експортну політику до змін у зовнішньому середовищі: купівельної спроможності споживачів, рівня митного навантаження, транспортних витрат, цінових рівнів і коливань тощо. Саме тому виникає потреба в застосуванні економіко-математичних методів для оптимального розподілу експортних ресурсів на основі аналітичного прогнозування та кількісного аналізу ситуації на зовнішніх ринках.

Актуальність теми дослідження зумовлена як потребою підвищення міжнародної конкурентоспроможності українських меблевих підприємств, так і необхідністю формування науково обґрунтованих підходів до планування та оптимізації структури експорту, що в сукупності призводить до розвитку меблевої галузі України. Запропоноване моделювання дозволяє враховувати змінність зовнішньоекономічних умов і, що важливо, інерційність рішень, тобто обмеження на різку перебудову експортної політики, що відповідає реальній практиці функціонування галузі й економіки в цілому.

Мета дипломної роботи – визначення теоретико-методичних засад, розробка економіко-математичної моделі оптимізації структури експорту меблів з

України до країн ЄС з урахуванням динаміки макроекономічних факторів і реальних обмежень на зміну експортної політики та формування рекомендацій щодо реалізації моделі в практиці зовнішньоекономічної політики підприємств і держави.

Завдання дипломної роботи для досягнення поставленої мети:

- дослідити теоретико-методичні основи моделювання меблевої галузі;
- розкрити сутність, особливості та тенденції розвитку меблевої індустрії;
- проаналізувати методи оптимізації структури експорту в умовах динамічної макроекономіки;
- провести аналіз сучасного стану меблевої індустрії України та її зовнішньоторговельної діяльності;
- формалізувати задачу динамічного моделювання оптимальної структури експорту меблів і побудувати її економіко-математичну модель;
- здійснити моделювання оптимальної структури експорту меблів, апробувати модель та провести аналіз результатів;
- здійснити аналіз та оцінку ефективності запропонованої моделі в контексті розвитку галузі;
- розробити рекомендації щодо реалізації моделі в практиці зовнішньоекономічної політики підприємств та держави.

Об'єкт дослідження – меблева галузь України в умовах міжнародної економічної взаємодії.

Предмет дослідження – сукупність теоретичних аспектів, методів, моделей та процес формування та оптимізації структури експорту меблів з України на основі економіко-математичних моделей.

Базою дослідження є дані й аналітичні звіти Української Асоціації Меблевіків, статистичні дані Державної служби статистики України, *UN Comtrade*, *Eurostat*, а також інформація, отримана в рамках проходження переддипломної практики у ННЦ «Світовий центр даних з геоінформатики та сталого розвитку».

Методи дослідження, що застосовувалися в дипломній роботі: метод абстрагування й узагальнення використовувався для формування теоретичних підходів до оцінки ефективності експорту меблів, а також для формалізації ключових факторів впливу; аналіз і синтез економічної інформації забезпечили обробку статистичних показників, виявлення взаємозв'язків між ними та структурування факторної бази моделі; порівняльний аналіз дозволив співставити фактичну й оптимальну структури експорту, виявивши резерви підвищення ефективності; економіко-математичне моделювання лягло в основу побудови моделі оптимального розподілу експортного ресурсу з урахуванням низки обмежень і цільової функції; прогнозування на основі емпіричних даних було використано для формування очікуваної структури експорту на 2025 рік та визначення ресурсного обмеження для моделі на цей же рік; візуалізація даних дала змогу проілюструвати результати моделювання, порівняння та зміни у структурі експорту у зрозумілому та наочному форматі.

Результати дипломної роботи: у результаті виконання дипломної роботи було побудовано, формалізовано та реалізовано економіко-математичну модель оптимізації структури експорту меблів з України до країн ЄС, яка враховує сукупність економічних, логістичних і ринкових чинників. На основі реальних статистичних даних здійснено розрахунок інтегрального показника ефективності експорту до кожної країни, проведено моделювання оптимальної структури експорту меблів на 2024 та 2025 роки з урахуванням динамічного підходу, інерційності змін і ефекту насичення ринку. Апробація моделі, на основі порівняння оптимальної та фактичної структур експорту меблів на 2024 рік, показала її здатність виявляти перспективні напрями експорту, а також обґрунтовано пропонувати корекцію поточної структури постачань.

Рекомендації щодо використання результатів роботи.

Практична цінність отриманих результатів полягає в можливості використання моделі як аналітичного інструменту для стратегічного планування зовнішньоекономічної діяльності меблевих підприємств, галузевих об'єднань та органів державної політики у сфері підтримки експорту.

Використання результатів моделювання сприяє підвищенню ефективності прийняття управлінських рішень, зменшенню ризиків при виході на нові ринки та забезпеченню довгострокової стабільності зовнішньоекономічної діяльності підприємств даної галузі

Публікації. Лазаренко І., Стаднюк Р. Сучасне моделювання та аналіз перспектив лісової галузі та меблевого ринку України. Моделювання та прогнозування економічних процесів: зб. тез доп. XVIII Міжнар. наук.-практ. конф. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. С. 70-72.
URL: https://ecocyber.fmm.kpi.ua/wp-content/uploads/2025/05/mpep_XVIII_2024.pdf

1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ МОДЕЛЮВАННЯ РОЗВИТКУ МЕБЛЕВОЇ ГАЛУЗІ В УМОВАХ ЗОВНІШНЬОЕКОНОМІЧНОЇ ВЗАЄМОДІЇ

1.1 Теоретико-методичні основи моделювання розвитку меблевої галузі

Економіко-математичне моделювання є ключовим інструментом у дослідженні складних соціально-економічних систем, зокрема галузей національної економіки [1]. Його застосування дозволяє формалізувати закономірності економічного розвитку, прогнозувати динаміку показників, оптимізувати розподіл ресурсів і приймати обґрунтовані управлінські рішення в умовах невизначеності [1]. У контексті галузевого аналізу, економіко-математичні моделі є тим інструментом, що дозволяє враховувати міжгалузеві зв'язки, вплив зовнішнього середовища, інерційність змін та часову динаміку процесів [1].

Історія економіко-математичного моделювання як наукового напрямку сягає початку XX століття [2]. Її витоки пов'язані з роботами таких вчених, як В. Парето, Л. Вальрас, А. Маршалл, які намагалися формалізувати закономірності економічної поведінки через математичні функції [2; 3]. Проте справжній прорив відбувся в середині XX століття з появою моделей Леонтьєва та Неймана, які запропонували практичні підходи до дослідження економічної динаміки та міжгалузевих зв'язків [2; 3].

Особливого значення набули дослідження Копманса, Форрестера та Самуельсона, які впровадили оптимізаційний і системно-динамічний підходи. Саме в цей період економіка перестає бути виключно описовою дисципліною та перетворюється на об'єкт формалізованого аналізу, що посприяло створенню сучасних інформаційних систем підтримки економічних рішень.

Під економіко-математичною моделлю розуміють формалізоване у вигляді математичних залежностей (рівнянь, нерівностей, функціоналів) відображення економічного об'єкта або процесу, яке дозволяє дослідити його поведінку, встановити кількісні залежності, а також розрахувати можливі сценарії розвитку [2].

Залежно від мети дослідження економіко-математичні моделі поділяються на [3]:

- описові (дескриптивні) – моделі, які фіксують існуючі зв'язки між змінними, наприклад, між обсягом виробництва та інвестиціями [3];
- аналітичні (прогностичні) – моделі, що дозволяють здійснювати прогнозування динаміки економічних показників [3];
- оптимізаційні – моделі, основним завданням яких є визначення найкращого (оптимального) варіанту розвитку за певними критеріями та обмеженнями [3];
- імітаційні (системної динаміки) – моделі, що дозволяють імітувати поведінку складних нелінійних систем у динаміці [3].

Детальніша описово-порівняльна характеристика даних типів економіко-математичних моделей наведена в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Порівняння типів економіко-математичних моделей

Тип моделі	Мета	Математичний апарат	Сфера застосування
1	2	3	4
Описові (дескриптивні)	Встановлення існуючих зв'язків між змінними	Регресійний аналіз, кореляція	Опис структур галузі, поведінка споживачів
Аналітичні (прогностичні)	Прогнозування значень змінних у майбутньому	Часові ряди, трендові моделі, авторегресії	Прогноз ВВП, обсягів продажів, цін
Оптимізаційні	Знаходження найкращого рішення серед можливих	Лінійне та нелінійне програмування, цільові функції	Оптимізація бюджету, виробничого плану
Імітаційні (системної динаміки)	Моделювання динаміки складних систем у часі	Диференціальні рівняння, симуляція	Моделювання ринків, логістичних систем

Джерело: складено на основі [3]

Можна також виокремити класи моделей за типом даних (статичні, динамічні), за математичним апаратом (лінійні, нелінійні, стохастичні, детерміновані), за кількістю цілей (однокритеріальні, багатокритеріальні), за рівнем агрегування (макро-, мезо- та мікромоделі).

Важливо відзначити, що моделювання економіки окремої галузі часто потребує поєднання кількох підходів, оскільки на її функціонування впливають як внутрішні, так і зовнішні фактори. При цьому ключову роль відіграє не лише правильний вибір моделі, але й її параметризація на основі реальних економічних даних.

Також слід зазначити, що тип моделі доцільно підбирати залежно від природи конкретної галузі [4]. Наприклад, для ресурсомістких галузей (металургія, енергетика тощо) краще підходять оптимізаційні моделі з акцентом на витрати й виробничі потужності [4]. Натомість для інноваційних і динамічних галузей (ІТ, біотехнології тощо) частіше застосовуються імітаційні моделі, які враховують непередбачувані фактори розвитку [4].

Експортоорієнтовані галузі, як-от меблева промисловість, потребують комбінованих моделей, що враховують зовнішні шоки (наприклад, коливання валют, логістичні кризи) та дають змогу адаптувати структуру експорту залежно від зовнішнього попиту. У таких випадках особливу цінність мають динамічні моделі з обмеженням на швидкість перебудови структури рішень, які відображають інерцію галузі.

Розвиток галузей національної економіки залежить від низки взаємопов'язаних чинників: обсягів інвестицій, державної політики, цінових змін, міжнародного попиту, технологічного оновлення тощо [4]. Для ефективного аналізу таких комплексних систем використовуються галузеві моделі, які враховують внутрішню структуру галузі, її взаємодію з іншими секторами економіки, а також часову динаміку показників [4].

Серед основних підходів, які застосовуються в моделюванні розвитку галузей, виділяють [5]:

- моделі міжгалузевого балансу (на основі методики Леонтьєва), які дозволяють враховувати виробничо-технологічні зв'язки між галузями [5];
- моделі економічної динаміки (наприклад, моделі Солоу або Харрода-Домара), що імітують довгостроковий розвиток виробництва [5];

- оптимізаційні моделі розподілу ресурсів, які дозволяють визначати найефективніше використання наявних ресурсів для досягнення стратегічних цілей [5];

- багатокритеріальні моделі оцінки ефективності з урахуванням кількох факторів (наприклад, економічна вигода, стабільність, екологічні наслідки тощо) [5].

Для кожного з підходів характерні свої математичні особливості. Наприклад, у міжгалузевому балансі широко застосовуються системи лінійних рівнянь, а в моделюванні динаміки – різницеві або диференціальні рівняння. В оптимізаційних задачах найчастіше використовуються лінійне та нелінійне програмування, а також методи динамічного програмування, якщо рішення приймаються в часі.

Також у сучасних дослідженнях все частіше використовуються комбіновані моделі, що поєднують класичне економіко-математичне моделювання з методами машинного навчання, що дозволяє підвищити точність прогнозів та адаптивність до змін середовища.

На рис. 1.1 наведено загальну схему типології моделей для аналізу галузевого розвитку, яку можна використовувати як узагальнюючий концептуальний підхід.

Використання економіко-математичного моделювання для аналізу галузевого розвитку набуває дедалі більшого поширення в дослідницькій і прикладній економіці, зокрема в стратегіях соціально-економічного розвитку, аналізі ефективності використання ресурсів і оптимізації управлінських рішень [6]. В Україні такі моделі використовуються в дослідженнях розвитку сільського господарства, енергетики, промисловості, а також у регіональній економіці [6].

Наприклад, у межах дослідження сталого розвитку регіонів України була побудована модель оптимального розподілу інвестицій між секторами з урахуванням екологічних обмежень і прогнозованої віддачі [7]. Для побудови використовувалося багатокритеріальне нелінійне програмування [7].

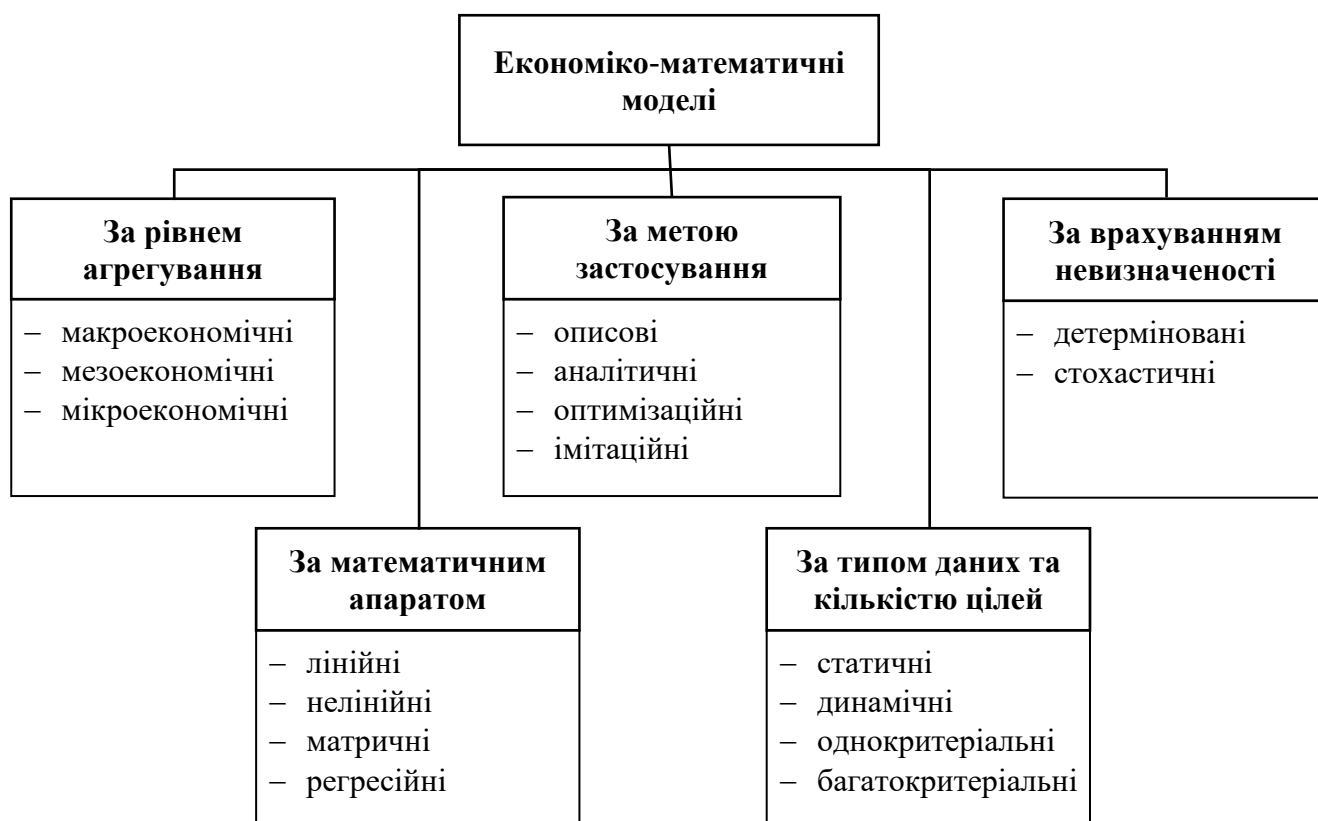


Рисунок 1.1 – Типологія економіко-математичних моделей у галузевому аналізі

Джерело: складено на основі [2]

Іншим прикладом є використання моделей міжгалузевих балансу в економіці України. Так, в роботах Інституту економіки та прогнозування НАН України регулярно будуються прогнозні моделі з використанням адаптованих таблиць «витрати-випуск», що дозволяє оцінити мультиплікативний ефект змін у певній галузі (наприклад, промисловості чи будівництві) на суміжні сектори економіки [8].

В контексті розвитку експорту та торгівельної політики, зокрема в меблевій галузі, актуальним є моделювання структури експорту з урахуванням ефективності, зовнішньоекономічних бар'єрів та попиту [9]. Такі моделі, як правило, мають оптимізаційний характер і базуються на методах динамічного або стохастичного програмування, дозволяючи враховувати часову змінність факторів і адаптаційні властивості системи [9].

Особливо важливою є можливість включення інерційності у зміну управлінських рішень у таких моделях. Це дозволяє враховувати реальні обмеження бізнесу: неможливість миттєво перебудувати логістичні канали, обсяги

виробництва чи напрямки зовнішньоекономічної діяльності. Саме такий підхід використовується у дипломній роботі – динамічна оптимізаційна модель розподілу експортного ресурсу в меблевій галузі, яка враховує попередні значення змінних при прийнятті рішень у наступному періоді.

При моделюванні галузевого розвитку в умовах України необхідно враховувати низку специфічних факторів. По-перше, це обмежена якість та деталізація статистичних даних, що вимагає ретельного підбору вхідних змінних і агрегування інформації з кількох джерел [2; 5]. По-друге, вплив політичної нестабільності, воєнних чинників та логістичних обмежень формує потребу в моделях з високим ступенем адаптивності [2; 5].

Також варто враховувати асиметрію реакції галузей на макроекономічні коливання: меблева галузь є відносно гнучкою, але чутливою до зміни митної політики, вартості транспортування та попиту в ЄС. Це обґрунтовує вибір моделі, що враховує попередній стан системи (наприклад, обсяги експорту в попередньому періоді) при формуванні оптимальних рішень на наступний період [5].

Одним із важливих класів моделей, що застосовуються для аналізу та прогнозування розвитку галузей, є динамічні оптимізаційні моделі, в яких управлінські рішення приймаються в умовах часової залежності між періодами [2; 5]. Такі моделі дозволяють враховувати зміну зовнішніх умов і адаптивну поведінку системи, наближаючи математичний опис до реального функціонування галузі [2; 5].

Загальна структура динамічної оптимізаційної задачі може мати вигляд (формули 1.1-1.2):

$$\max_{x_t} \sum_{t=1}^T f_t(x_t, z_{t-1}) \quad (1.1)$$

за умов:

$$\begin{cases} g_t(x_t) \leq b_t, & \text{(ресурсні обмеження)} \\ |x_t - x_{t-1}| \leq \delta_t, & \text{(обмеження на зміну)} \\ x_t \geq 0, & \text{(невід'ємність змінних)} \end{cases} \quad (1.2)$$

де x_t – вектор управлінських рішень у період t ;

z_{t-1} – набір вхідних параметрів зовнішнього середовища, відомих з попереднього періоду;

$f_t(\cdot)$ – функція економічної вигоди в період t ;

$g_t(\cdot)$ – система обмежень ресурсів у період t ;

δ_t – вектор максимально допустимих змін між періодами.

Ця структура лягає в основу моделі, що буде побудована в наступному розділі дипломної роботи. Особливістю запропонованої моделі є те, що вона враховує не лише внутрішні умови функціонування галузі, а й змінність зовнішнього економічного середовища, що є особливо актуальним для меблевої індустрії України в умовах зовнішньоекономічної інтеграції.

Таким чином, економіко-математичне моделювання є потужним інструментом дослідження розвитку галузей економіки, що дозволяє формалізувати економічні зв'язки, враховувати вплив зовнішніх і внутрішніх факторів, а також здійснювати оптимізацію рішень в умовах змінного середовища. Сучасна практика застосування таких моделей підтверджує їхню ефективність для аналітики, прогнозування і розробки стратегій розвитку, зокрема в умовах України. Запропоновані моделі можуть охоплювати різні типи – від описових до імітаційних, при цьому в контексті зовнішньоекономічної діяльності галузі меблів найбільш доречними є динамічні оптимізаційні підходи, що враховують реалії змін у часовому розрізі.

1.2 Сутність, особливості та тенденції розвитку меблевої індустрії України

Меблева індустрія України є важливою ланкою обробної промисловості, яка не лише формує частину ВВП, а й має стійку експортну орієнтацію та створює робочі місця. З початку 2000-х років вона демонструє тенденцію до інтенсивного розвитку, поступово інтегруючись у європейський ринок [1]. За рахунок конкурентоспроможного співвідношення ціни та якості українські меблі отримали популярність на зовнішніх ринках, що зумовило зростання виробництва,

інвестиційної привабливості та формування експортної спеціалізації галузі [1]. Проте вона не завжди була такою: до 2012-2014 рр. імпорт переважав експорт, тобто галузь мала імпорتنу орієнтацію, але після цього періоду курс меблевої індустрії змінився на експортну орієнтацію, і на сьогодні вона експортує більше, ніж імпортує, і навіть більше, ніж реалізує на внутрішньому ринку.

Останні роки стали випробуванням для меблевої промисловості України. Особливо після початку повномасштабного вторгнення РФ у 2022 році (2021 рік був рекордним для меблевої галузі), галузь скоротилася на 20-30% та опинилася перед необхідністю адаптації до нових умов: перебоїв у логістиці, втрати частини внутрішнього ринку, релокації підприємств і змін у зовнішньоекономічній політиці [10]. Разом із тим, саме ці виклики стали каталізатором активізації пошуку нових ринків, підвищення гнучкості виробництва та зміни стратегій розвитку [10].

Моделювання розвитку меблевої індустрії, з урахуванням її динамічної природи та чутливості до зовнішніх впливів, є надзвичайно актуальним. Адже дана галузь – це типова складна соціально-економічна система, що реагує на зміни в макроекономіці, ринку праці, технологіях, споживчих перевагах, а також є високоприбутковим напрямом, що додає високу додану вартість до відповідної сировини. Тому саме меблева промисловість виступає доцільним об'єктом для побудови економіко-математичних моделей розвитку в контексті національної промислової політики та зовнішньоекономічного позиціонування.

Меблева промисловість є одним із важливих сегментів обробної промисловості, який поєднує в собі елементи традиційного виробництва, дизайну, торгівлі та логістики. Вона охоплює підприємства, що займаються виготовленням корпусних меблів, м'яких меблів, кухонних гарнітурів, офісних меблів, меблів спеціального призначення (медичних, навчальних тощо), а також комплектуючих – фасадів, фурнітури, каркасів. У табл. 1.2 наведена узагальнена характеристика основних сегментів меблевої промисловості, яка демонструє галузеву диференціацію, технологічну специфіку та приклади продукції.

Таблиця 1.2 – Основні сегменти меблевої промисловості України та їх характеристика

Сегмент меблевої промисловості	Основні види продукції	Коротка характеристика
1	2	3
М'які меблі	Дивани, крісла, ліжка з м'яким узголів'ям	Найбільш капіталомісткий сегмент, орієнтований на побутовий попит
Корпусні меблі	Шафи, комоди, тумби, полиці	Переважає масове виробництво; активно експортується до ЄС
Кухонні меблі	Кухонні гарнітури, модульні системи	Високий рівень конкуренції, потребує адаптації під ринок
Офісні меблі	Стільці, столи, робочі зони	Залежить від попиту на комерційну нерухомість
Меблі спеціального призначення	Медичні, навчальні, меблі для готелів	Нішевий сегмент, часто виконується за індивідуальними замовленнями
Виробництво комплектуючих	Фасади, каркаси, фурнітура	Технічно орієнтований напрям, пов'язаний із машинобудуванням

Джерело: складено на основі [11] та власних досліджень автора

На сьогодні меблева індустрія України представлена понад 3000 підприємствами різних масштабів, з яких понад 90% – це малі та середні підприємства [11]. У галузі працює понад 100 тисяч осіб, що свідчить про її високу соціальну значущість [11]. За інформацією Державної служби статистики України, внесок виробництва меблів у загальну структуру промислового виробництва становить приблизно 1,7-2,3% в залежності від року, а частка у структурі експорту обробної промисловості – близько 5% [12].

Структура меблевої промисловості тісно пов'язана з іншими галузями – деревообробною, хімічною (лаки, клеї, пластики), металургійною (фурнітура), текстильною (оббивка), а також з логістикою та сферою дизайну. Таким чином, меблева індустрія виконує роль мультиплікативного вузла, що створює високу додану вартість у суміжних секторах економіки.

У системі національного господарства України меблева галузь виступає джерелом стабільного валютного надходження, завдяки експорту до країн ЄС. Наприклад, у 2021 році експорт меблів склав понад 1,05 млрд доларів США, з яких 91% – до Європи [10]. У 2022 році обсяг експорту знизився через війну, однак у

2023-2024 роках галузь продемонструвала адаптацію та часткове відновлення експортних позицій (докладніше – у 2 розділі) [10; 13].

У міжнародній класифікації меблева галузь кодується за секцією *C31.0 NACE Rev.2* (класифікація видів економічної діяльності), що дозволяє формувати порівняльну міжнародну статистику та аналітику [3].

Меблева індустрія, як об'єкт дослідження та моделювання, має низку специфічних рис, які вирізняють її серед інших секторів національного господарства. Ці особливості (1-5) мають бути враховані при побудові економіко-математичних моделей, оскільки вони визначають природу функціонування, обмеження й адаптивні можливості галузі.

Трудомісткість і відносна енергонезалежність.

Меблеве виробництво є переважно трудомістким процесом, у якому значну частину витрат становить вартість людської праці [3]. Особливо це стосується дрібносерійного і дизайнерського виробництва, яке складно автоматизувати [3]. Водночас галузь не є енергозалежною в порівнянні, скажімо, з металургією чи хімією, що забезпечує їй гнучкість у критичних умовах (наприклад, при зниженні енергопостачання) [3].

Залежність від природних ресурсів і логістики.

Сировинною основою галузі є деревина – як вітчизняного, так і імпортного походження. За даними Державного агентства лісових ресурсів, понад 60% деревини, що використовується у меблевому виробництві, надходить з українських лісгоспів, решта – імпортується (зокрема, фанера та *MDF* з Польщі, Угорщини, Румунії) [14]. Це формує чутливість галузі до коливань логістичних витрат, тарифів, валютного курсу та митних режимів.

У моделюванні це зумовлює необхідність врахування таких факторів, як вартість транспортування, мито, час доставки, логістичні ризики тощо – саме ці елементи включені до формальної оптимізаційної моделі в другому розділі дипломної роботи.

Експортна орієнтація та залежність від зовнішнього попиту.

Понад 50% меблів, що виготовляються в Україні, експортуються, головним чином до країн ЄС (близько 90%) [10; 11]. Це зумовлює сильну залежність галузі від зовнішніх ринків, особливо від купівельної спроможності, смакових уподобань, сезонних трендів та економічного циклу в країнах-імпортерах.

Відповідно, економіко-математичне моделювання структури експорту має враховувати доходи споживачів, їх купівельну спроможність, індекси споживчих цін на меблі та ємності ринків країн-імпортерів.

Домінування малих і середніх підприємств (МСП).

Особливістю галузі є висока частка малих та середніх підприємств, які, з одного боку, забезпечують гнучкість і адаптивність, а з іншого – мають обмежені можливості щодо фінансування, інвестування у масштабне виробництво чи технологічні інновації. Це також означає можливу нестабільність обсягів експорту, варіативність якості, нерівномірність завантаження потужностей.

З огляду на це, моделі мають враховувати нелінійність ефекту масштабу та обмеження щодо швидкості перебудови структури експорту (інерційність).

Чутливість до шоків (війна, пандемія).

Останні роки підтвердили певну вразливість меблевої галузі до зовнішніх шоків. Зокрема, за період 2022-2023 років [10; 13; 15]:

- 44% меблевих підприємств зазнали суттєвого скорочення доходів [10];
- 11% підприємств було релоковано до західних регіонів [15];
- близько 5% підприємств було повністю зруйновано [10];
- у 2022 році обсяги експорту впали на приблизно 25%, проте вже в 2023-2024 роках почалось відновлення [13].

Ці чинники визначають необхідність створення адаптивних моделей, які реагують на попередні періоди та включають лагові змінні.

В останні роки меблева індустрія України перебувала під впливом низки глибоких структурних змін, обумовлених як внутрішніми економічними процесами, так і зовнішніми викликами. Основними з них є: динамічна переорієнтація на європейський ринок, технологічне оновлення, адаптація до

війни, зміна споживчих пріоритетів і пошук нових каналів збуту. Розглянемо ці зміни (1-5) більш детально.

Зростання експорту до країн ЄС.

Після 2014 року, а особливо з початку 2020-х років, спостерігається стійка тенденція до зростання експорту меблів до країн Європейського Союзу. Наприклад [13; 16]:

- у 2020 році експорт меблів склав 892 млн дол. США [13; 16];
- у 2021 рекордному році – понад 1,05 млрд дол. США [13; 16];
- навіть у 2023-2024 роках, попри воєнні умови, галузь продовжила нарощувати експорт, досягнувши 909 млн дол. США у 2024 році – найвищого показника за час повномасштабної війни [13; 16].

Основними напрямками експорту залишаються: Польща (28,6%), Німеччина (21,1%) та Данія, Австрія і Бельгія (близько 5,5% кожна), що свідчить про сталу інтеграцію України у європейські ринки [17].

Технологічне оновлення і розширення асортименту.

Конкуренція на європейських ринках змушує українських виробників впроваджувати нові технології, зокрема автоматизовані виробничі лінії, програмне моделювання виробів, цифровий дизайн. Водночас розширюється асортимент меблів – від базових моделей до ексклюзивного дизайну на замовлення.

Це змінює структуру виробничих витрат і вимагає переосмислення моделей оцінки ефективності експорту, адже якість, сервіс і гнучкість стають не менш важливими, ніж ціна.

Адаптація до воєнних умов.

Повномасштабна війна внесла суттєві корективи в діяльність галузі. Зокрема [15]:

- релокація підприємств до західних областей (Львівська, Івано-Франківська, Закарпатська), де сформувались нові виробничі кластери [15];
- зміна логістичних маршрутів – акцент на наземне транспортування через західні пункти пропуску [15];

– переорієнтація на експорт як єдине джерело стабільного доходу в умовах падіння внутрішнього попиту [15].

Попри втрати частини потужностей, у 2024 році обсяги доходу меблевої галузі перевищили 40,4 млрд грн, зрісши на 56% порівняно з 2023 роком [17].

Формування іміджу України як надійного виробника меблів.

На тлі глобальної реструктуризації ланцюгів постачання, багато європейських ритейлерів шукають альтернативу китайському та білоруському постачанню. Українські виробники активно займають ці ніші. Внаслідок цього [10; 17]:

- збільшується частка контрактного виробництва під бренди ЄС [10; 17];
- розвивається аутсорсинг дизайнерських меблів;
- формується позитивний бренд українських меблів як якісних, доступних і стійких [10; 17].

Поглиблення інтеграції в європейські виробничі ланцюги.

Багато українських меблевих підприємств виконують роль контрактних виробників для *IKEA*, *Jysk*, *Kika* та інших європейських мереж. Це зумовлює [10]:

- потребу в стабільності та передбачуваності обсягів виробництва;
- необхідність відповідності стандартам ЄС [10];
- середньострокове планування на основі прогнозних моделей, що робить економіко-математичне моделювання інструментом стратегічного управління.

Отож меблева індустрія України є важливою експортоорієнтованою галуззю, яка відіграє суттєву роль у структурі обробної промисловості та національного господарства в цілому. Вона характеризується складною внутрішньою структурою, високою трудомісткістю, залежністю від логістики та сировини, а також адаптивною поведінкою в умовах зовнішніх викликів.

Особливу увагу в моделюванні цієї галузі слід приділяти її чутливості до змін зовнішнього попиту, митних бар'єрів, транспортних витрат і купівельної спроможності споживачів. В умовах війни галузь продемонструвала відносну

стійкість, зберігши експортну спрямованість і навіть досягнувши історично високих показників за обсягами експорту.

Відтак, меблева індустрія є обґрунтованим об'єктом для побудови економіко-математичних моделей розвитку, які враховують як внутрішню структуру галузі, так і зовнішньоекономічні впливи. Саме така постановка задачі – оптимізація структури експорту меблів – буде детально розглянута в аналітичному розділі цієї роботи.

1.3 Аналіз методів оптимізації структури експорту в умовах динамічної макроекономіки

У сучасному економічному середовищі, що характеризується нестабільністю, високою мінливістю зовнішніх умов і множинністю впливових факторів, оптимізація зовнішньоекономічної діяльності вимагає застосування математичного апарату, здатного враховувати як внутрішні обмеження системи, так і зовнішні ризики [1]. Особливо актуальним це є для експортоорієнтованих галузей, таких як меблева індустрія України, що функціонує в умовах постійно змінюваного зовнішнього попиту, митної політики, логістичних витрат і цінової конкуренції [1].

Методи оптимізації, які застосовуються в такому контексті, мають задовольняти кілька ключових вимог:

- бути придатними для задач динамічного характеру, коли рішення приймаються послідовно у часі, з урахуванням результатів попередніх періодів;
- враховувати складні зв'язки між змінними, зокрема нелінійного типу (наприклад, ефект масштабу, спадна гранична віддача/корисність тощо);
- передбачати існування обмежень, як ресурсних (експортна ємність), так і адаптаційних (інерційність зміни структури);
- мати практичну реалізованість – тобто бути придатними для чисельного розв'язання з використанням сучасних засобів обчислювальної техніки.

Одним із найефективніших підходів у цьому контексті є нелінійна динамічна оптимізація, яка поєднує апарат математичного програмування з урахуванням часової структури задачі. У межах цієї роботи оптимізація структури експорту меблів з України до країн ЄС формалізується саме в такій постановці.

Оптимізаційні задачі у зовнішньоекономічній діяльності виникають практично на кожному етапі формування торговельної стратегії: від вибору пріоритетних ринків до визначення обсягів постачання, вибору логістичних маршрутів, ціноутворення, розподілу ресурсів між партнерами та планування контрактного портфеля. Вирішення таких задач потребує науково-обґрунтованого підходу, заснованого на математичній логіці, врахуванні обмежень та цільової функції.

Формально будь-яка задача оптимізації – це пошук найкращого варіанту рішення з множини допустимих рішень, який максимізує або мінімізує певну функцію (вигоди, витрат, прибутку, ефективності тощо). Основні компоненти оптимізаційної задачі:

- цільова функція – відображає критерій оптимальності;
- змінні управління (рішення) – ті параметри, значення яких підбираються;
- обмеження – умови, які повинні виконуватись.

У зовнішньоекономічному середовищі цільова функція зазвичай пов'язана з прибутком, ефективністю, віддачею від експорту, мінімізацією витрат, а змінними виступають обсяги експорту, напрямки постачання, розподіл ресурсів тощо.

Оптимізаційні методи дедалі частіше застосовуються у прикладних дослідженнях зовнішньоекономічної політики. Наприклад [19; 20]:

- у моделюванні торговельного балансу: країни ЄС використовують задачі оптимізації для розподілу експортно-імпортних квот [19];
- у кластеризації логістичних потоків: для оптимального розміщення складів і транспортних маршрутів застосовують лінійне та цілочислове програмування [19];

- у бюджетному плануванні підтримки експорту: визначаються найвигідніші галузі чи країни для надання субсидій або кредитних гарантій;
- у реальному секторі: меблеві підприємства застосовують оптимізацію для вибору партнерів, визначення вигідних умов поставки, узгодження графіків виробництва з логістикою [20].

Окремо слід зазначити, що для галузей із високою часткою експорту (як меблева) оптимізація має включати не лише комерційні аспекти, а й вплив макроекономічних факторів – таких як інфляція, зміна доходів у країнах-партнерах, валютні курси, митні ставки тощо.

За математичною природою розв’язуваних задач методи оптимізації поділяють на кілька великих класів (табл. 1.3).

Таблиця 1.3 – Класифікація методів оптимізації

Тип оптимізації	Короткий опис	Приклади застосування
Лінійна	Цільова функція та обмеження лінійні	Розподіл експортного ресурсу без урахування зниження віддачі
Нелінійна	Цільова функція або обмеження мають нелінійний характер	Урахування ефекту масштабу, зниження граничної ефективності
Цілочислова	Частина змінних приймає тільки цілі значення	Вибір країн/напрямів експорту (0-1), формування логістичних ланцюгів
Стохастична	Ураховує ймовірнісну природу даних	Ризик втрати ринку, імовірність затримок доставки
Динамічна	Рішення приймаються послідовно у часі, з урахуванням попередніх значень (періодів)	Планування експорту на кілька років вперед або ж на рік уперед з урахуванням поточного стану ринків

Джерело: складено на основі [2; 3; 18]

Нелінійна оптимізація – це розділ математичного програмування, у якому цільова функція або принаймні одне з обмежень мають нелінійну форму. На відміну від лінійного програмування, де залежності між змінними є строго пропорційними, в нелінійних задачах враховується складніша поведінка системи, зокрема ефект масштабу, насичення, взаємодія факторів тощо.

Формально, загальна постановка задачі нелінійної оптимізації має вигляд (формули 1.3-1.4):

$$\min(\max) f(x) \quad (1.3)$$

за умов:

$$\begin{cases} g_i(x) \leq b_i, \\ h_j(x) = c_j, \\ x \in \mathbb{R}^n, \end{cases} \quad (1.4)$$

де $f(x)$ – цільова нелінійна функція;

$g_i(x)$, $h_j(x)$ – функції обмежень (лінійні або нелінійні);

x – вектор змінних;

$\mathbb{R}^n$ – область визначення задачі.

У роботі буде реалізовано максимізацію цільової функції, що є квадратичною: цільова функція, окрім головного елементу максимізації, включає квадрати приростів (зменшень) обсягів експорту меблів (як ефект граничної ефективності або ж насиченості ринків), що обумовлює нелінійність другого порядку.

У реальних економічних задачах залежності майже ніколи не є ідеально лінійними. Наприклад:

- збільшення обсягів експорту не завжди прямо пропорційне збільшенню прибутку: виникають додаткові витрати (транспортування, оподаткування, конкуренція);
- цінова еластичність попиту часто має S-подібний характер, який неможливо відобразити лінійною моделлю;
- ефект насичення ринку (після певного порогу приріст експорту не дає додаткової вигоди або ж дає менше вигоди) також має нелінійну природу.

Тому саме нелінійне моделювання дозволяє більше коректно інтерпретувати подібні взаємозв'язки. Наприклад, у дослідженні [21] показано, що застосування квадратичних моделей при плануванні обсягів виробництва і експорту в лісовій промисловості України дало змогу точніше спрогнозувати вигідні пропорції для підприємств.

Нелінійні задачі поділяються на кілька основних підвидів:

- задачі з нелінійною цільовою функцією і лінійними обмеженнями (найпростіші для чисельного розв’язання);
- задачі квадратичного програмування (QP) – функція другого порядку, обмеження – лінійні;
- нелінійне програмування з обмеженнями – і функція, і обмеження мають нелінійний характер;
- варіаційні задачі – знаходження функцій, а не чисел (використовуються у складних стратегічних моделях).

У рамках даної роботи використовується клас задач квадратичного програмування (*Quadratic Programming, QP*) з додатковими динамічними характеристиками – перехідними обмеженнями між періодами.

Розв’язання задач нелінійної оптимізації значно складніше, ніж лінійних, особливо у випадках наявності великої кількості змінних або обмежень. Проблема полягає у тому, що:

- функція може мати декілька локальних екстремумів;
- існує ризик застрягання у локальному максимумі/мінімумі;
- потрібні ефективні алгоритми чисельного розв’язання, здатні обробляти складні залежності.

У загальному випадку методи розв’язання задач нелінійної оптимізації можна поділити на кілька основних груп (1-4):

1. Аналітичні методи (методи множників Лагранжа).

Ці методи базуються на аналітичному знаходженні критичних точок функції з використанням умов першого порядку (формула 1.5):

$$\mathcal{L}(x, \lambda) = f(x) + \sum_{i=1}^m \lambda_i g_i(x) \quad (1.5)$$

Розв’язання передбачає знаходження таких x і λ , при яких виконуються рівності (формула 1.6):

$$\nabla_x \mathcal{L} = 0, \quad g_i(x) = 0 \quad (1.6)$$

Однак ці методи практично застосовні лише для задач з невеликою кількістю змінних, у яких функції мають просту аналітичну форму. Для нашої задачі з десятками змінних і часовою динамікою ці підходи малопридатні.

2. Чисельні методи градієнтного типу.

Найпоширеніші методи чисельного знаходження екстремуму:

- градієнтний спуск – для задач мінімізації;
- метод Ньютона, квазі-Ньютона (*BFGS*) – для покращення швидкості збіжності;
- метод координатного спуску – для багатовимірних задач.

Ці методи ефективно реалізуються в середовищах *MATLAB*, *Python (SciPy)*, *R*, *Julia* та інших, і підходять для задач із великою кількістю змінних, як у нашій роботі. Вони дозволяють розв’язати задачу навіть у складній багатовимірній конфігурації.

3. Методи квадратичного програмування (QP-солвери).

Для задач, у яких цільова функція має квадратичну форму, а обмеження – лінійні, використовуються спеціалізовані QP-алгоритми. Наприклад:

- *Interior Point Method* (внутрішньоточкові методи);
- *Active Set Method* (метод активних обмежень);
- *Simplex-like QP* (адаптований для задач другого порядку).

Сучасні програмні пакети – *IBM CPLEX*, *Gurobi*, *CVXPY (Python)*, *Excel Solver* (обмежено), *MATLAB Optimization Toolbox* – забезпечують реалізацію цих методів на практиці.

У контексті нашої моделі такі алгоритми будуть найпридатнішими: модель має квадратичну структуру цільової функції, а також набір лінійних (ресурсних, інерційних) обмежень, що формально відповідає умовам QP.

4. Евристичні та метаетвристичні методи.

Для дуже складних моделей використовують:

- генетичні алгоритми;
- метод рою частинок (*Particle Swarm*);
- симульоване відпускання (*Simulated Annealing*).

Хоч ці підходи дають змогу уникати локальних екстремумів, їх точність нижча, а прогнозованість результату слабша [22]. У наукових роботах вони використовуються здебільшого як додаткові засоби перевірки глобальності рішення [22].

Щодо динамічного програмування – це клас задач оптимізації, у яких рішення приймаються не одноразово, а в кілька послідовних етапів (у часі), причому кожне рішення впливає на подальші стани системи [23]. Такий підхід був сформований Р. Беллманом у 1950-х роках і згодом набув широкого поширення в економіці, фінансах, логістиці, інвестиційному аналізі [23].

Класична динамічна задача формулюється як (формули 1.7-1.8):

$$\max_{x_1, \dots, x_T} \sum_{t=1}^T f_t(x_t, s_t) \quad (1.7)$$

за умов:

$$s_{t+1} = g_t(x_t, s_t), \quad x_t \in X_t \quad (1.8)$$

де x_t – управлінське рішення в період t ;

s_t – стан системи;

$f_t(\cdot)$ – функція вигоди;

$g_t(\cdot)$ – закон переходу стану;

X_t – множина допустимих рішень.

У нашому випадку кожен рік – це один крок t , змінна x_t – це структура експорту меблів, а стан s_t – це набір відомих макроекономічних і логістичних характеристик, які впливають на ефективність у період t .

Особливістю динамічного підходу є те, що:

- він дозволяє враховувати інерційність рішень (тобто неможливість різко змінити структуру експорту);
- модель має пам'ять про попередній стан, що наближає її до реального бізнес-процесу;
- рішення на кроці t не лише максимізують вигоду зараз, а й впливають на потенційну ефективність у майбутньому.

Такі моделі особливо актуальні для експортоорієнтованих галузей, де щорічно доводиться переглядати структуру поставок, адаптуючи її до поточної ситуації, не втрачаючи при цьому стабільності та логістичної узгодженості.

У міжнародній практиці динамічні оптимізаційні моделі використовуються, зокрема [24-26]:

- для довгострокового планування видобутку ресурсів (гірничо-металургійний комплекс) [24];
- у сільському господарстві – для оптимізації посівних площ залежно від очікуваних врожаїв, погодних умов, політики субсидій [25];
- у логістиці та розподілі енергетичних ресурсів – для балансування попиту і пропозиції в динаміці [26];
- у фармацевтиці – при плануванні багаторічного виробництва вакцин з урахуванням очікуваного попиту.

В Україні подібні підходи впроваджуються в проєктах інституцій типу Інституту економіки та прогнозування НАН України, зокрема, для моделювання міжгалузевих зв'язків і зовнішньоекономічних прогнозів [8].

Отже, методи оптимізації, які застосовуються для моделювання зовнішньоекономічної діяльності, є ключовим інструментом формування ефективної експортної політики в умовах динамічного макроекономічного середовища. У контексті меблевої індустрії України, яка є експортоорієнтованою, адаптивною та водночас вразливою до зовнішніх змін, доцільно використовувати підходи, що враховують часову змінність параметрів, нелінійність економічних залежностей та наявність ресурсних і поведінкових обмежень.

Розглянуті методи оптимізації, зокрема квадратичне програмування, градієнтні алгоритми та чисельні методи розв'язання, забезпечують надійні технічні засоби для знаходження оптимального розподілу ресурсів. Теоретичні основи нелінійної оптимізації дозволяють урахувати такі важливі аспекти, як ефект масштабу, зниження граничної вигоди від зростання обсягів постачання, а також взаємозв'язок між різними економічними факторами.

Особливе місце посідають динамічні задачі оптимізації, які є найбільш адекватними до реальних умов прийняття рішень у часі. Їх структура враховує історичні дані, попередні рішення та дозволяє формувати експортну стратегію на основі як коротко-, так і середньострокових цілей. Відтак, динамічна нелінійна оптимізація постає як ефективна методична основа для розробки практично застосовних моделей у сфері зовнішньоекономічної діяльності.

Висновки до першого розділу

Перший розділ дипломної роботи був присвячений теоретичним засадам економіко-математичного моделювання галузевого розвитку, з фокусом на меблеву індустрію України як об'єкт дослідження. У межах розділу було сформовано фундамент для побудови прикладної моделі оптимізації структури експорту меблів в умовах динамічного зовнішньоекономічного середовища.

Проаналізовано сутність, цілі та класифікацію економіко-математичних моделей, що застосовуються в галузевому аналізі. Особливу увагу приділено класифікації моделей за часовою структурою, математичним апаратом та сферою застосування. Зроблено акцент на адаптації методів моделювання до умов функціонування української економіки, а також обґрунтовано доцільність використання комбінованих підходів для аналізу експортоорієнтованих галузей, таких як меблева промисловість.

Було проведено аналіз сутності меблевої індустрії України, її внутрішньої структури, ролі в національному господарстві, експортного потенціалу та характерних особливостей. Виявлено ключові чинники, які визначають динаміку розвитку галузі, включаючи залежність від логістики, зовнішнього попиту, валютної стабільності та рівня митного регулювання. Розглянуто наслідки впливу війни на галузь, її адаптаційні властивості, а також тенденції останніх років, зокрема зростання експорту до країн ЄС.

Проаналізовано сучасні методи оптимізації, зокрема нелінійне та динамічне програмування, які є найбільш релевантними для формування стратегії розвитку

меблевої індустрії в умовах змінного зовнішнього середовища. Узагальнено ключові підходи до постановки задач оптимізації, визначено математичні особливості нелінійних моделей, а також обґрунтовано переваги динамічних моделей при прийнятті рішень у зовнішньоекономічній сфері.

Таким чином, перший розділ сформував науково-методичну основу для побудови економіко-математичної моделі оптимізації структури експорту меблів з України до країн ЄС, яка буде розроблена в наступному розділі дипломної роботи.

2 АНАЛІЗ СТАНУ МЕБЛЕВОЇ ІНДУСТРІЇ УКРАЇНИ ТА ПОБУДОВА МОДЕЛІ ОПТИМІЗАЦІЇ СТРУКТУРИ ЕКСПОРТУ

2.1 Аналіз сучасного стану меблевої індустрії України

Меблева індустрія України є складовою обробної промисловості з високим ступенем експортної орієнтації, помірним споживанням ресурсів (сировини) та високою трудомісткістю [27]. Її розвиток упродовж останнього десятиліття був зумовлений сприятливою ринковою кон'юктурою в ЄС, наявністю сировинної бази (деревини), конкурентоспроможністю продукції (за рахунок високої якості та відносно низьких цін) та здатністю до адаптації [27]. Значну частку виробництва галузі займають дерев'яні, м'які, офісні та кухонні меблі на замовлення для зовнішніх ринків, зокрема країн ЄС [27].

Для оцінки сучасного стану меблевої індустрії України та її зовнішньоторговельної діяльності було вирішено проаналізувати такі ключові її показники: кількість суб'єктів господарювання (за розміром); кількість підприємств; кількість зайнятих працівників у суб'єктів господарювання; капітальні інвестиції в підприємства; чистий прибуток і рентабельність підприємств; обсяги реалізації меблів на внутрішньому ринку; експорт та імпорт продукції меблевої галузі; експорт меблів у країни ЄС та його структура по країнах.

Таблиця 2.1 – Кількість діючих суб'єктів великого, середнього та малого підприємництва меблевої галузі (Код 31 за КВЕД-2010)

Роки	Усього, од.	Великі, од.	Частка до всіх, %	Середні, од.	Частка до всіх, %	Малі, од.	Частка до всіх, %
1	2	3	4	5	6	7	8
2014	10 534	2	0,0	120	1,1	10 412	98,9
2015	10 615	1	0,0	113	1,1	10 501	98,9
2016	9 759	1	0,0	108	1,1	9 650	98,9
2017	9 066	1	0,0	116	1,3	8 949	98,7

Продовження табл. 2.1

1	2	3	4	5	6	7	8
2018	8 937	1	0,0	120	1,3	8 816	98,7
2019	9 243	1	0,0	124	1,3	9 118	98,7
2020	8 959	1	0,0	119	1,3	8 839	98,7
2021	8 412	1	0,0	121	1,4	8 290	98,6
2022	7 329	1	0,0	106	1,5	7 222	98,5
2023	7 810	1	0,0	102	1,3	7 707	98,7

Джерело: побудовано за даними [12]

Меблева галузь об'єднує тисячі малих і середніх суб'єктів господарювання (у тому числі підприємств), розміщених по всій території країни [27]. Проаналізуємо структуру кількості суб'єктів господарювання меблевої галузі за розмірами, яка подана в табл. 2.1.

Однією з основних особливостей української системи виробництва меблів є її висока фрагментарність [28]. Як бачимо з табл. 2.1, у період з 2014 по 2023 роки меблева галузь України зберігала вкрай високу частку суб'єктів малого підприємництва – стабільно понад 98% від загальної кількості. У 2023 році з 7 810 активних суб'єктів господарювання: 1 класифікувався як великий (0,0%); 102 – як середні (1,3%); 7707 – як малі (98,7%).

Протягом усього періоду частка суб'єктів малого підприємництва залишалася практично незмінною (98,5-98,9%), що свідчить про відсутність укрупнення виробництва або індустріалізації галузі. Кількість суб'єктів середнього підприємництва залишається стабільною у межах 100-124 одиниць, хоча їх частка зросла з 1,1% у 2014 році до 1,5% у 2022, що може бути наслідком перерозподілу внаслідок зникнення частини суб'єктів малого підприємництва. У 2022 році спостерігається найнижчий рівень загальної кількості суб'єктів господарювання – 7 329 (хоча й у цілому протягом усього періоду спостерігається спадна тенденція їх кількості), що обумовлено повномасштабним вторгненням, релокацією бізнесу, частковою зупинкою виробництва, втратою потужностей тощо. Проте в 2023 році видно тенденцію до часткового відновлення: кількість суб'єктів господарювання

зросла до 7 810 (близько +6,6% до 2022 року), що свідчить про адаптивність і відновлення сектора.

Розглянемо також розподіл суб'єктів господарювання меблевої галузі на підприємства та фізичних осіб-підприємців і їх динаміку, що наведені на рис. 2.1.

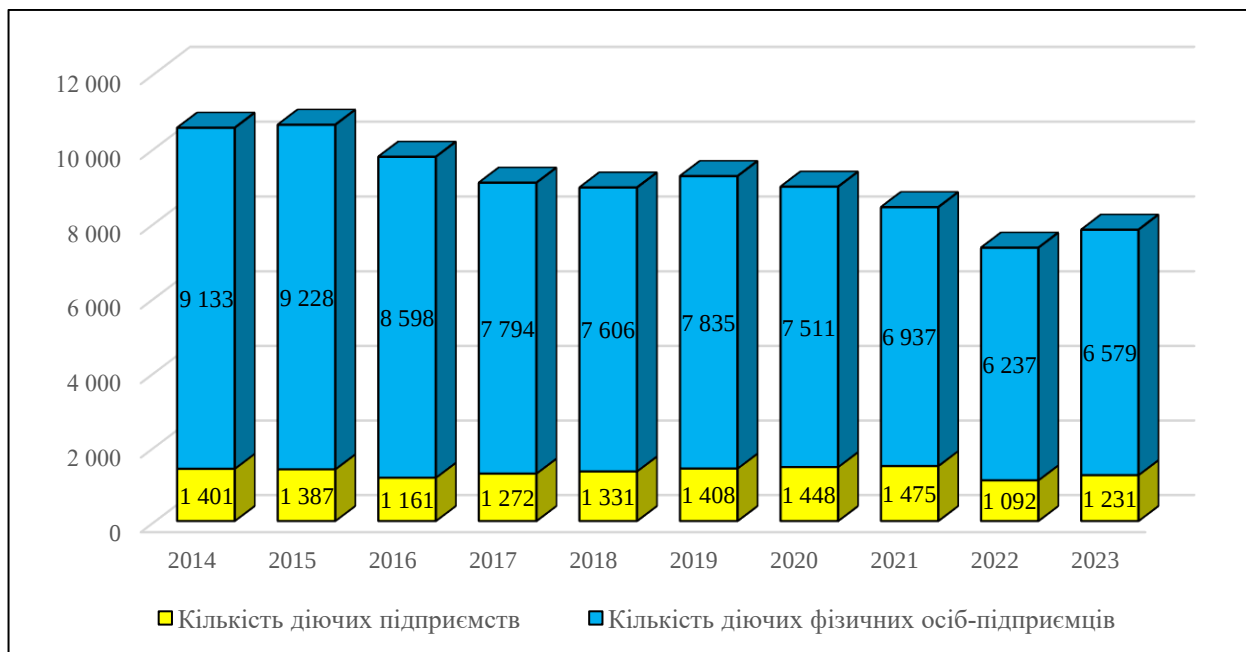


Рисунок 2.1 – Динаміка кількості діючих підприємств і діючих фізичних осіб-підприємців меблевої галузі України за 2014-2023 рр., од.

Джерело: побудовано за даними [12]

На рис. 2.1 спостерігаємо упродовж усього періоду негативну тенденцію кількості як підприємств, так і ФОПів. Саме ФОПи забезпечують основну частину робочих місць і виробничої активності в галузі, а також вони виявилися менше чутливими до кризи. Найбільше падіння відбулося у 2022 році – кількість ФОПів скоротилася з 6 937 до 6 237 (-10,09%) на фоні повномасштабної війни, у той час як кількість підприємств скоротилася з 1 475 до 1 092 (-25,97%) – набагато сильніше. Після падіння 2022 року у 2023 році спостерігається помірне зростання кількості ФОПів до 6 579 (+5,48%) та підприємств до 1 231 (+12,73%), що свідчить про відновлення економічної активності у меблевій індустрії.

Загалом, меблева галузь України залишається ФОП-домінантною, що зумовлює її високу гнучкість. Довготривале скорочення кількості суб'єктів може сигналізувати про структурні проблеми в регуляторному, податковому чи

кредитному середовищі. Умови початку війни особливо негативно вплинули на кількість суб'єктів господарювання, проте 2023 рік став точкою хоч і не сильного, але все ж часткового відновлення.

Географічне розташування цих суб'єктів господарювання наявне по всій території України [28]. На розташування меблевого виробництва впливає певна кількість факторів, зокрема наявність лісових ресурсів та їх постачальників (виробників напівфабрикатів з деревини), традиції (деякі підприємства працюють ще з радянських часів), а також інвестиційна привабливість відповідного регіону [28]. На рис. 2.2 наведена географія розміщення діючих підприємств меблевої галузі України в 2023 році.



Рисунок 2.2 – Розміщення діючих підприємств меблевої галузі України в 2023 р.

Джерело: [29]

Варто підмітити, що до повномасштабного вторгнення основними регіонами розміщення меблевої галузі були Київ та область, а також Львівська, Харківська та Дніпропетровська області [29]. З рис. 2.2 бачимо, що після початку війни областями лідерами за кількістю діючих підприємств меблевої галузі стали наступні: Київ та Київська область, Львівська, Закарпатська, Харківська, Рівненська та Черкаська

області [29]. Це пов'язано, очевидно, з частковими втратами потужностей у прифронтових територіях, а також з релокацією виробництв у більше безпечні регіони України. У зв'язку із військовими діями на території України повністю або частково релокувалися 11% підприємств [29]. І найбільш привабливими регіонами для релокації виявилися Рівненська, Закарпатська, Львівська та Тернопільська області [29].

З розрахунку на особливості структури кількості суб'єктів господарювання меблевої галузі за розмірами (див. табл. 2.1) цікавим стає аналіз кількості зайнятих працівників у суб'єктів господарювання, графік динаміки якої наведено на рис. 2.3.

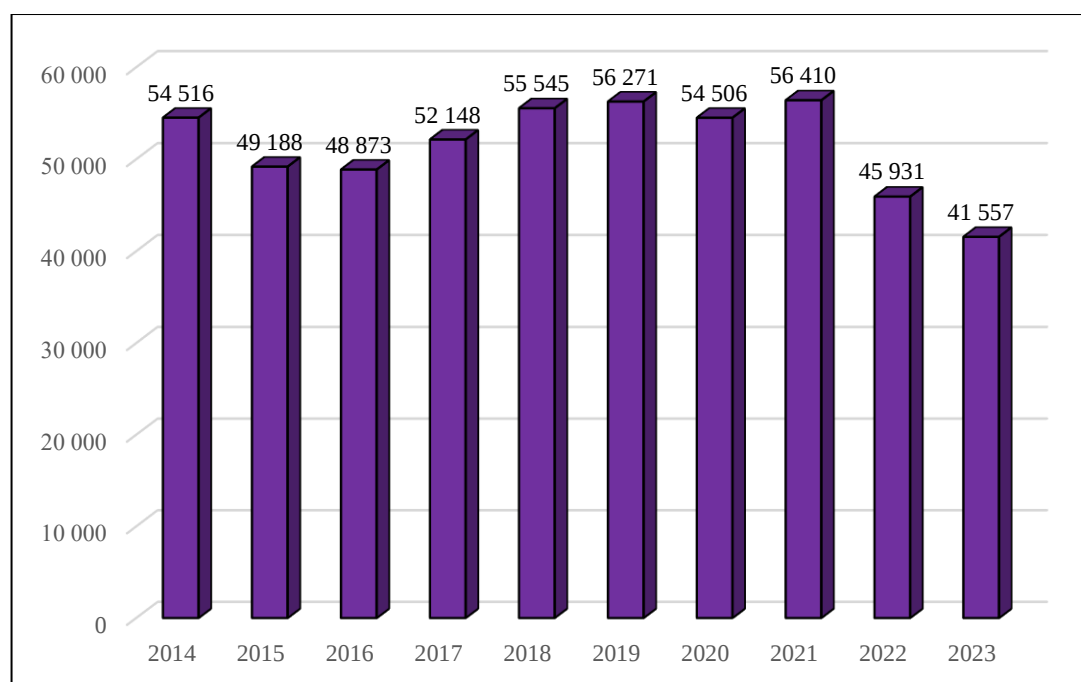


Рисунок 2.3 – Динаміка кількості зайнятих працівників у суб'єктів господарювання меблевої галузі України за 2014-2023 рр., од.

Джерело: побудовано за даними [12]

З рис. 2.3 спостерігаємо, що після спаду 2014-2016 років (до рівня 48 873 осіб) галузь поступово відновилася – вже у 2018-2020 рр. чисельність працівників досягла 55-56 тис. осіб, що є наслідком уведення в 2016-2017 рр. мораторію на експорт необробленої деревини, однією з цілей якого було створення нових меблевих виробництв на території України та, відповідно, створення нових робочих місць. Пік зафіксовано у 2021 році – 56 410 зайнятих, що також може бути

пов'язано з постковідним поживавленням внутрішнього ринку та зростанням експорту.

Проте через початок війни в 2022 році кількість працівників зменшилась на 18,6% (-10 479 осіб) – до 45 931 осіб. Це найрізкіше падіння за весь аналізований період. У 2023 році спостерігалось подальше скорочення до 41 557 осіб (-9,6% до попереднього року), незважаючи на часткове відновлення загальної кількості суб'єктів господарювання, що свідчить про тривалий вплив воєнних ризиків: зменшення кількості суб'єктів господарювання, скорочення персоналу через скорочення витрат і зменшення внутрішнього попиту, мобілізація працівників тощо. Загалом, за два роки війни галузь втратила понад 25% зайнятих працівників, що є показником глибокого системного удару по виробничих потужностях і трудовому ринку меблевої індустрії, який і так має проблеми з нестачею кваліфікованих кадрів.

При дослідженні стану меблевої галузі України також варто звернути увагу на капітальні інвестиції, чистий прибуток і рентабельність її підприємств, адже вони характеризують фінансово-економічний стан і перспективи розвитку галузі [30]. Їхнє значення, перше за все, зумовлене тим, що: чистий прибуток і рентабельність відображають наскільки ефективно використовуються ресурси й управляються витрати в підприємствах галузі, а також впливають на можливість сталого розвитку галузі і на підвищення конкурентоспроможності її продукції на внутрішньому й зовнішньому ринках; капітальні інвестиції в галузі показують її привабливість для інвесторів та готовність до модернізації й розширення виробництва, а також сприяють створенню нових робочих місць, зростанню ВВП тощо [30].

Проаналізуємо спочатку обсяги капітальних інвестицій, наведених на рис. 2.4. Бачимо, що, починаючи з 438,9 млн грн у 2014 році, обсяг капітальних інвестицій зростав практично щороку, досягнувши 1 261,9 млн грн у 2019 році. Середній річний приріст у цей період становив близько 23%, що свідчить про активне оновлення виробництва, модернізацію. У 2020 році відбулося падіння до 1091,98 млн грн, що на ~13,4% менше, ніж у 2019 році. Це корелює з глобальною

економічною рецесією та невизначеністю, спричиненою пандемією. У 2021 році галузь зафіксувала історичний пік інвестицій – 1371,4 млн грн. Це свідчить про

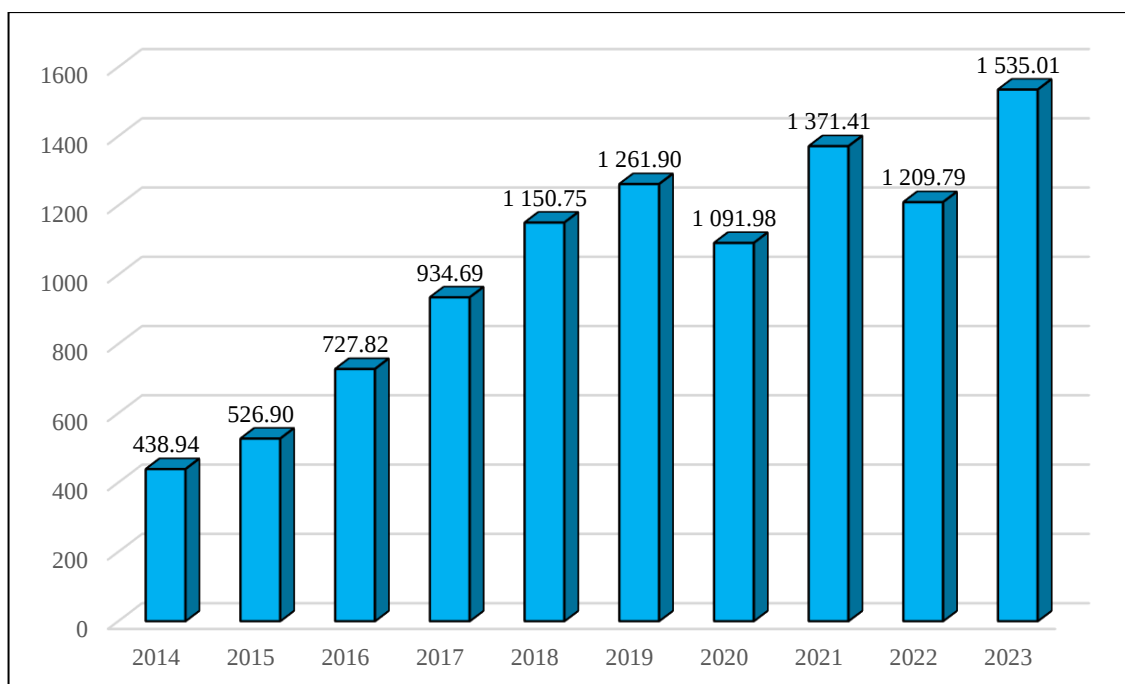


Рисунок 2.4 – Динаміка капітальних інвестицій підприємств меблевої галузі України за 2014-2023 рр., млн грн

Джерело: побудовано за даними [12; 30]

впевненість у відновленні експортного ринку та високі очікування меблевих виробників щодо зростання внутрішнього попиту. У 2022 році – з початком повномасштабної війни – інвестиції знову скоротилися до 1 209,8 млн грн, проте це падіння було менш глибоким, ніж очікувалось. А вже в 2023 році інвестиції зросли до рекордних 1 535 млн грн (+26,9% до 2022), що є потужним сигналом відновлення довіри бізнесу.

Загалом, бачимо, що динаміка обсягів капітальних інвестицій повністю відповідає своїй фундаментальній суті – капітальні інвестиції є індикатором економічної впевненості підприємств у стабільності середовища, а також готовності до оновлення виробничих потужностей, розширення асортименту та підвищення якості продукції. Протягом усього періоду в меблевій галузі фіксується постійна інвестиційна активність, попри шоки (*COVID*, війна), що свідчить про високий потенціал виробництва. Відновлення в 2023 році є одним із доказів адаптивності сектору, що важливо враховувати в подальшому моделюванні –

меблева галузь намагається активно розвиватися та відновлювати показники довоєнного періоду.

Щодо чистого прибутку та рентабельності підприємств меблевої галузі – розглянемо їх динаміку, зображену на рис. 2.5.

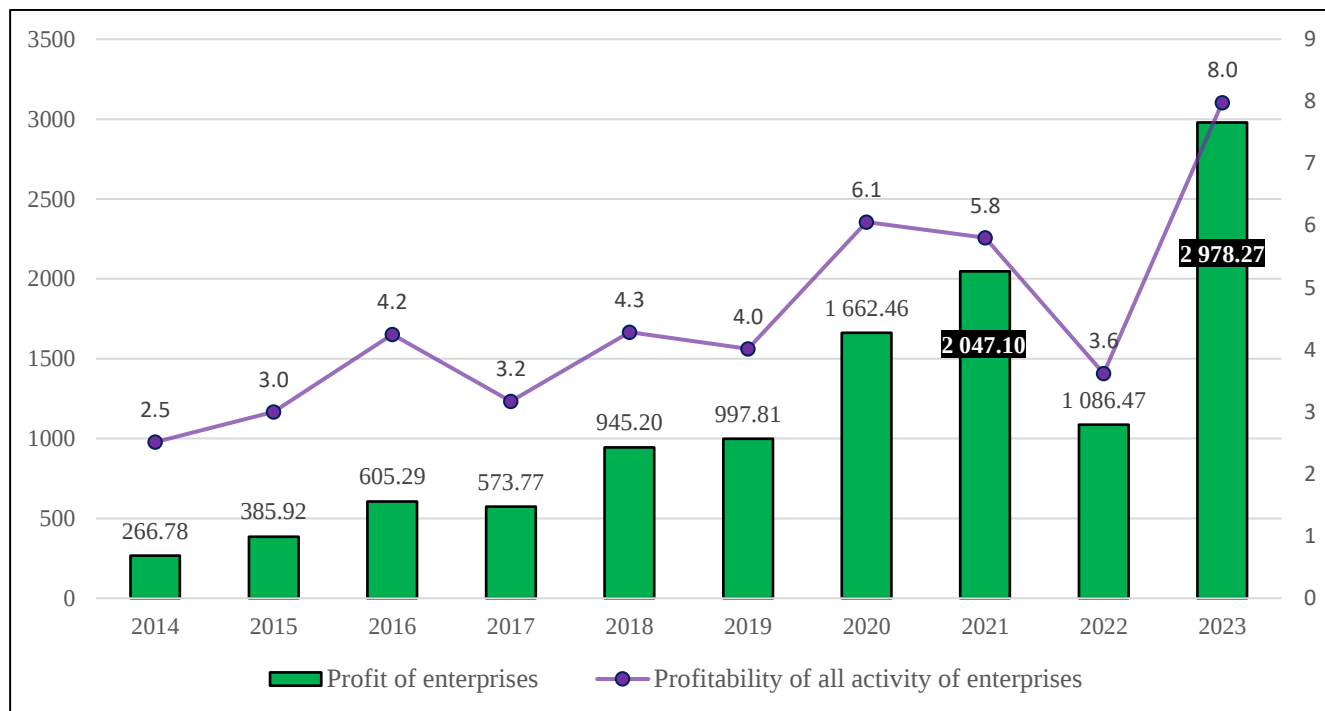


Рисунок 2.5 – Динаміка чистого прибутку (ліва вісь, млн грн) та рентабельності (права вісь, %) підприємств меблевої галузі України за 2014-2023 рр.

Джерело: побудовано за даними [12; 30]

З рис. 2.5 бачимо, що з 266,8 млн грн у 2014 році чистий прибуток зріс до 2047,1 млн грн у 2021 році – майже у 7,7 разів. Це супроводжувалося зростанням рентабельності з 2,5% до 5,8%, що свідчить про підвищення операційної ефективності підприємств. У 2022 році, після початку повномасштабного вторгнення чистий прибуток знизився до 1 086,47 млн грн (-46,9% до 2021 року), а рентабельність впала до 3,6%, що свідчить про втрату прибутковості на фоні зменшення виробництва, релокацій, падіння внутрішнього попиту та зростання витрат. У 2023 році зафіксовано історичний максимум прибутку – 2 978,27 млн грн, а також рекордну рентабельність – 8,0%, що свідчить про стрімке відновлення галузі після воєнного шоку.

Загалом, галузь демонструє високу гнучкість і здатність відновлювати прибутковість після криз. Також позитивна рентабельність навіть у кризові роки свідчить про стійкість бізнес-моделей меблевих компаній.

Також досить важливим показником розвитку меблевої індустрії України є обсяги реалізації її продукції на внутрішньому ринку, адже, попри переорієнтацію галузі на експорт, внутрішній ринок все ще споживає близько 25-35% від загального обсягу виробництва, а також варте уваги їх порівняння з обсягами імпорту меблевої продукції. Порівняння в динаміці цих показників наведено на рис. 2.6.

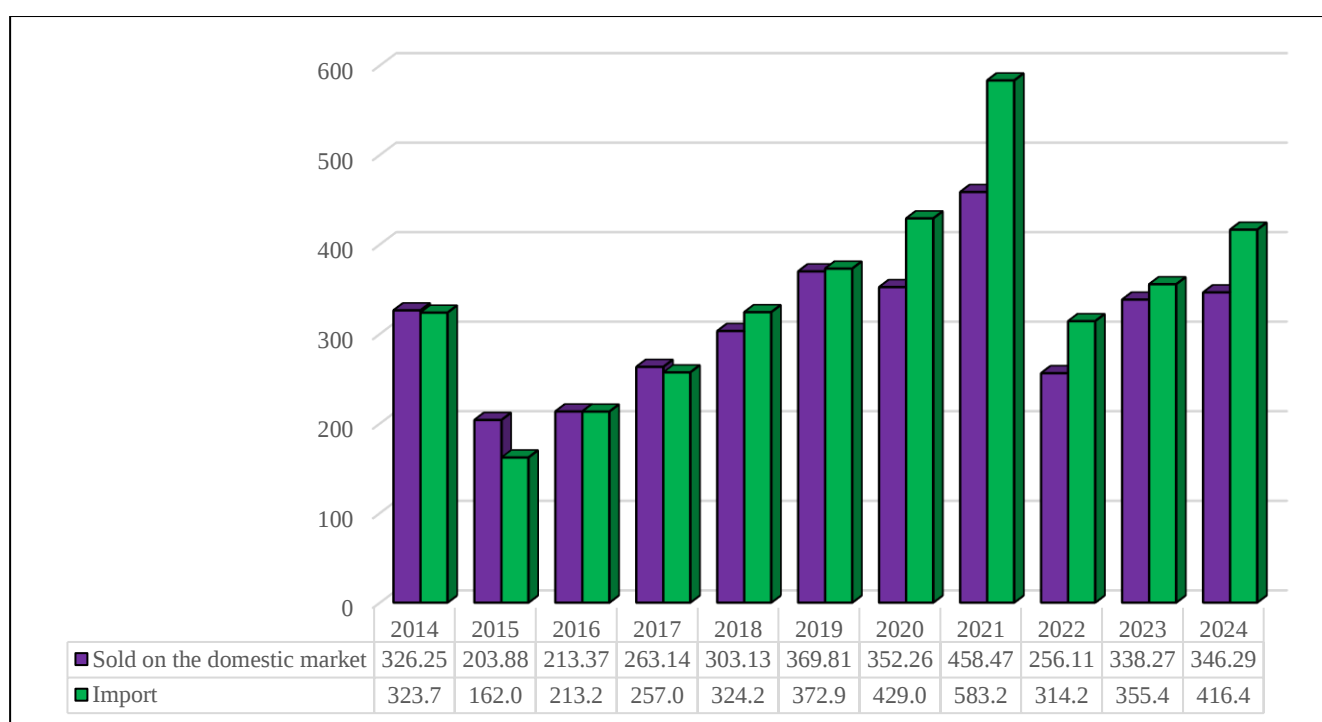


Рисунок 2.6 – Динаміка обсягів реалізації меблевої продукції суб'єктами господарювання на внутрішньому ринку України та імпорту меблевої продукції за 2014-2024 рр., млн дол. США

Джерело: розраховано та побудовано за даними [12; 31]

За даними рис. 2.6 спостерігаємо, що з 2014 по 2019 роки обсяги продажу на внутрішньому ринку та імпорту меблів залишались приблизно рівними, окрім 2015 року, де імпорт меблів був помітно нижчим. Це свідчить про баланс між вітчизняною продукцією і зовнішньою конкуренцією, з помірною часткою імпорту,

що говорить про не сильну залежність України від імпоротної меблевої продукції (50/50).

У 2021 році відбулося суттєве зростання обох показників: продаж на внутрішньому ринку досягнув 458,47 млн дол., а імпорт – 583,2 млн дол. – найвищі показники за весь період. Це пояснюється загальним економічним зростанням, підвищенням доходів населення та високим попитом на меблі після локдаунів.

Проте вже в 2022 році через війну ці показники різко знизилися: внутрішній продаж – до 256,11 млн дол. (-44%); імпорт – до 314,2 млн дол. (-46%). Це було спричинено наслідками повномасштабного вторгнення: обвальне скорочення попиту та купівельної спроможності населення, знищення торговельної інфраструктури, відтік населення, політична та макроекономічна нестабільність і логістичні проблеми. У 2023-2024 рр. прослідковувалося часткове відновлення після такого шоку, що свідчить про відновлення попиту, однак імпорт знову перевищує обсяги внутрішнього продажу, особливо в 2024 році, що є тенденцією до посилення імпоротної залежності України від меблевої продукції на фоні загальної експортної орієнтації меблевої галузі України.

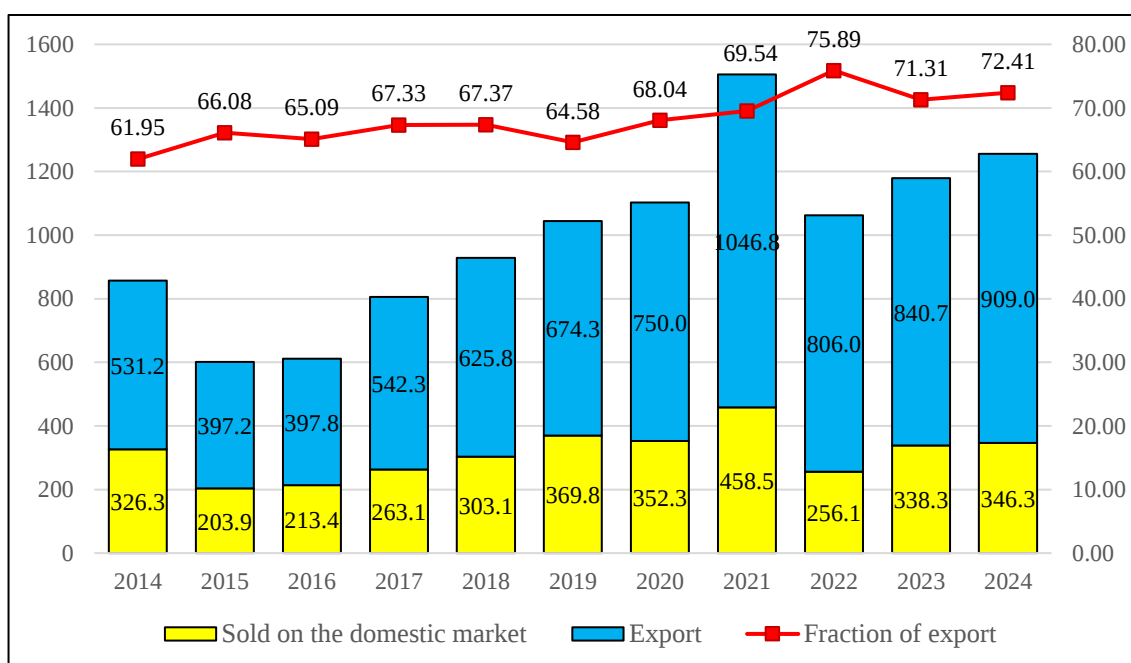


Рисунок 2.7 – Динаміка співвідношення обсягів реалізованої меблевої продукції в Україні та за її межами (ліва вісь, млн дол. США) та частки експорту в загальних реалізованих обсягах (права вісь, %) за 2014-2024 рр.

Джерело: розраховано та побудовано за даними [12; 31]

Говорячи про експортну орієнтацію меблевої індустрії України, варто також проаналізувати співвідношення обсягів реалізованої меблевої продукції на внутрішньому ринку та за межами України (експорт), що зображено на рис. 2.7.

Увесь період спостереження на рис. 2.7 демонструє, що основна частка реалізованої продукції меблевої галузі припадає на експорт – його частка коливається від 61,95% до 75,89%.

Бачимо, що 2021 рік був рекордним за абсолютним експортом (1 046,8 млн дол.) та за питомою вагою експорту в загальній реалізації з-поміж попередніх років, що демонструє максимальну інтеграцію галузі у зовнішньоекономічну діяльність.

В умовах повномасштабного вторгнення обсяг внутрішнього продажу впав набагато сильніше, ніж експорт: експорт до 806 млн дол. (-23%), а внутрішній продаж до 256,1 млн дол. (-44%), при цьому, відповідно, частка експорту зросла до рекордних показників – 75,89%.

У 2023-2024 рр. спостерігалось відновлення як обсягів внутрішніх продажів, так і експорту. У 2024 році обсяги експорту досягли 909 млн дол., обсяги внутрішніх продажів – 346,3 млн дол., проте все ще були нижчими за довоєнні значення. Також варто підмітити, що частка експорту у воєнні роки завжди була більшої за її значення в довоєнні роки. Це означає збереження, і навіть посилення, експортної орієнтації меблевої галузі.

Загалом, упродовж усього досліджуваного періоду частка експорту була доволі високою, а отже, меблева індустрія України – експортоорієнтована за своєю структурою, з постійним перевищенням обсягів зовнішніх продажів над внутрішніми. Такий характер галузі потребує чіткої стратегії розподілу експортних ресурсів, враховуючи коливання платоспроможного попиту, логістики та інших макроекономічних факторів у країнах-партнерах.

Оскільки меблева галузь України є експортоорієнтованою (за попередніми аналізами), то це свідчить про те, що експорт є основою функціонування для неї, а тому відіграє ключову роль у її розвитку. Більше того, найбільше важливим зовнішнім ринком для меблевої індустрії за часткою експорту є країни Європейського Союзу, у чому можна переконатися за даними, наведеними на рис.

2.8, який ілюструє обсяги експорту меблів до ЄС та їх частку в загальному експорті меблів – що особливо важливо для нашої моделі, орієнтованої саме на європейський напрям.

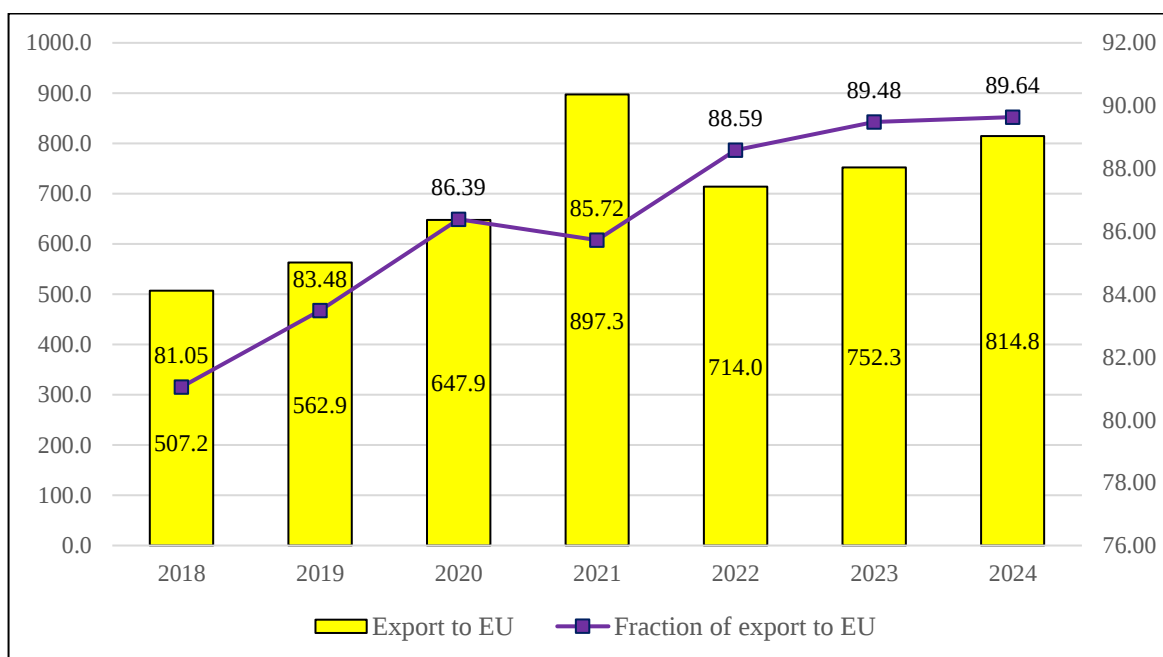


Рисунок 2.8 – Динаміка обсягів експорту меблів до країн ЄС (ліва вісь, млн дол. США) та їх частки до загальних обсягів експорту меблів України (права вісь, %) за 2018-2024 рр.

Джерело: розраховано та побудовано за даними [12]

З рис. 2.8 бачимо, що обсяг експорту меблів до ЄС зріс із 507,2 млн дол. у 2018 році до 897,3 млн дол. у 2021 році – тобто на близько 77% за 3 роки. Це свідчить про наступне: розширення контрактної співпраці з європейськими брендами; інтеграцію в європейські виробничо-логістичні ланцюги; збільшення довіри до українських постачальників.

Частка експорту меблів до країн ЄС у загальному експорті за досліджуваний період зросла з 81,05% у 2018 році до 89,64% у 2024 році. Протягом усього періоду вона мала тенденцію до зростання та була вищою за 80%, а з 2022 року – вищою за 88%. Це свідчить про високу залежність української меблевої індустрії від європейського ринку, особливо після повномасштабного вторгнення, наслідком якого стали як абсолютна відмова від деяких ринків, так і часткове зменшення присутності на ринках Азії та Близького Сходу через логістичні труднощі.

Загалом, динаміка обсягів експорту меблів до країн ЄС має подібну структуру до динаміки загальних обсягів експорту меблів. Відновлення обсягів у 2023-2024 роки свідчить про повернення до позитивної динаміки співпраці з ЄС, незважаючи на продовження війни, адже європейські ринки забезпечують стабільність у зовнішньоекономічній діяльності для нашої економіки (у тому числі для меблевої індустрії) в такі важкі часи.

Відповідно до проведеного вище аналізу очевидним стає те, що експорт меблевої індустрії України є надто концентрованим на країни ЄС. І, окрім переваг такої ситуації, варто також підмітити можливі ризики, а саме: можлива відсутність диверсифікації ринків збуту може суттєво вплинути на доходи та розвиток усієї галузі в разі негативних змін митної політики чи економічної кон'юнктури в країнах ЄС тощо. У таких умовах особливо важливо не лише визначити, куди експортувати, а й у якій пропорції розподіляти обсяги поставок між країнами ЄС з урахуванням логістичних, цінових і економічних факторів – саме це є завданням оптимізаційної моделі в межах цієї роботи.

Для цього необхідно проаналізувати наявну структуру експорту меблів до країн ЄС. З цією метою варто визначити країни, які отримують найбільші частки меблевої продукції України. За даними звітів Української Асоціації Меблевиків до топ-10 країн-імпортерів ЄС українською меблевою продукцією входять наступні: Польща, Німеччина, Данія, Австрія, Бельгія, Румунія, Франція, Нідерланди, Іспанія та Італія [20]. Проаналізуємо наявну структуру експорту меблів до цих країн ЄС, яка наведена на рис. 2.9.

Як бачимо з рис. 2.9: структура експорту меблів до топ-10 країн-імпортерів ЄС майже не змінювалася впродовж 2022-2024 років. Упродовж досліджуваного періоду частка в експорті деяких країн трішки збільшувалася, а деяких країн – трішки зменшувалася, окрім Польщі, частка експорту меблів у яку знизилася більше ніж на 5 відсоткових пунктів за досліджуваний період.

Проте, попри таке зниження частки, Польща залишається безумовним лідером серед усіх партнерів. Це свідчить як про географічну та логістичну

зручність, так і про інтегрованість українських виробників у польські/європейські торгові мережі (наприклад, *IKEA*).

Німеччина утримує друге місце за часткою та демонструє стійкий попит на українські меблі. Це вказує на потребу в подальшому поглибленні присутності.

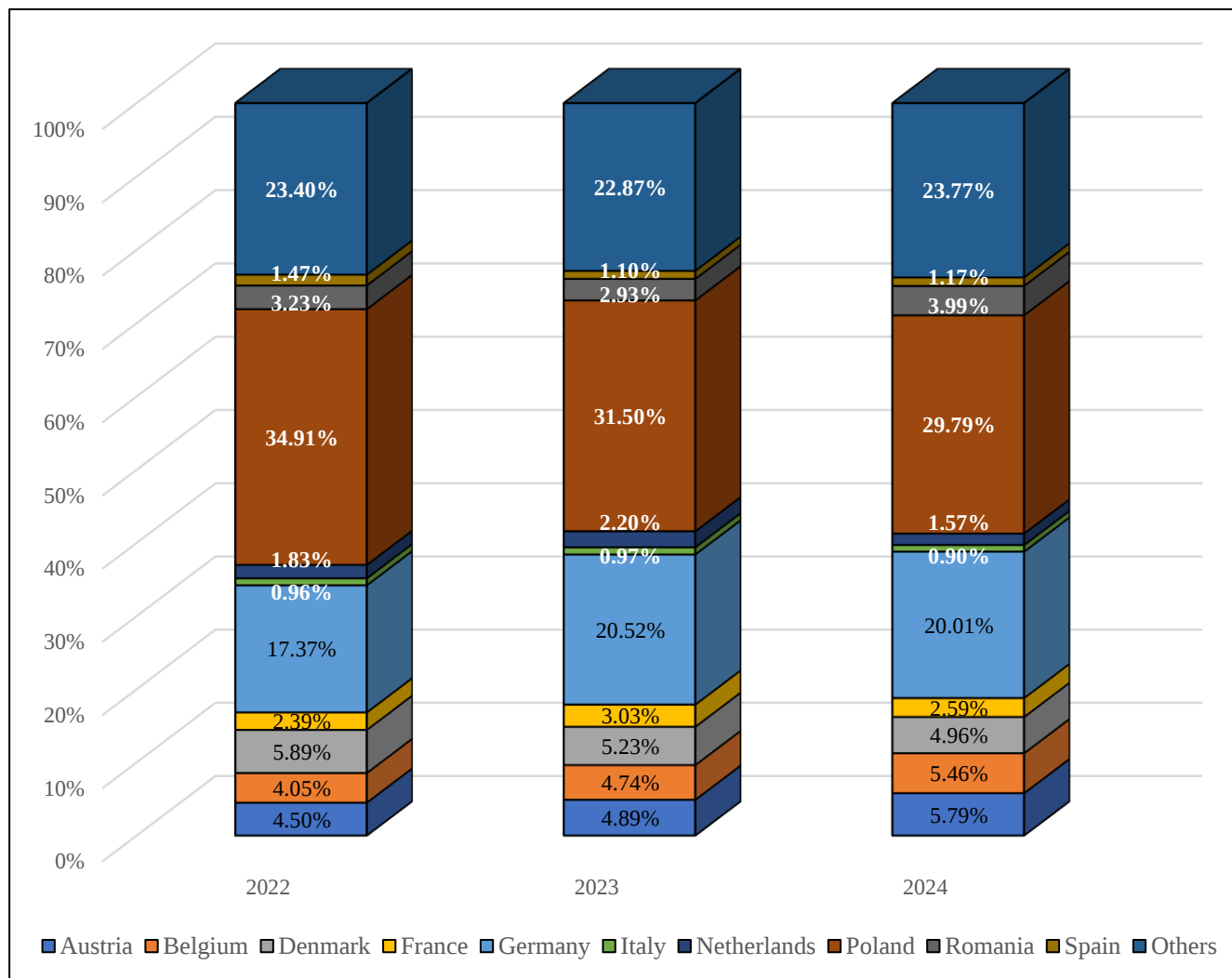


Рисунок 2.9 – Динаміка структури експорту меблів до топ-10 країн-імпортерів ЄС та решти країн світу за 2022-2024 рр., %

Джерело: розраховано та побудовано за даними [12]

Інші країни мають стабільну помірну частку (Австрія, Бельгія, Данія, Румунія) або ж дещо нижчу частку (Франція, Італія, Нідерланди, Іспанія).

Головне, що варто підмітити – експорт меблів у досліджувані топ-10 країн-імпортерів ЄС упродовж 2022-2024 років займав більше 75% загального експорту меблів України, що свідчить про сильну важливість ринків цих країн для меблевої індустрії України та її зовнішньоторговельної діяльності.

Також важливі наступні висновки: 1) експорт меблів до країн ЄС є висококонцентрованим – понад 50% поставок припадає лише на Польщу та Німеччину; 2) така структура може створювати ризики експортної залежності, особливо в умовах торгових обмежень, змін митних ставок або рецесії в окремих країнах; 3) а тому постає очевидне питання про можливість оптимізації даної структури, враховуючи не лише поточний попит, а й логістичні витрати, митну політику, індекси цін, рівень доходів населення, кількість населення (величину економіки), конкуренцію з іншими країнами-імпортерами тощо, адже, у разі успішності оптимізації, це дозволить зменшити можливі ризики та підвищити ефективність і вигоду від експорту меблів, що є надзвичайно важливим для експортоорієнтованої меблевої індустрії України.

Отже, результати проведеного аналітичного дослідження виявили критичні особливості структури зовнішньоекономічної діяльності меблевої галузі України, що безпосередньо обґрунтовують доцільність побудови моделі оптимального перерозподілу експортного ресурсу.

Насамперед, результати аналізу структури реалізації меблевої продукції показали, що експорт стабільно домінує над внутрішніми продажами. що підтверджує стратегічну залежність галузі від зовнішніх ринків і її експортну орієнтацію.

Більш глибокий аналіз географічної структури експортних поставок (див. рис. 2.8) дозволив виявити надмірну концентрацію експорту на країнах Європейського Союзу, зокрема на Польщі та Німеччині. У 2024 році частка країн ЄС у загальному експорті меблів з України перевищила 89%, що свідчить не лише про сильну інтеграцію українських виробників до європейського ринку, а й про певні можливі ризики різного характеру. Ще більш показовою є внутрішня концентрація всередині ЄС. Як показано на рис. 2.9, у 2024 році понад 49% усього експорту меблів припадає лише на дві країни – Польщу та Німеччину. Решта обсягу розподіляється між кількома державами, більшість із яких мають незначну частку (близько 5%). Така неврівноважена структура може ускладнювати забезпечення

сталого розвитку галузі та робити її вразливою до можливих коливань попиту, змін у логістиці або регуляторних умовах у цих ключових країнах.

Проте все ж немає точних доказів, що наявна структура є дуже поганою чи недоречною. Саме тому виникає експериментальне бажання у вирішенні проблеми оптимального перерозподілу експортного ресурсу, суть якої полягає у тому, щоб:

- зберігаючи загальний обсяг експорту, раціонально розподіляти частки постачань між країнами-партнерами;
- урахувати логістичні, економічні, цінові фактори та фактори попиту й конкуренції (насиченості ринків);
- не допускати різких змін у структурі поставок, що може порушити контракти або звичні виробничі ланцюги.

З огляду на це, у наступному підрозділі буде сформульована економіко-математична модель оптимального розподілу експорту меблів між країнами ЄС, що базується на реальних статистичних даних і враховує обмеження на динаміку змін структури експорту. Така модель дозволить не лише забезпечити ефективний і обґрунтований розподіл ресурсів, а й слугуватиме інструментом стратегічного планування зовнішньоекономічної діяльності підприємств галузі.

2.2 Формалізація задачі динамічного моделювання оптимальної структури експорту меблів з України до країн ЄС в контексті її розвитку

Проведений аналіз зовнішньоекономічної діяльності меблевої індустрії України виявив низку важливих закономірностей. По-перше, структура експорту меблів до країн Європейського Союзу є нерівномірною: спостерігається значна концентрація поставок в окремі країни (зокрема, Польщу та Німеччину), тоді як потенціал інших ринків не використовується в повному обсязі. По-друге, частка ЄС у загальному експорті меблів з України є домінуючою, що обумовлює необхідність ретельного планування та підвищення ефективності співпраці саме з цими країнами-партнерами.

У цьому контексті виникає завдання перерозподілу наявного експортного ресурсу з урахуванням економічних показників, логістичних витрат, попиту, ринкової ситуації та конкуренції. Просте інтуїтивне коригування напрямів експорту в сучасних умовах виявляється неефективним. Тому доцільним є застосування математичних методів оптимізації, які дозволяють кількісно оцінити ефективність експорту до кожної країни та знайти найкращий розподіл ресурсів.

Особливо важливим є перехід до динамічного моделювання, що дозволяє:

- здійснювати планування на перспективу (наприклад, на наступний рік);
- враховувати результати та структуру попередніх періодів;
- забезпечити поступовість змін (інерційність);
- формувати адаптивні та реалістичні рішення.

Таким чином, *предметом формалізації* є динамічна оптимізаційна задача розподілу експортного ресурсу меблів між 10 ключовими країнами ЄС, метою якої є максимізація загального економічного ефекту від експорту меблів за рахунок врахування інтегрального показника ефективності експорту та мінімізації небажаних різких змін у структурі поставок.

У процесі формалізації та побудови динамічної оптимізаційної моделі були визначені ключові змінні, вхідні параметри та показники, що є невід’ємною частиною математичної постановки задачі. Нижче наведено узагальнену таблицю, яка містить основні позначення, одиниці виміру та економічну інтерпретацію кожної з величин (див. табл. 2.2).

Таблиця 2.2 – Основні змінні та параметри моделі оптимального розподілу експорту меблів

Позначення	Назва показника	Одиниця виміру	Економічний зміст і роль у моделі
1	2	3	4
$x_i^{(t)}$	Обсяг експорту меблів до країни i у році t	дол. США	Основна змінна моделі – шуканий обсяг експорту до кожної країни в розрахунковому періоді
$x_i^{(t-1)}$	Обсяг експорту меблів до країни i у попередньому році	дол. США	Базове значення, яке використовується для обмеження динаміки змін (інерційності)

Продовження табл. 2.2

1	2	3	4
$AGDI_i^{(t)}$	Скоригований на купівельну спроможність дохід на душу населення у PPS	PPS (Purchasing power standard)	Сигналізує про платоспроможність населення країни i ; входить до чисельника інтегрального індексу
$PI_i^{(t)}$	Індекс споживчих цін на меблі (база 2015=100)	індекс	Відображає відносний рівень цін на меблі в країні i ; впливає на ефективність експорту
$L_i^{(t)}$	Логістичні витрати при експорті до країни i	дол. США/тонна	Враховують транспортно-операційні витрати; чим нижчі – тим привабливіший ринок
$M_i^{(t)}$	Мито при експорті до країни i	частка (0-1)	Ускладнює доступ до ринку; враховується як підвищення вартості входу
$POP_i^{(t)}$	Населення країни i	млн осіб	Відображає потенційний обсяг попиту (об'єм ринку); множиться в чисельнику індексу
$C_i^{(t)}$	Частка України в імпорті меблів до країни i	частка (0-1)	Враховує конкуренцію на ринку; чим вища частка – тим складніше розширити присутність
$E_i^{(t)}$	Інтегральний показник ефективності експорту	умовна одиниця	Складений індекс, який відображає загальну привабливість експорту до країни i в році t
$T^{(t)}$	Загальний доступний обсяг експорту у році t	дол. США	Обмеження моделі – ресурсний ліміт, який має бути розподілений між усіма країнами
δ_i^{min}	Нижнє допустиме відхилення обсягу експорту від базового	частка (0-1)	Обмежує зменшення обсягу експорту до країни у порівнянні з попереднім роком
δ_i^{max}	Верхнє допустиме відхилення обсягу експорту від базового	частка (0-1)	Обмежує збільшення обсягу експорту до країни у порівнянні з попереднім роком
n	Кількість досліджуваних країн	одиниця	–

Джерело: складено на основі власних досліджень автора

Таким чином, модель базується на реальних макроекономічних і торговельних даних, які відображають ситуацію на ринках ЄС і дозволяють коректно оцінити потенційну ефективність експорту до кожної країни. Усі змінні мають чітке економічне обґрунтування та формують підґрунтя для побудови інтегрального показника ефективності та цільової функції оптимізації.

Для того щоб обґрунтовано розподілити обмежений експортний ресурс між кількома країнами-партнерами, необхідно мати кількісну характеристику доцільності експорту до кожної з них. Цю функцію виконує інтегральний показник

ефективності експорту до країни i у році t , який умовно позначається як $E_i^{(t)}$. Цей показник поєднує в собі макроекономічні, логістичні, цінові й торгові характеристики попереднього періоду ($t - 1$), що формують реальну очікувану привабливість ринку в період t з погляду українського експортера. Розраховується він наступним чином (формула 2.1):

$$E_i^{(t)} = \frac{AGDI_i^{(t-1)} \cdot PI_i^{(t-1)} \cdot POP_i^{(t-1)}}{L_i^{(t-1)} \cdot (1 + M_i^{(t-1)}) \cdot (1 + C_i^{(t-1)})}, \quad (2.1)$$

де $AGDI_i^{(t-1)}$ – дохід на душу населення (у PPS);

$PI_i^{(t-1)}$ – базисний індекс споживчих цін на меблі (2015=100);

$POP_i^{(t-1)}$ – чисельність населення країни (млн осіб);

$L_i^{(t-1)}$ – логістичні витрати (дол. США/тонна);

$M_i^{(t-1)}$ – мито (частка);

$C_i^{(t-1)}$ – частка України в загальному імпорті меблів країни (частка).

Усі ці складові мають наступну економічну інтерпретацію:

– $AGDI_i^{(t-1)} \cdot POP_i^{(t-1)}$ – обсяг платоспроможного попиту країни, ємність ринку. Чим більший дохід на душу населення та більша кількість самого населення, тим привабливіше експортувати меблі;

– $PI_i^{(t-1)}$ – індикатор рівня цін на меблі. У країни із високими рівнями цін потенційно вигідніше експортувати, адже є можливість отримання більшої маржі з одиниці продукції, а також є можливість вільнішого ціноутворення;

– $L_i^{(t-1)}$ – логістичні витрати, які зменшують ефективність експорту в разі їх зростання, а тому логічно відносяться до знаменника;

– $(1 + M_i^{(t-1)})$ – митне навантаження, яке прямо знижує вигідність експорту до країни;

– $(1 + C_i^{(t-1)})$ – коефіцієнт, який коригує ефективність залежно від частки України в загальному імпорті меблів країни: чим більша частка України,

тим більша насиченість ринку країни українськими меблями та тим важче розширювати свою присутність на даному ринку, витісняючи інших імпортерів, і навпаки.

Інтегральний показник $E_i^{(t)}$ виступає ваговим коефіцієнтом у цільовій функції, який множиться на змінну $x_i^{(t)}$ – обсяг експорту до відповідної країни. Таким чином, модель зацікавлена спрямовувати більший обсяг експорту до тих країн, де цей показник є більшим, тобто де експорт має вищу економічну доцільність і вигідність для українських меблевих виробників.

Проте в центрі побудованої динамічної оптимізаційної моделі лежить потреба не лише максимізувати економічну ефективність/вигідність експорту, а й забезпечити реалістичність і стабільність його структури в динаміці. Саме тому до цільової функції Z (формула 2.2) було включено два ключові компоненти, які відображають цю дуальну мету.

$$Z = \max_{x_i^{(t)}} \sum_{i=1}^n \left[x_i^{(t)} \cdot E_i^{(t)} - \left(x_i^{(t)} - x_i^{(t-1)} \right)^2 \right], \quad (2.2)$$

де $x_i^{(t)}$ – шуканий оптимальний обсяг експорту меблів до країни i в період t ;

$E_i^{(t)}$ – інтегральний показник ефективності експорту до країни i в період t ;

$x_i^{(t-1)}$ – обсяг експорту меблів до країни i в період $t - 1$;

n – кількість досліджуваних країн для формування оптимальної структури експорту.

Розглянемо детальніше економічну інтерпретацію компонентів цільової функції Z :

Перший доданок (сума добутків) – це основна частина, що відповідає за загальний економічний ефект від експорту. Змінна $x_i^{(t)}$ – це шуканий оптимальний обсяг експорту меблів до країни i в період t , а $E_i^{(t)}$ – це інтегральний показник ефективності експорту до цієї країни в період t (розрахований на основі даних попереднього року). А тому маємо наступне: чим вищий $E_i^{(t)}$, тим більший внесок

кожного долара експорту в цільову функцію (більша ефективність); модель буде прагнути збільшити експорт у країни з високою ефективністю $E_i^{(t)}$.

Другий доданок (сума квадратів відхилень – штраф) – відображає штраф за надмірно різку зміну обсягів експорту до країни i порівняно з попереднім роком, а також враховує штраф за насичення ринку, яке пов'язане із законом спадної граничної ефективності (корисності). Тобто маємо наступне: цей підхід моделює ефект насичення ринку – занадто швидке збільшення чи зменшення експорту може бути економічно небажаним з точки зору закону спадної граничної ефективності (корисності); водночас, він сприяє інерційності рішень, тобто поступовому перерозподілу, а не радикальному стрибкоподібному.

Модель, таким чином, збалансовує між двома цілями:

- максимізувати сумарну ефективність через зосередження на привабливих ринках з високим $E_i^{(t)}$;
- мінімізувати ризики та втрати, пов'язані із сильною дестабілізацією зовнішньоекономічних зв'язків (через обмеження темпу змін).

Таке поєднання робить модель реалістичною, економічно виправданою та адаптованою до коротко- та середньострокового планування.

Також для моделювання оптимальної структури експорту меблів важливо не лише сформулювати цільову функцію, а й чітко визначити обмеження, що відображають реальні економічні, ресурсні та ринкові умови. Побудована модель включає дві основні групи обмежень: ресурсне обмеження та обмеження інерційності (обмеження на зміну структур). Розглянемо кожне з них:

Ресурсне обмеження на обсяг експорту в поточному році (формула 2.3):

$$\sum_{i=1}^n x_i^{(t)} = T^{(t)}, \quad (2.3)$$

де $x_i^{(t)}$ – шуканий оптимальний обсяг експорту меблів до країни i в період t ;

$T^{(t)}$ – загальний обсяг доступного експортного ресурсу в році t .

Відповідно до цього обмеження модель не має змоги перевищити загальний доступний ресурс, а повинна перерозподілити його найефективнішим чином. Залежно від року, ця величина фіксується відповідно до реальних або прогнозованих обсягів.

Обмеження інерційності (обмеження на зміну обсягів експорту) (формула 2.4):

$$x_i^{(t)} \in \left[x_i^{(t-1)} \cdot (1 - \delta_i^{min}), x_i^{(t-1)} \cdot (1 + \delta_i^{max}) \right], \quad \forall i \in \overline{1, n} \quad (2.4)$$

де δ_i^{min} – максимально допустиме зменшення експорту до країни i (частка);

δ_i^{max} – максимально допустиме збільшення експорту до країни i (частка);

$x_i^{(t-1)}$ – фактичний обсяг експорту меблів до країни i в період $t - 1$.

Це обмеження контролює наступні аспекти: експорт не може змінюватися довільно від року до року – це б спотворило реальність (контракти, стабільність ринку, попит тощо); задання асиметричних інтервалів δ_i^{min} , δ_i^{max} відображає гнучкість моделі – до деяких країн експорт може зростати швидше, ніж до інших, або навпаки бути стійкішим до зниження – сюди закладено як рівень партнерства з різними країнами, так і історичну волатильність їх структури експорту.

Тепер, на основі наведених економічних положень, структури задачі, побудови показника ефективності, цільової функції та обмежень, формалізуємо динамічну оптимізаційну модель, яка використовується для визначення оптимальної структури експорту меблів з України до 10 провідних країн Європейського Союзу в межах заданого загального ресурсу.

Мета моделі – знайти такі обсяги експорту $x_i^{(t)}$, які: 1) з одного боку – максимізують загальний економічний ефект, що визначається на основі показника ефективності, який розраховується за формулою (2.1), експорту меблів до країн ЄС; 2) з іншого боку – мінімізують різкі зміни структури експорту у порівнянні з попереднім роком, щоб уникнути сильної дії закону спадної граничної ефективності (корисності).

Узагальнена **математична модель** динамічної оптимізаційної задачі має наступний вигляд (формула 2.5):

$$Z = \max_{x_i^{(t)}} \sum_{i=1}^n \left[x_i^{(t)} \cdot E_i^{(t)} - \left(x_i^{(t)} - x_i^{(t-1)} \right)^2 \right]$$

$$\sum_{i=1}^n x_i^{(t)} = T^{(t)} \quad (2.5)$$

$$x_i^{(t)} \in \left[x_i^{(t-1)} \cdot (1 - \delta_i^{min}), x_i^{(t-1)} \cdot (1 + \delta_i^{max}) \right], \quad \forall i \in \overline{1, n}$$

Дана модель є **квадратичною оптимізаційною задачею з лінійними обмеженнями**, що належить до класу квадратичного програмування (QP). Вона може бути ефективно розв’язана сучасними оптимізаційними алгоритмами (наприклад, за допомогою розв’язувачів *OSQP*, *ECOS* тощо, які реалізуються за допомогою потужних бібліотек мови програмування *Python*, зокрема бібліотеки *cvxpy*).

Також дана модель дозволяє здійснювати:

- ретроспективну апробацію (яка буде виконуватися на прикладі 2023-2024 років);
- перспективне планування (яке буде виконуватися для 2025 року).

Саме тому в наступному підрозділі буде безпосередньо реалізовано зазначену модель на основі реальних статистичних даних, зокрема буде побудовано оптимальну структуру експорту на 2024 рік (з використанням даних 2023 року) та проведено апробацію моделі на цьому прикладі.

2.3 Реалізація економіко-математичного моделювання оптимальної структури експорту для розвитку меблевої індустрії

Після завершення формалізації моделі в підрозділі 2.2, на цьому етапі було здійснено безпосереднє чисельне розв’язання задачі оптимізації – тобто моделювання структури експорту меблів на 2024 рік у рамках апробації побудованої моделі. Задача має вигляд квадратичної оптимізації з лінійними обмеженнями, що належить до класу задач квадратичного програмування (QP,

Quadratic Programming). Для її реалізації використано сучасний та гнучкий інструментарій мовою програмування *Python*, зокрема – бібліотеку *cvxpy* у поєднанні з потужним розв’язувачем *OSQP*.

Бібліотека *cvxpy* є відкритим програмним середовищем для формулювання та розв’язання задач опуклої оптимізації. Вона дозволяє:

- описувати задачі у математичному форматі на високому рівні абстракції;
- автоматично розпізнавати тип задачі (лінійна, квадратична, опукла) та підбирати відповідний розв’язувач;
- зручно формувати обмеження, об’єднувати лінійні та квадратичні компоненти, як у нашій моделі.

У контексті цієї роботи *cvxpy* було обрано як гнучкий та масштабований інструмент, який забезпечує легкість інтеграції з даними з *Excel*, підтримку чисельної стабільності та прозору структуру моделі.

Для розв’язання задачі безпосередньо використовувався розв’язувач *OSQP* (*Operator Splitting Quadratic Program Solver* – Розв’язувач квадратичних задач програмування на основі методу розщеплення операторів) – сучасний відкритий алгоритм, оптимізований для задач квадратичного програмування з обмеженнями у вигляді лінійних інтервалів. *OSQP* реалізує метод розщеплення операторів (*operator splitting*), а саме – модифікований метод змінних напрямків множників (*ADMM*). Алгоритм працює за такою логікою:

1. Розділяє змінні на основні x та допоміжні z , які копіюють результат множення Ax (A – матриця обмежень);
2. По черзі оновлює x, z та множники Лагранжа u в спеціально побудованій ітераційній схемі;
3. Забезпечує проєкцію на допустимий інтервал значень $z \in [l, u]$, що зручно в нашій задачі при використанні обмежень інерційності в моделі;
4. Забезпечує чисельну стабільність, високу швидкість та відсутність потреби в дорогих внутрішніх ітераціях, характерних для класичних *QP*-методів.

Важливо підмітити, що в рамках нашої оптимізаційної моделі розв’язувач *OSQP* має такі суттєві переваги:

- працює без потреби у первинному масштабуванні чи перетворенні моделі – модель формулюється майже у «чистому» вигляді;
- підтримує фіксовані обмеження типу рівності та інтервалів – що ідеально підходить для моделювання інерційності та перерозподілу наявного обмеженого експортного ресурсу;
- швидко сходиться до наближеного глобального оптимуму навіть при великій кількості обмежень;
- забезпечує контроль точності розв’язку через параметри налаштувань (абсолютна та відносна похибка, максимальна кількість ітерацій тощо);
- дозволяє уникнути нестабільної поведінки, яка може виникати при використанні інших розв’язувачів загального призначення (наприклад, *scipy.optimize.minimize*, який також використовувався при моделюванні, але ніяк не міг знайти оптимальний розв’язок, дотримуючись всіх необхідних обмежень).

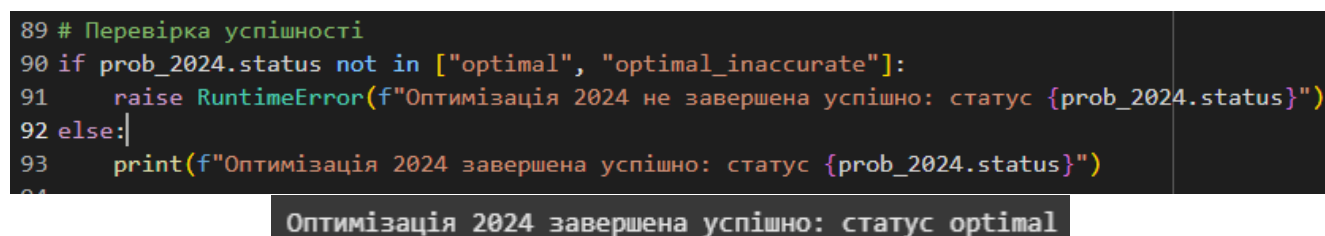
Використання *OSQP* дозволило отримати стійке, точне та економічно інтерпретоване розв’язання задачі, у тому числі з дотриманням ресурсного обмеження з похибкою, близькою до нуля. Це підтверджує доцільність обраного підходу до реалізації моделі.

Для апробації моделі та розв’язання задачі оптимізації на перший плановий період (2024 рік) було зібрано та систематизовано повний набір вхідних параметрів, що відповідають формальній постановці задачі. Всі дані є реальними і базуються на відкритих джерелах: *Eurostat* [32], *UN Comtrade* [33], Державна служба статистики України [12]. Набір цих вхідних даних наведено в Додатку А.

Під час програмної реалізації мовою програмування *Python* в середовищі програмування *Google Colaboratory* одразу були здійснені всі необхідні проміжні розрахунки (наприклад, параметри $C_i^{(t)}$ та $T^{(t)}$, а також показник ефективності $E_i^{(t)}$ тощо). Далі було проведено моделювання оптимальної структури експорту меблів з України до 10 країн ЄС на 2024 рік. Це моделювання ґрунтувалося на даних 2023 року й мало на меті перевірити, наскільки обґрунтованою, реалістичною та

результативною є модель, порівнюючи оптимальні значення з фактичними за 2024 рік. Увесь програмний продукт (лістинг коду), за допомогою якого це виконувалося, наведений у Додатку Б.

Особливістю розв’язувача *OSQP* є те, що він може повертати різні статуси виконання оптимізації, наприклад: *optimal* (успішна оптимізація), *optimal_inaccurate* (успішна оптимізація, але зі зниженою точністю) та багато інших (які нас не цікавлять), у разі повернення яких результати оптимізації не варто було б використовувати в даній роботі. На рис. 2.10 зображено статус виконання оптимізації для нашої задачі моделювання оптимальної структури експорту меблів на 2024 рік. Як бачимо з рис. 2.10 оптимізація була повністю успішною – статус успішності *optimal*.



```

89 # Перевірка успішності
90 if prob_2024.status not in ["optimal", "optimal_inaccurate"]:
91     raise RuntimeError(f"Оптимізація 2024 не завершена успішно: статус {prob_2024.status}")
92 else:
93     print(f"Оптимізація 2024 завершена успішно: статус {prob_2024.status}")

```

Оптимізація 2024 завершена успішно: статус optimal

Рисунок 2.10 – Перевірка статусу успішності оптимізації структури експорту меблів на 2024 рік та її результат

Джерело: отримано на основі власних досліджень автора

Такий статус успішності свідчить про те, що знайдено оптимальне рішення (структуру експорту), яке задовольняє всі обмеження з дуже високою точністю. Для аналізу цих результатів моделювання оптимальної структури експорту меблів на 2024 рік варто провести їх порівняння із фактичною структурою експорту, а також оцінити їх відносні зміни (див. табл. 2.3).

Таблиця 2.3 – Порівняння фактичних й оптимальних обсягів експорту меблів по країнах і їх відносна зміна для 2024 року

Country	Actual furniture export volumes, USD	Optimal furniture export volumes, USD	Change, %
1	2	3	4
Austria	52 638 828,86	45 402 918,15	-13,75
Belgium	49 619 004,72	44 464 006,25	-10,39

Продовження табл. 2.3

1	2	3	4
Denmark	45 043 093,67	48 266 552,64	7,16
France	23 503 083,10	31 840 079,49	35,47
Germany	181 909 352,27	179 061 979,66	-1,57
Italy	8 162 146,65	10 207 693,96	25,06
Netherlands	14 304 027,25	23 151 152,42	61,85
Poland	270 817 444,11	269 508 456,44	-0,48
Romania	36 288 534,56	28 916 330,66	-20,32
Spain	10 606 457,54	12 072 803,05	13,83
Sum	692 891 972,73	692 891 972,73	–

Джерело: побудовано автором за власними розрахунками

Також для кращої наочності такого аналізу побудуємо відповідну візуалізацію (див. рис. 2.11).

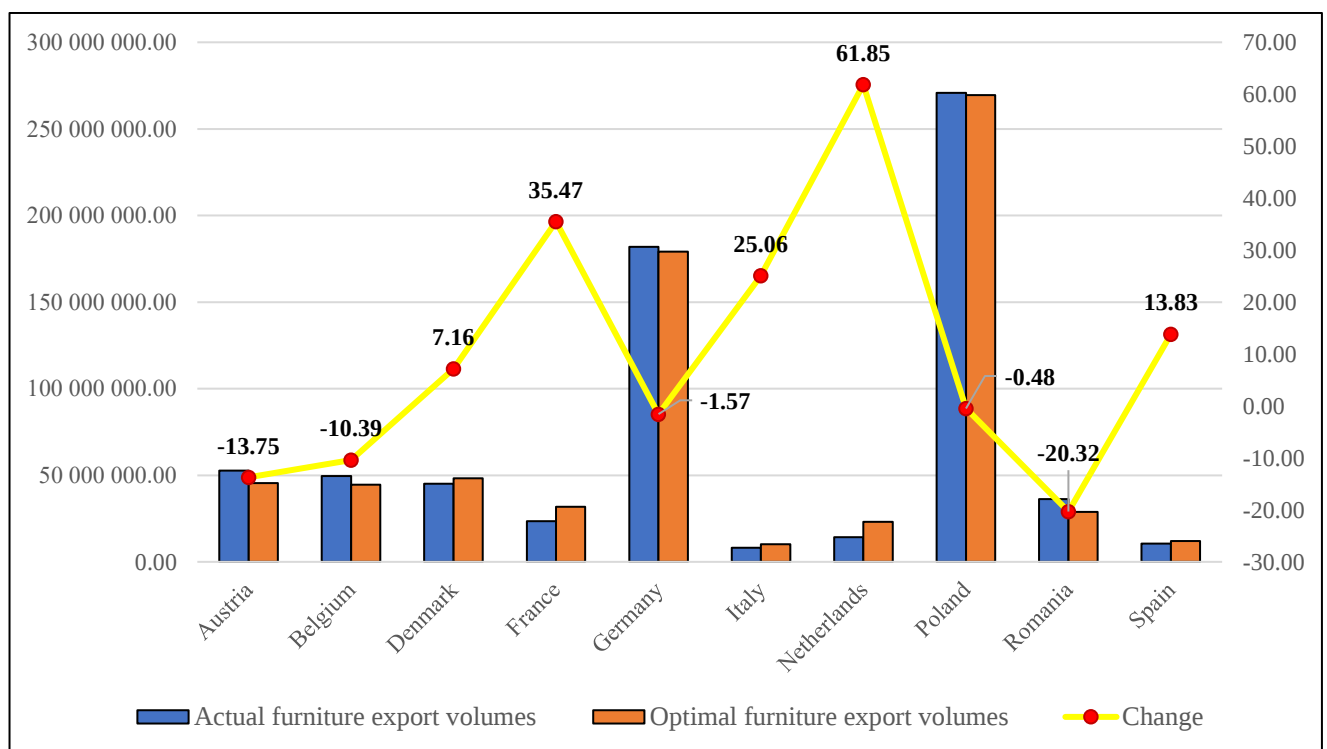


Рисунок 2.11 – Порівняння фактичних й оптимальних обсягів експорту меблів по країнах (ліва вісь, дол. США) та зміна оптимальних обсягів відносно фактичних (права вісь, %) для 2024 року

Джерело: побудовано автором за власними розрахунками

З табл. 2.3 та рис. 2.11 бачимо, що модель не просто «перекладає» обсяги між країнами, а адаптивно коригує структуру з урахуванням: економічної ємності ринків країн, логістики, конкуренції з іншими імпортерами, рівня цін.

Для країн із незначним відхиленням (Німеччина (-1,57%) та Польща (-0,48%)) модель практично зберігає наявний рівень експорту, що свідчить про високу ефективність фактичної стратегії. Це логічно, оскільки обидві країни є провідними партнерами України в меблевій торгівлі та, відповідно, недарма історично склалася така структура експорту меблів у ці країни.

Для країн із помірним зростанням (Данія (+7,16%), Італія (+25,06%), Іспанія (+13,83%)) модель ідентифікує ці ринки як перспективні та недозавантажені, тож пропонує збільшення експорту.

Для країн із істотним збільшенням (Франція (+35,47%) та Нідерланди (+61,85%)) різке зростання пояснюється тим, що або частка України в імпорті цих країн досить низька, при наявності високого потенціалу ринку, або ж це може свідчити про точкові нереалістичні результати розв'язку моделі, пов'язані з неврахуванням іншої, можливо, важливої інформації щодо ринків.

Для країн зі зменшенням обсягів (Австрія (-13,75%), Бельгія (-10,39%), Румунія (-20,32%)) модель знижує їх через або нижчу купівельну спроможність (Румунія), або значну насиченість ринку (Австрія, Бельгія).

Загалом апробація моделі показала доволі високий рівень адекватності (баланс між агресивною оптимізацією та обережною стабільністю):

- розумно перерозподіляє ресурс;
- не порушує реалістичності (немає аномальних сплесків, окрім, хіба що, Нідерландів);
- виявляє резерви зростання (Франція, Данія, Італія, Іспанія);
- зменшує залежність від менш ефективних або насичених ринків (Австрія, Бельгія, Румунія);
- практично не змінює історично-сформовані важливі ринки (Польща, Німеччина).

Також для фінальної оцінки якості моделі в рамках її апробації доцільно визначити, наскільки сформована нею оптимальна структура виявилася ефективнішою за фактичну структуру. Для цього порівнюємо значення цільової функції для даних структур, які розраховані за формулою (2.2), наступним чином:

$$\left(\frac{Z_{opt}^{(2024)}}{Z_{act}^{(2024)}} - 1 \right) \cdot 100\% = 31,66\%$$

Отже, сформована оптимальна структура експорту меблів на 2024 рік є на 31,66% ефективнішою, ніж фактична структура, згідно з визначенням (інтерпретацією) цільової функції Z .

Таким чином, апробація моделі на 2024 році підтверджує, що вона є придатною для переходу до перспективного прогнозування та формування стратегії на наступний період – 2025 рік.

Висновки до другого розділу

У другому розділі дипломної роботи було здійснено дослідження проблематики оптимального розподілу зовнішньоторговельного ресурсу в меблевій галузі України з орієнтацією на ринки країн Європейського Союзу.

Проведено комплексний аналіз сучасного стану меблевої індустрії України, зокрема структури експорту меблів, що дозволило виявити нерівномірність географічного розподілу, надмірну концентрацію поставок до окремих країн та недооцінення потенціалу інших ринків. Було обґрунтовано доцільність оптимізації структури експорту на основі інтегрального показника ефективності, який враховує економічну ємність ринку, рівень цін, логістичні витрати, мита та конкурентний тиск з боку інших імпортерів.

Розроблено та формалізовано динамічну математичну модель оптимізації структури експорту меблів. Модель побудовано у вигляді задачі квадратичного програмування з обмеженням на інерційність змін, що дозволяє забезпечити її реалістичність. У моделі застосовано інтегральний показник ефективності з

багатьма змінними, включно з часткою України в загальному обсязі імпорту меблів країн, населенням країн-імпортерів та іншими економічними параметрами.

Модель було реалізовано за допомогою інструментів мови програмування *Python* (*cvxpy* + *OSQP*) та апробовано на прикладі 2024 року. Результати моделювання свідчать про не сильну узгодженість запропонованої оптимальної структури з реальними обсягами експорту: оптимальна структура виявилася на 31,66% ефективнішою. Модель виявила недооцінені ринки з високим потенціалом, а також скоригувала обсяги для країн із меншим економічним ефектом. При цьому всі математичні обмеження моделі були дотримані, що підтверджує її стійкість та ефективність.

Таким чином, у другому розділі було повністю сформовано, реалізовано та апробовано оптимізаційну модель, яка надалі буде використана для формування перспективної структури експорту на 2025 рік.

З РЕКОМЕНДАЦІЙ ЩОДО РЕАЛІЗАЦІЇ МОДЕЛІ РОЗВИТКУ МЕБЛЕВОЇ ІНДУСТРІЇ УКРАЇНИ

3.1 Аналіз результатів та оцінка ефективності моделі в контексті розвитку меблевої галузі

Розвиток меблевої індустрії України в умовах зростаючої інтеграції до європейського ринку вимагає не лише оперативного реагування на зміни зовнішнього попиту, а й коротко- та середньострокового стратегічного планування. У цьому контексті побудована в попередніх розділах модель оптимізації структури експорту виступає як аналітичний інструмент для формування ефективної зовнішньоекономічної політики в галузі.

Після успішної апробації моделі на прикладі 2024 року виникає практична потреба застосувати її для перспективного прогнозування на наступний період – 2025 рік. Такий підхід дозволяє не лише спрогнозувати бажану оптимальну структуру експорту, а й зіставити її з прогнозованою «інерційною» структурою, тобто такою, яка могла би сформуватися без втручання моделі. Це, у свою чергу, відкриває можливості для виявлення прихованих резервів, перенаправлення торгового потенціалу та посилення позицій України на ринку ЄС.

Щоб провести змістовне моделювання оптимальної структури експорту меблів на 2025 рік, першочергово було виконано трендове прогнозування обсягів експорту по кожній з 10 країн ЄС, які фігурують у моделі. Це було зроблено, щоб:

- сформувати інерційний сценарій (без оптимізації);
- обрахувати прогнозований доступний загальний експортний ресурс на 2025 рік, який використовується в моделі;
- порівняти прогнозовані обсяги в подальшому з результатами моделі;
- оцінити економічний ефект від використання оптимізаційного підходу.

Прогнозування здійснювалося на основі лінійних трендових моделей за часовими рядами експорту за 2022-2024 роки (див. Додаток В), згідно з формулою (3.1):

$$x_i^{(2025, \text{прогноз})} = a_i \cdot t + b_i, \quad (3.1)$$

де $x_i^{(2025, \text{прогноз})}$ – прогнозовані обсяги експорту меблів по країнах на 2025 рік;

a_i, b_i – коефіцієнти регресійного рівняння для країни i ;

$t \in \{2022, 2023, 2024\}$ – роки.

Моделі та прогнози були побудовані також у *Python* за допомогою програмного продукту (див. Додаток Б). Результати побудованих моделей і їх прогнозних значень обсягів експорту на 2025 рік зведено в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Прогнозовані обсяги експорту меблів з України до 10 країн ЄС на 2025 рік за трендовими моделями

Country	Trend model	R ²	Forecast Export 2025, USD
Austria	$y = 8196819,38t - 16538840318,96$	0,95	59 718 925,52
Belgium	$y = 8506889,64t - 17168741370,29$	0,99	57 710 150,73
Denmark	$y = -1230511,58t + 2534835472,92$	0,46	43 049 533,53
France	$y = 2102157,49t - 4229906620,56$	0,44	26 962 286,58
Germany	$y = 20959024,97t - 42235298552,00$	0,91	206 727 002,19
Italy	$y = 224390,62t - 445928335,18$	0,74	8 462 670,32
Netherlands	$y = -224349,64t + 469718546,96$	0,01	15 410 525,96
Poland	$y = -5278855,90t + 10951463994,33$	0,4	261 780 807,05
Romania	$y = 5122927,34t - 10334684964,40$	0,65	39 242 909,19
Spain	$y = -634878,33t + 1294948686,15$	0,24	9 320 057,77
Sum	–	–	728 384 868,84

Джерело: побудовано автором за власними розрахунками

Як бачимо з табл. 3.1, коефіцієнти детермінації побудованих моделей є середніми та навіть доволі високими (трендові моделі добре апроксимують дані та пояснюють значну частину їх варіації/зміни), окрім двох країн – Нідерланди (0,01) та Іспанія (0,24), а тому їхні прогнозовані значення можуть бути не зовсім точними. У цілому прогнозовані значення можна використовувати за їх призначенням для нашої моделі. Загальний допустимий прогнозований експортний ресурс на 2025 рік, як видно з табл. 3.1, становить 728 384 868,84 дол. США.

Таким чином, прогноз слугує базовим сценарієм, на основі якого буде побудовано оптимальну структуру експорту, а також проведено її зіставлення з інерційною (прогнозою) для оцінки ефективності моделі в стратегічному плануванні.

Тепер перейдемо безпосередньо до оптимізації структури експорту меблів на 2025 рік, виконання якої буде аналогічним до тієї, що описана в підрозділі 2.3 другого розділу, лише з іншими вхідними даними (див. Додаток Г). Програмний продукт, за допомогою якого це виконувалося, також не змінився (див. Додаток Б).

На рис. 3.1 зображено статус виконання оптимізації для нашої задачі моделювання оптимальної структури експорту меблів на 2025 рік.

```
193 # Перевірка статусу
194 if prob_2025.status not in ["optimal", "optimal_inaccurate"]:
195     raise RuntimeError(f"Оптимізація 2025 не завершена успішно: статус {prob_2025.status}")
196 else:
197     print(f"Оптимізація 2025 завершена успішно: статус {prob_2025.status}")
```

Оптимізація 2025 завершена успішно: статус optimal

Рисунок 3.1 – Перевірка статусу успішності оптимізації структури експорту меблів на 2025 рік та її результат

Джерело: отримано на основі власних досліджень автора

Як бачимо з рис. 3.1 оптимізація була повністю успішною – статус успішності *optimal*. Такий статус успішності свідчить про те, що знайдено оптимальне рішення (структуру експорту), яке задовольняє всі обмеження з дуже високою точністю.

Таблиця 3.2 – Порівняння прогнозованих й оптимальних обсягів експорту меблів по країнах і їх відносна зміна для 2025 року

Country	Forecasted furniture export volumes, USD	Optimal furniture export volumes, USD	Change, %
1	2	3	4
Austria	59 718 925,52	55 640 023,94	-6,83
Belgium	57 710 150,73	52 939 407,07	-8,27
Denmark	43 049 533,53	47 998 755,88	11,50
France	26 962 286,58	29 207 701,82	8,33
Germany	206 727 002,19	187 257 726,58	-9,42
Italy	8 462 670,32	10 202 683,31	20,56

Продовження табл. 3.2

1	2	3	4
Netherlands	15 410 525,96	17 880 034,06	16,02
Poland	261 780 807,05	274 219 357,26	4,75
Romania	39 242 909,19	39 250 784,10	0,02
Spain	9 320 057,77	13 788 394,80	47,94
Sum	728 384 868,84	728 384 868,84	–

Джерело: побудовано автором за власними розрахунками

Для аналізу цих результатів моделювання оптимальної структури експорту меблів на 2025 рік варто провести їх порівняння із прогнозованою структурою експорту, а також оцінити їх відносні зміни (див. табл. 3.2).

Також для кращої наочності такого аналізу побудуємо відповідну візуалізацію (див. рис. 3.2).

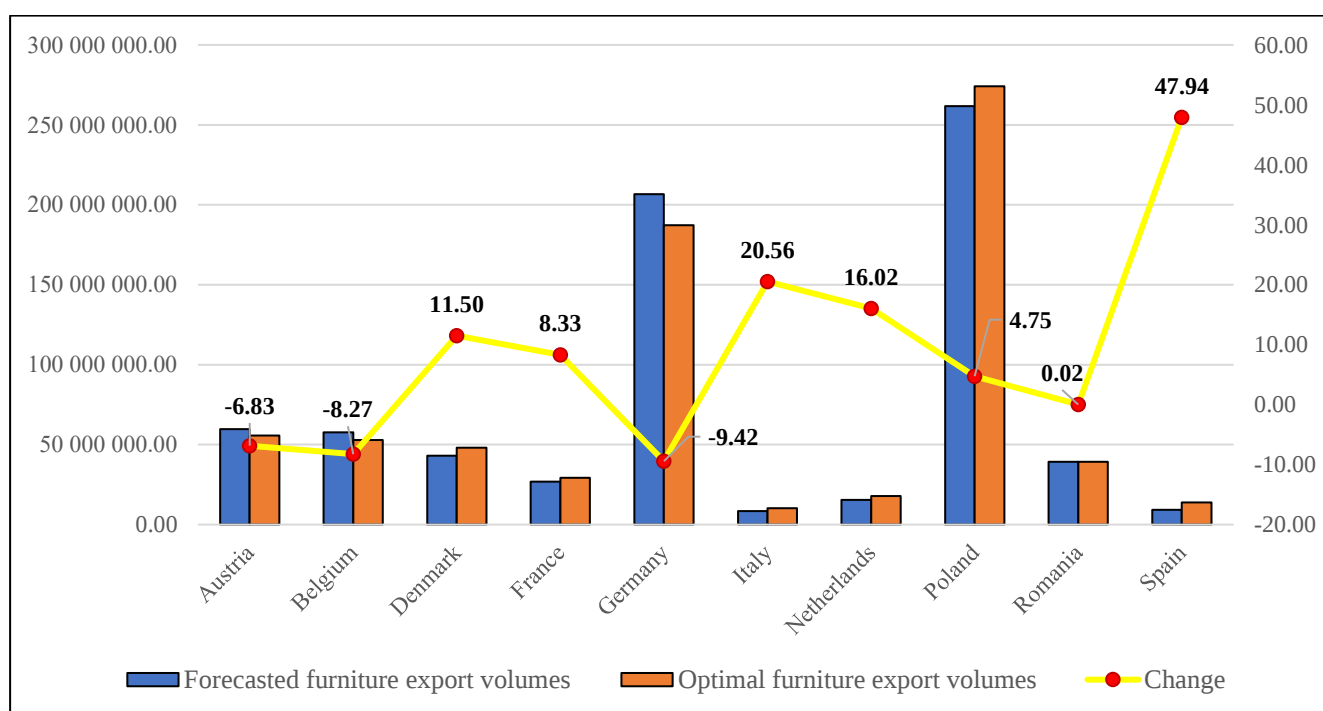


Рисунок 3.2 – Порівняння прогнозованих й оптимальних обсягів експорту меблів по країнах (ліва вісь, дол. США) та зміна оптимальних обсягів відносно прогнозованих (права вісь, %) для 2025 року

Джерело: побудовано автором за власними розрахунками

З табл. 3.2 і рис. 3.2 бачимо, що оптимальна структура на 2025 рік не узгоджується з прогнозованою структурою, окрім Румунії.

Для країн з вищими оптимальними обсягами експорту (Данія, Франція, Італія, Нідерланди, Іспанія – збігається також і з результатами апробації моделі) модель виявляє резерви для розширення присутності, адже вони демонструють позитивні економічні та конкурентні характеристики. Особливо у випадку Іспанії (+47,94%), де ринок має високу купівельну спроможність, а частка України є дуже низькою – тобто є високий потенціал для розширення.

У країн із меншими оптимальними обсягами (Австрія, Бельгія, Німеччина) імовірно спостерігається сильне насичення за прогнозними значеннями, тому оптимальні обсяги є меншими (зростають, але з повільнішими темпами, ніж показали трендові моделі).

У країн із мінімальними або практично відсутніми відхиленнями (Румунія, Польща) прогнозна динаміка збіглася з оптимізаційною, що свідчить про певну збалансованість зовнішньої політики експорту (на основі прогнозних значень), хоча й оптимальні обсяги в Польщі дещо більші, ніж прогнозовані.

Загалом, модель у 2025 році знову показує адекватну реакцію на вхідні макроекономічні й торгові параметри.

Також для фінальної оцінки якості отриманої оптимальної структури експорту меблів доцільно визначити, наскільки вона виявилася ефективнішою за прогнозовану структуру. Для цього порівнюємо значення цільової функції для даних структур, які розрахуємо за формулою (2.2), наступним чином:

$$\left(\frac{Z_{opt}^{(2025)}}{Z_{forecsat}^{(2025)}} - 1 \right) \cdot 100\% = 63,95\%$$

Отже, сформована оптимальна структура експорту меблів на 2025 рік є на 63,95% ефективнішою, ніж прогнозована структура, згідно з визначенням (інтерпретацією) цільової функції Z , що є дуже хорошим результатом і навіть кращим, ніж при апробації моделі на 2024 році.

Таким чином, результати моделювання оптимальної структури експорту меблів з України до 10 країн ЄС на 2025 рік показали, що модель здатна ефективно ідентифікувати ключові напрями розвитку зовнішньоекономічної діяльності галузі.

Зокрема, було встановлено, що доцільно посилити присутність на ринках Іспанії, Данії, Італії та Нідерландів, які мають високий потенціал і недозавантажені фактичним (прогнозованим) експортом. Водночас необхідно скоригувати обсяги поставок до Австрії, Бельгії та частково Німеччини, де спостерігається, на основі прогнозних значень, ймовірне перенасичення, або ж варто просто знизити темпи збільшення обсягів експорту до цих країн. Загалом модель підтвердила свою аналітичну цінність як інструмент стратегічного планування і може використовуватись для щорічного коригування пріоритетів у розвитку меблевого експорту.

3.2 Рекомендації щодо реалізації моделі в практиці експортоорієнтованого розвитку підприємств та держави

У сучасних умовах зовнішньоекономічна політика меблевої індустрії України стикається з новими викликами, які потребують переосмислення підходів до стратегічного планування експорту. Меблева галузь є однією з найбільш динамічних у національній промисловості, а її експортна орієнтація є визначальним чинником зростання. Водночас глобальні й внутрішні процеси, що активно трансформують ринкове середовище, вимагають від підприємств і держави не лише швидкої адаптації, а й випереджального планування з урахуванням ефективності, ризиків і потенціалу міжнародних ринків.

Одним із ключових чинників, що підсилює потребу в удосконаленні структури експорту меблів, є наслідки повномасштабної війни, яка серйозно вплинула як на економіку України загалом, так і на зовнішньоторговельну активність зокрема. Руйнування логістичної інфраструктури, обмежений доступ до морських портів, зміни у транспортних ланцюгах постачання, коливання валютних курсів — усе це створило додаткові перешкоди для підтримання стабільних експортних потоків. У такій ситуації вкрай важливим стає раціональне управління наявним експортним ресурсом, яке повинно базуватись не на інерційних або ручних рішеннях, а на аналітичній оцінці ефективності кожного ринку.

Водночас у країнах Європейського Союзу, що є ключовими торговельними партнерами України у меблевій сфері, відбуваються глибокі структурні зміни. Зростає попит на екологічну, енергоефективну та модульну продукцію. Виробники з інших країн – Польщі, Румунії, В'єтнаму, Туреччини – активізують свою присутність на європейському ринку, посилюючи конкуренцію. Багато українських підприємств, які раніше мали стабільні позиції в кількох провідних країнах ЄС, опинились у ситуації надмірної залежності від окремих ринків, що підвищує ризики втрат у разі локальних змін політики, попиту чи регуляторних умов. Усе це створює потребу у диверсифікації географії експорту та переході до управління портфелем ринків на основі принципів ефективності.

Також варто враховувати, що в умовах нестабільності глобальної торгівлі зростає значення точності й виваженості у прийнятті експортних рішень. У межах ЄС дедалі більше уваги приділяється прозорості походження продукції, дотриманню стандартів стійкості, а також відповідності технічним і безпековим регламентам. Це вимагає від виробників не лише зосередженості на якості продукції, але й глибшого аналізу та моніторингу ринкових умов. Стратегічне планування експорту має охоплювати не лише загальні обсяги, а й розуміння ефективності кожного ринку з урахуванням економічної віддачі, витрат на логістику, бар'єрів доступу та конкурентної ситуації.

У цьому контексті розроблена в межах цього дослідження динамічна модель оптимізації структури експорту меблів з України до країн Європейського Союзу довела свою ефективність як аналітичний інструмент стратегічного планування. Результати апробації та прогностного моделювання підтвердили її здатність виявляти найбільш перспективні напрями розвитку, коригувати зовнішньоекономічну поведінку підприємств, а також вчасно сигналізувати про ризики перенасичення на окремих ринках. Відтак постає питання практичного впровадження моделі в реальну зовнішньоекономічну політику – як на рівні окремих компаній, так і в межах державної політики підтримки галузі.

На рівні виробників меблів, що здійснюють експортну діяльність, модель може бути впроваджена у вигляді періодичної аналітичної процедури планування обсягів експорту за країнами. Практичні кроки включають:

- щорічний збір відкритих статистичних даних щодо зовнішньоекономічних показників країн ЄС;
- розрахунок інтегрального показника ефективності для кожної країни (з можливими модифікаціями в залежності від специфіки діяльності меблевих підприємств);
- формування цільового розподілу обсягів експорту за допомогою моделі (можливо, із зовнішнім консалтингом або інтеграцією моделі в корпоративну *ERP/BI*-систему);
- оцінка відхилень між фактичною та рекомендованою структурою та формування обґрунтованої корекції експортної стратегії на наступний рік.

Проте в такому разі окремої уваги заслуговує й необхідність формування компетенцій усередині компанії щодо використання подібних аналітичних інструментів. Це може реалізовуватись у вигляді навчання персоналу, створення міні-аналітичних відділів або залучення зовнішніх експертів на аутсорсі. Тим не менше, усі ці рішення є виправданими інвестиціями, оскільки дозволяють підвищити якість прийняття рішень, мінімізувати помилки в оцінці ринків та спрямувати зусилля компанії на ті напрямки, що принесуть найбільшу віддачу.

Таким чином, запропонована модель може стати важливим інструментом адаптивного управління експортною політикою підприємства, забезпечуючи стратегічну гнучкість, підвищення конкурентоспроможності на зовнішніх ринках та ефективніше використання ресурсів у складних зовнішніх умовах.

Також ефективне використання моделі не обмежується лише рівнем окремих підприємств. Вона може стати інструментом колективної координації експортної політики на рівні галузевих асоціацій, торгово-промислових палат та міжгалузевих об'єднань, які можуть використовувати результати моделі для:

- розробки галузевих рекомендацій щодо диверсифікації експорту та зниження надмірної залежності від окремих країн;

- виявлення перспективних ринків, до яких слід спрямувати просування продукції через виставкову активність, маркетингову підтримку чи B2B-комунікації;
- формування прогнозних галузевих сценаріїв та надання рекомендацій урядовим структурам щодо корекції ЗЕД-стратегії.

Таким чином, модель може стати інструментом стратегічного планування не лише на рівні підприємств, а й галузі загалом, сприяючи більш зваженій, ефективній та узгодженій експортній політиці.

Крім того, запропонована модель може бути використана не лише підприємствами чи галузевими структурами, а й застосовуватися на рівні державної політики, де її реалізація (або ж її модифікованої чи адаптованої версії) може стати частиною державної системи аналітичного моніторингу ЗЕД у межах меблевої галузі, зокрема шляхом:

- інтеграції моделі в аналітичні модулі Міністерства економіки України, Державної митної служби чи Офісу з розвитку підприємництва та експорту (наприклад, у форматі рекомендованого алгоритму для планування підтримки експортерів, для оцінки ефективності експортної структури в реальному часі або ж для моделювання сценаріїв на наступні роки – на основі актуальних макроекономічних показників та зовнішніх умов);
- використання результатів моделі для визначення пріоритетних країн у програмах компенсації логістичних витрат, фінансування виходу на нові ринки, грантової підтримки тощо;
- організації навчальних заходів, тренінгів і консультацій для представників меблевих підприємств щодо використання аналітичних підходів у плануванні експорту.

Таким чином, модель може стати частиною національної інфраструктури підтримки експортерів, сприяючи ухваленню більш обґрунтованих управлінських рішень та забезпеченню системної підтримки галузі на стратегічному рівні.

Практична цінність побудованої моделі оптимізації структури експорту меблів зумовлює доцільність її поступового вдосконалення з метою ще ширшого

застосування в умовах змін зовнішньоекономічного середовища. Хоча вже на поточному етапі вона демонструє високу точність і адекватність результатів, існує низка напрямів, у яких модель можна адаптувати до нових потреб та розширити її функціонал.

Перше за все, перспективним виглядає розширення сфери застосування моделі на інші суміжні галузі, зокрема виробництво деревини, фурнітури, аксесуарів або комплексних меблевих рішень. Базова логіка формування структури експорту залишається актуальною, проте окремі параметри моделі (наприклад, індекси цін або логістичні характеристики) можуть бути адаптовані до специфіки нової продукції.

Іншим важливим напрямом є поступовий перехід до багатокритеріальної оптимізації, де поряд із максимізацією економічного ефекту враховуватимуться також фактори ризику, стабільності ринку, екологічного навантаження або часової надійності контрактів. Такий підхід дозволить робити більш збалансовані та стійкі в довгостроковому сенсі стратегічні рішення.

Також можлива інтеграція інструментів машинного навчання для динамічного оновлення вагових коефіцієнтів та показників моделі. Наприклад, за допомогою алгоритмів кластеризації або прогнозування трендів можна виявляти нові закономірності в поведінці ринків і оперативніше адаптувати модель до змін.

Доцільним є й додавання параметрів політичної стабільності, санкційних ризиків чи регуляторного середовища, що особливо важливо для довгострокового планування в умовах нестабільної міжнародної обстановки. Такі доповнення дозволять уникати надмірної концентрації експорту в потенційно ризикових країнах.

Отже, модель має значний потенціал масштабування, і її розвиток може суттєво посилити ефективність зовнішньоекономічної політики як на рівні підприємств, так і на рівні державної стратегії розвитку галузі.

Висновки до третього розділу

У третьому розділі дипломної роботи було здійснено практичну реалізацію моделі оптимального перерозподілу експорту меблів з України до країн Європейського Союзу з орієнтацією на перспективне планування на 2025 рік.

Для початку було здійснено прогнозування обсягів експорту меблів на 2025 рік для кожної країни на основі трендового аналізу історичних даних. Це дало змогу оцінити ймовірну структуру експорту за інерційним сценарієм та сформуванати ресурсне обмеження для подальшого моделювання. Далі було застосовано оптимізаційну модель, що враховувала інтегральні показники ефективності по країнах, а також обмеження на зміну обсягів експорту порівняно з фактичними показниками 2024 року. Завдяки цьому вдалося сформуванати оптимальну структуру, яка дозволяє досягнути більшої економічної віддачі від експорту, з урахуванням реальних ринкових умов.

Побудована модель і її результат продемонстрували високу ефективність у виявленні ринків з недостатньо реалізованим потенціалом (зокрема Іспанії, Італії, Нідерландів), а також вказали на доцільність корекції поставок до окремих країн із перенасиченням або зниженням ефективності (Австрії, Бельгії та Німеччини). При цьому було збережено стабільність на ключових ринках, таких як Польща та Румунія, що свідчить про здатність моделі зберігати баланс між інерційністю та ефективністю. Оптимальна структура виявилася ефективнішою, ніж прогнозована структура, на 63,95%.

Було розроблено рекомендації щодо практичного впровадження моделі на різних рівнях. На рівні підприємств пропонується використовувати модель у межах щорічного аналітичного планування, з інтеграцією в корпоративні системи управління та підготовкою персоналу. Галузеві об'єднання можуть застосовувати модель для формування рекомендацій і координації просування на нові ринки. На державному рівні окреслено шляхи інтеграції моделі в систему підтримки експортерів, зокрема через використання у програмах підтримки, створення цифрових аналітичних інструментів та організацію навчальних заходів. Також

запропоновано напрями для подальшого розвитку моделі – від розширення на інші галузі до інтеграції багатокритеріальної оптимізації та інструментів машинного навчання.

Загалом третій розділ продемонстрував прикладне значення побудованої моделі, її практичну реалізованість і потенціал масштабування. Модель підтвердила свою здатність формувати аналітично обґрунтовані рішення та може бути ефективно інтегрована в механізми управління зовнішньоекономічною діяльністю меблевої галузі України.

ВИСНОВКИ

У дипломній роботі було здійснено комплексне дослідження проблеми оптимізації структури експорту меблів з України до країн Європейського Союзу, що передбачало як аналітичне обґрунтування, так і побудову, реалізацію й апробацію економіко-математичної моделі. В умовах трансформації зовнішньоекономічних зв'язків та динамічних змін на світовому ринку меблевої продукції проблема раціонального розподілу експортного потенціалу є актуальною і потребує системного підходу. У цьому контексті поставлена мета роботи – підвищення ефективності зовнішньоекономічної діяльності меблевої індустрії України шляхом оптимізації структури експорту – була повністю досягнута.

1. У вступі було обґрунтовано актуальність обраної теми, сформульовано мету та завдання дослідження, а також визначено його об'єкт, предмет, базу і методичні засади. Було підкреслено, що меблева галузь України є експортоорієнтованою, а ефективне управління структурою поставок є передумовою зростання її конкурентоспроможності. Також описано практичну цінність побудови моделі оптимального розподілу експортного ресурсу з урахуванням динамічних змін зовнішнього середовища.

2. Перший розділ було присвячено теоретико-методичним засадам дослідження. У ньому проаналізовано наукові підходи до економіко-математичного моделювання розвитку галузей, узагальнено методичні принципи використання математичних моделей в аналізі й плануванні зовнішньоекономічної діяльності, а також систематизовано наукові погляди щодо побудови динамічних моделей розподілу ресурсів. Окрема увага приділялась особливостям моделювання саме в контексті меблевої галузі, з огляду на її специфіку, факторну залежність та зовнішньоекономічну орієнтованість.

3. У першому підрозділі другого розділу було проведено аналітичне дослідження сучасного стану меблевої галузі України, з акцентом на її зовнішньоекономічну складову. Детально проаналізовано динаміку кількості підприємств, зайнятих працівників, капітальних інвестицій, рентабельності,

обсягів реалізації меблевої продукції та експортної структури. У процесі аналізу виявлено зростаючу концентрацію експорту в межах ЄС та нерівномірність розподілу постачань між окремими країнами, що й стало обґрунтуванням доцільності розв'язання задачі оптимального перерозподілу експортного ресурсу.

4. У межах решти другого розділу роботи було побудовано динамічну економіко-математичну модель оптимального розподілу експортного ресурсу, яка враховує численні фактори впливу: дохід на душу населення, рівень цін на меблі, логістичні витрати, мито, кількість населення країни, а також конкурентну присутність України на ринку відповідної країни. Модель реалізована у вигляді задачі квадратичного програмування з обмеженнями на зміну обсягів експорту, що дозволяє зберігати інерційність структури поставок і забезпечує реалістичність її використання на практиці. Апробація моделі на прикладі 2024 року підтвердила її адекватність, стабільність і здатність формувати ефективну та збалансовану структуру експорту.

5. У третьому розділі проведено практичне моделювання на 2025 рік, яке ґрунтувалося на прогнозних обсягах експорту, отриманих шляхом трендового аналізу. Зіставлення оптимізованої структури з прогнозною інерційною показало, що модель здатна ефективно виявляти недооцінені ринки (зокрема Іспанія, Італія, Нідерланди) та водночас коригувати поставки до країн із перевищеним обсягом або зниженим економічним ефектом. Отримані результати підтвердили, що застосування моделі може сприяти раціоналізації структури експорту, посиленню аналітичної складової в плануванні зовнішньоекономічної діяльності та формуванню обґрунтованої торговельної політики на рівні як окремих підприємств, так і галузі в цілому.

6. У результаті дослідження було також сформовано практичні рекомендації щодо впровадження моделі в діяльність меблевих підприємств, галузевих асоціацій та державних органів. Зокрема, визначено можливість щорічного використання моделі для стратегічного планування обсягів експорту, прийняття рішень щодо розподілу ресурсів, виходу на нові ринки та мінімізації залежності від надмірно освоєних напрямків. Модель довела свою адаптивність, точність та ефективність у

реальних умовах, а також може бути інтегрована в аналітичні інструменти галузевого та урядового рівня.

Загалом, проведене дослідження дало змогу не лише теоретично сформулювати та математично описати задачу оптимізації структури експорту, а й реалізувати її на практиці на основі реальних статистичних даних. Отримані результати є релевантними для прийняття управлінських рішень і можуть слугувати основою для подальших досліджень і розробки галузевих стратегій зовнішньоекономічного розвитку меблевої індустрії України.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Вітлінський В.В., Геєць В.М., Базілевич В.Д. Економічна кібернетика : підручник. Київ : Знання, 2010. 646 с.
2. Іващук О.Т. Економіко-математичне моделювання : навч. посібник. Тернопіль : ТНЕУ «Економічна думка», 2008. 704 с.
URL: <https://dspace.wunu.edu.ua/handle/316497/650> (дата звернення: 10.02.2025).
3. Тарасюк Г.М. Методи і моделі економіки : навч. посібник. Київ : КНЕУ, 2011. 245 с.
4. Гриньова В.М., Ліпич Л.І. Економіко-математичне моделювання економічного розвитку : підручник. Харків : ІНЖЕК, 2014.
5. Лисенко Ю.Г., Михайлов Д.Ю. Оптимізаційні моделі у галузевій економіці. Економіка та держава. 2020. № 6. С. 34-39.
6. Єрмошенко М.М. Моделі сталого розвитку України. Київ : КНЕУ, 2015. 384 с.
7. Бедринець М.В. Багатокритеріальні моделі розвитку виробництва в регіонах України. Наукові праці Одеського державного університету. 2019. № 3. С. 45-52.
8. Інститут економіки та прогнозування НАН України: офіційний сайт.
URL: <https://www.ief.org.ua/> (дата звернення: 15.02.2025).
9. Дідух Т.І. Математичне моделювання зовнішньоторговельної діяльності. Економіка та держава. 2021. № 2. С. 45-49.
10. UAfM – Українська асоціація меблевиків. Стан меблевої галузі під час війни. URL: <https://uafm.com.ua/stan-meblevoyi-galuzi-ukrayiny-pid-chas-vijny> (дата звернення: 03.03.2025).
11. YouControl Catalog. Сектор меблевої промисловості. URL: <https://catalog.youcontrol.market/mebleva-promyslovist> (дата звернення: 03.03.2025).
12. Державна служба статистики України: вебсайт.
URL: <http://www.ukrstat.gov.ua> (дата звернення: 25.03.2025).

13. Скільки-Скільки? Аналітика експорту меблів України.
URL: <https://skilky-skilky.info/eksport-mebliv-siahnuv-maksymumu-za-chas-velykoi-viyny-909-mln> (дата звернення: 03.03.2025).
14. Державне агентство лісових ресурсів України. Статистика використання деревини. URL: <https://forest.gov.ua> (дата звернення: 11.03.2025).
15. Ринденко С.С., Манаєнко І.М. Меблевий експорт в умовах війни та перспективи його відновлення. Бізнес, інновації, менеджмент: проблеми та перспективи: зб. тез доп. VI Міжнар. наук.-практ. конф., м. Київ, 24 квіт. 2025 р. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, вид-во «Політехніка», 2025. С. 192-193. URL: <https://confmanagement-proc.kpi.ua/article/view/329506> (дата звернення: 11.03.2025).
16. Дія.Бізнес. Аналіз української меблевої галузі в умовах повномасштабної війни.
URL: <https://business.diia.gov.ua/analytics/research/Analysis-of-the-Ukrainian-furniture-industry-in-conditions-of-full-scale-war> (дата звернення: 20.03.2025).
17. UAFM – Українська асоціація меблевіків. Об'єм та стан ринку меблів у 2024 році. URL: <https://uafm.com.ua/ob-yem-ta-stan-rynku-mebliv-u-2024-rotsi> (дата звернення: 20.03.2025).
18. Хома І.Б. Методи оптимізації зовнішньоекономічної діяльності підприємств. Економіка і прогнозування. 2021. № 3. С. 45-52.
19. European Commission. Trade Modelling and Impact Assessments. URL: <https://policy.trade.ec.europa.eu> (дата звернення: 21.03.2025).
20. UAFM – Українська асоціація меблевіків: офіційний сайт. URL: <https://uafm.com.ua> (дата звернення: 21.03.2025).
21. Мурашко І.І. Нелінійне програмування в задачах виробничої економіки. Бізнес Інформ. 2022. № 5.
22. Стогній В.Є. Евристичні методи в оптимізації виробництва. Наукові праці Національного університету харчових технологій. 2020. № 3. С. 112-118.
23. Bellman R. Dynamic Programming. Princeton : Princeton University Press, 1957. 342 p.
24. OECD. Modelling Mining Sector Investment Decisions. URL: <https://www.oecd.org> (дата звернення: 23.03.2025).

25. FAO. Dynamic Optimization Models in Agriculture. URL: <https://www.fao.org> (дата звернення: 23.03.2025).
26. Awerbuch S. Portfolio-Based Planning and Dynamic Optimization in Energy. Energy Economics. 2019. Vol. 81. P. 1-10.
27. Стаднюк Р.Д. Аналітичне моделювання впливу макроекономічних факторів на розвиток меблевої галузі України: звіт про проходж. переддип. практик. за кер. Лазаренко І.С. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра економічної кібернетики. 2025. 33 с.
28. Бондаренко Н., Удалих Д. Дослідження стану розвитку меблевої промисловості України в сучасних умовах господарювання. Галицький економічний вісник. 2021. № 1 (68). С. 174-184. URL: <https://galicianvisnyk.tntu.edu.ua/pdf/68/948.pdf> (дата звернення: 26.03.2025).
29. UA FM – Українська асоціація меблевиків. Розвиток української меблевої галузі у 2023 році. URL: <https://uafm.com.ua/rozvytok-ukrayinskoyi-meblevoyi-galuzi-u-2023-rotsi/> (дата звернення: 28.03.2025).
30. Стаднюк Р.Д. Прогностичне моделювання розвитку лісової та меблевої галузей України: курсова робота за кер. Лазаренко І.С. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра економічної кібернетики. 2024. 46 с.
31. Національний банк України: офіційний сайт. URL: <https://bank.gov.ua/> (дата звернення: 30.03.2025).
32. Eurostat: офіційна статистична база даних. URL: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/main/data/database> (дата звернення: 20.04.2025).
33. UN Comtrade: база даних з міжнародної торгівлі. URL: <https://comtradeplus.un.org/> (дата звернення: 20.04.2025).
34. Лазаренко І., Стаднюк Р. Сучасне моделювання та аналіз перспектив лісової галузі та меблевого ринку України. Моделювання та прогнозування економічних процесів: зб. тез доп. XVIII Міжнар. наук.-практик. конф. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. С. 70-72. URL: https://ecocyber.fmm.kpi.ua/wp-content/uploads/2025/05/mpep_XVIII_2024.pdf (дата звернення: 08.02.2025)

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

**Вхідні дані для апробації моделі оптимізації структури експорту меблів з
України до топ-10 країн ЄС на перший плановий період (2024 рік)**

Таблиця А.1 – Вхідні дані для апробації моделі

Country	AGDI	PI	POP	L	M	X_UA	X_total	delta_min	delta_max
Austria	31 052,0	134,58	9,10	66,55	0,0	41 091 841,32	3 963 595 902,00	0,15	0,35
Belgium	30 076,0	116,67	11,74	35,65	0,0	39 864 884,19	3 282 410 014,00	0,15	0,35
Denmark	26 442,0	113,10	5,93	34,40	0,0	43 984 459,54	2 840 897 676,00	0,10	0,25
France	28 594,0	118,63	68,28	41,40	0,0	25 472 063,59	13 099 964 052,00	0,10	0,25
Germany	33 350,0	123,60	83,12	67,80	0,0	172 526 202,18	22 698 963 225,00	0,05	0,15
Italy	25 795,0	117,80	59,00	57,85	0,0	8 166 155,17	4 892 246 524,00	0,10	0,25
Netherlands	30 351,0	128,36	17,81	30,60	0,0	18 520 921,94	8 276 426 469,00	0,10	0,25
Poland	20 268,0	131,60	36,75	70,83	0,0	264 822 956,51	5 021 286 806,00	0,05	0,10
Romania	18 238,0	126,03	19,05	94,68	0,0	24 659 949,08	1 841 767 205,00	0,15	0,40
Spain	21 858,0	118,46	48,09	65,85	0,0	9 286 771,58	5 265 356 517,00	0,15	0,30

Джерело: складено за даними [12; 32; 33] та власними дослідженнями автора

ДОДАТОК Б

Лістинг коду програмного продукту реалізації побудованої економіко-математичної моделі оптимізації структури експорту меблів

```
import pandas as pd
import numpy as np
import cvxpy as cp
# -----
# Повне моделювання з використанням cvxpy + OSQP
# -----
# 1) Завантаження даних з Excel
file_path = "Export_Model.xlsx"
# Аркуш "main" містить основні дані для 2023 та 2024
main_df = pd.read_excel(file_path, sheet_name="main")
# Аркуш "historical_export" містить історію експорту 2022-2024 для прогнозу на 2025
historical_df = pd.read_excel(file_path, sheet_name="historical_export")
# -----
# 2) Етап 1: Підготовка даних для оптимізації на 2024 рік
# -----
# Відокремимо рядки за роком 2023 (попередній період) та 2024
df_2023 = main_df[main_df["Year"] == 2023].copy().reset_index(drop=True)
df_2024 = main_df[main_df["Year"] == 2024].copy().reset_index(drop=True)
# У df_prep_2024 збережемо дані 2023, перейменувавши X_UA → x_prev (фактичний експорт 2023)
# i X_total → X_total_prev (загальний імпорт меблів 2023)
df_prep_2024 = df_2023.rename(columns={"X_UA": "x_prev", "X_total": "X_total_prev"})
# Розрахунок коефіцієнта частки України (C) у імпорті 2023 року:
# C_i = x_prev_i / X_total_prev_i
df_prep_2024["C"] = df_prep_2024["x_prev"] / df_prep_2024["X_total_prev"]
# Розрахунок інтегрального показника ефективності E для 2024:
# E_i = (AGDI_i * PI_i * POP_i) / (L_i * (1 + M_i) * (1 + C_i))
df_prep_2024["E"] = (
    df_prep_2024["AGDI"] * df_prep_2024["PI"] * df_prep_2024["POP"]
) / (
    df_prep_2024["L"] * (1 + df_prep_2024["M"]) * (1 + df_prep_2024["C"])
)
# Розрахунок ресурсного обмеження T2024 як сума фактичного експорту 2024
T_2024 = df_2024["X_UA"].sum()
# Витягнемо масиви, необхідні для оптимізації:
# x_prev_2023: обсяг експорту 2023
# E_2024: інтегральний показник ефективності 2024
# delta_min, delta_max: задані межі відхилення для 2024
x_prev_2023 = df_prep_2024["x_prev"].values
```

Продовження додатку Б

```

E_2024 = df_prep_2024["E"].values
delta_min = df_prep_2024["delta_min"].values
delta_max = df_prep_2024["delta_max"].values
# Обчислення вихідних нижніх та верхніх меж:
# lower_bounds_i = x_prev_i * (1 - delta_min_i)
# upper_bounds_i = x_prev_i * (1 + delta_max_i)
lower_bounds_2024 = x_prev_2023 * (1 - delta_min)
upper_bounds_2024 = x_prev_2023 * (1 + delta_max)
# -----
# 3) Етап 2: Оптимізація для 2024 року з cvxpy та OSQP
# -----
# Кількість країн (змінних)
n_countries = len(x_prev_2023)
# Оголошуємо вектор змінних x (експорт 2024)
x_2024 = cp.Variable(n_countries)
# Формулюємо цільову функцію:
# Мінімізуємо  $\sum((x_i - x_{prev\_i})^2) - E_i * x_i$ 
# Еквівалентно:  $\sum(x_i^2) - \sum((2*x_{prev\_i} + E_i)*x_i) + \text{const.}$  Константу
# опускаємо.
objective_2024 = cp.Minimize(cp.sum_squares(x_2024 - x_prev_2023) - E_2024 @
x_2024)
# Формуємо обмеження:
constraints_2024 = [
    # 1) Ресурсне обмеження: сума всіх  $x_{2024}[i] == T_{2024}$ 
    cp.sum(x_2024) == T_2024,
    # 2) Границі для кожної змінної:  $lower\_bounds_{2024}[i] \leq x_{2024}[i] \leq$ 
upper_bounds_2024[i]
    x_2024 >= lower_bounds_2024,
    x_2024 <= upper_bounds_2024
]
# Створюємо та вирішуємо задачу з використанням OSQP (спеціалізований QP-
# розв'язувач)
prob_2024 = cp.Problem(objective_2024, constraints_2024)
# Викликаємо solver OSQP з параметрами точності:
# eps_abs: абсолютна точність, eps_rel: відносна точність, max_iter: максимальна
# кількість ітерацій
prob_2024.solve(solver=cp.OSQP, eps_abs=1e-9, eps_rel=1e-9, max_iter=20000,
verbose=False)
# Перевірка успішності
if prob_2024.status not in ["optimal", "optimal_inaccurate"]:
    raise RuntimeError(f"Оптимізація 2024 не завершена успішно: статус
{prob_2024.status}")
else:
    print(f"Оптимізація 2024 завершена успішно: статус {prob_2024.status}")

```

Продовження додатку Б

```
# Отримуємо оптимальні значення x_opt_2024
x_opt_2024 = x_2024.value
# Додаємо результати в DataFrame для подальшого аналізу
df_prep_2024["x_opt_2024"] = x_opt_2024
df_prep_2024["obj_value_2024"] = prob_2024.value
# Додаємо фактичні значення 2024 для порівняння
df_prep_2024 = df_prep_2024.merge(
    df_2024[["Country", "X_UA"]].rename(columns={"X_UA": "x_fact_2024"}),
    on="Country",
    how="left"
)
# Збереження результатів та проміжних розрахунків у Excel
df_output_2024 = df_prep_2024[[
    "Country",
    "x_prev",          # експорт 2023
    "x_fact_2024",     # фактичний експорт 2024
    "x_opt_2024",      # оптимальний експорт 2024
    "AGDI", "PI", "POP", "L", "M",
    "X_total_prev",    # загальний імпорт 2023
    "C",               # частка України 2023
    "E",               # інтегральний показник 2024
    "delta_min", "delta_max",
    "obj_value_2024"
]]
file_results_2024 = "OSQP_Results_Optimization_2024.xlsx"
df_output_2024.to_excel(file_results_2024, index=False)
# -----
# 4) Етап 3: Прогнозування експорту на 2025 рік (лінійна регресія)
# -----
years = np.array([2022, 2023, 2024])
forecast_2025_data = []
for _, row in historical_df.iterrows():
    # Будуємо лінійну регресію за 3 роки
    export_values = np.array([
        row["Export_UA_2022"],
        row["Export_UA_2023"],
        row["Export_UA_2024"]
    ])
    # Отримуємо коефіцієнти лінійної моделі  $y = a \cdot x + b$ 
    coeff = np.polyfit(years, export_values, deg=1)
    # Прогнозуємо на 2025
    pred_2025 = np.polyval(coeff, 2025)
```

Продовження додатку Б

```

forecast_2025_data.append({"Country": row["Country"], "pred_2025": pred_2025})

df_forecast_2025 = pd.DataFrame(forecast_2025_data)
# Розрахунок прогнозного T2025 як сума прогнозних обсягів
T_2025 = df_forecast_2025["pred_2025"].sum()

# Збереження прогнозних даних у Excel
file_forecast_2025 = "OSQP_Forecast_Export_2025.xlsx"
df_forecast_2025.to_excel(file_forecast_2025, index=False)

# -----
# 5) Етап 4: Оптимізація на 2025 рік (з cvхру + OSQP)
# -----

# Підготовка даних за 2024 для розрахунку E2025
df_prep_2025 = df_2024.rename(columns={"X_UA": "x_prev", "X_total":
    "X_total_prev"})
df_prep_2025["C"] = df_prep_2025["x_prev"] / df_prep_2025["X_total_prev"]
df_prep_2025["E"] = (
    df_prep_2025["AGDI"] * df_prep_2025["PI"] * df_prep_2025["POP"]
) / (
    df_prep_2025["L"] * (1 + df_prep_2025["M"]) * (1 + df_prep_2025["C"])
)
# Витягаємо масиви для оптимізації 2025
x_prev_2024 = df_prep_2025["x_prev"].values
E_2025 = df_prep_2025["E"].values
delta_min_2025 = df_prep_2025["delta_min"].values
delta_max_2025 = df_prep_2025["delta_max"].values
# Нижні та верхні межі без пом'якшень
lower_bounds_2025 = x_prev_2024 * (1 - delta_min_2025)
upper_bounds_2025 = x_prev_2024 * (1 + delta_max_2025)
# Оголошення змінних для 2025
n2 = len(x_prev_2024)
x_2025 = cp.Variable(n2)
# Цільова функція 2025: мінімізувати  $\sum [(x - x_{prev})^2] - E^T x$ 
objective_2025 = cp.Minimize(cp.sum_squares(x_2025 - x_prev_2024) - E_2025 @
    x_2025)
# Обмеження 2025:  $\sum x = T_{2025}$ , та bounds
constraints_2025 = [
    cp.sum(x_2025) == T_2025,
    x_2025 >= lower_bounds_2025,
    x_2025 <= upper_bounds_2025
]

```

Продовження додатку Б

```
# Формуємо та вирішуємо задачу 2025
prob_2025 = cp.Problem(objective_2025, constraints_2025)
prob_2025.solve(solver=cp.OSQP, eps_abs=1e-9, eps_rel=1e-9, max_iter=20000,
verbose=False)

# Перевірка статусу
if prob_2025.status not in ["optimal", "optimal_inaccurate"]:
    raise RuntimeError(f"Оптимізація 2025 не завершена успішно: статус
{prob_2025.status}")
else:
    print(f"Оптимізація 2025 завершена успішно: статус {prob_2025.status}")

# Оптимальні значення x_opt_2025
x_opt_2025 = x_2025.value

# Додаємо результати до DataFrame
df_prep_2025["x_opt_2025"] = x_opt_2025
df_prep_2025["obj_value_2025"] = prob_2025.value

# Додаємо прогноз 2025 для порівняння
df_prep_2025 = df_prep_2025.merge(df_forecast_2025, on="Country", how="left")

# Збереження результатів та проміжних розрахунків для 2025
df_output_2025 = df_prep_2025[[
    "Country",
    "x_prev",          # експорт 2024
    "pred_2025",      # прогноз 2025
    "x_opt_2025",     # оптимум 2025
    "AGDI", "PI", "POP", "L", "M",
    Продовження додатку Б
    "X_total_prev",   # загальний імпорт 2024
    "C",              # частка України 2024
    "E",              # інтегральний показник ефективності 2025
    "delta_min", "delta_max",
    "obj_value_2025"
]]
file_results_2025 = "OSQP_Results_Optimization_2025.xlsx"
df_output_2025.to_excel(file_results_2025, index=False)

# Повертаємо шляхи до файлів
file_results_2024, file_forecast_2025, file_results_2025
```

ДОДАТОК В

Вхідні дані для прогнозування обсягів експорту меблів по кожній з 10 країн ЄС на 2025 рік за допомогою трендових моделей

Таблиця В.1 – Обсяги експорту меблів з України до 10 країн ЄС за 2022-2024 рр.

Country	Export_UA_2022, USD	Export_UA_2023, USD	Export_UA_2024, USD
Austria	36 245 190,10	41 091 841,32	52 638 828,86
Belgium	32 605 225,44	39 864 884,19	49 619 004,72
Denmark	47 504 116,82	43 984 459,54	45 043 093,67
France	19 298 768,13	25 472 063,59	23 503 083,10
Germany	139 991 302,34	172 526 202,18	181 909 352,27
Italy	7 713 365,41	8 166 155,17	8 162 146,65
Netherlands	14 752 726,53	18 520 921,94	14 304 027,25
Poland	281 375 155,90	264 822 956,51	270 817 444,11
Romania	26 042 679,87	24 659 949,08	36 288 534,56
Spain	11 876 214,21	9 286 771,58	10 606 457,54

Джерело: складено за даними [12]

ДОДАТОК Г

Вхідні дані для моделювання оптимальної структури експорту меблів з України до топ-10 країн ЄС на 2025 рік

Таблиця Г.1 – Вхідні дані для моделювання оптимальної структури експорту меблів на 2025 рік

Country	AGDI	PI	POP	L	M	X_UA	X_total	delta_min	delta_max
Austria	32 502,0	134,39	9,16	66,55	0,00	52 638 828,86	3 635 481 210,80	0,15	0,35
Belgium	32 047,0	117,69	11,82	35,65	0,00	49 619 004,72	3 175 226 284,00	0,15	0,35
Denmark	27 744,0	105,90	5,96	34,40	0,00	45 043 093,67	2 945 943 578,00	0,10	0,25
France	30 641,0	118,63	68,47	41,40	0,00	23 503 083,10	11 675 369 899,92	0,10	0,25
Germany	35 049,0	123,50	83,46	67,80	0,00	181 909 352,27	23 357 091 121,00	0,05	0,15
Italy	27 623,0	119,50	58,97	57,85	0,00	8 162 146,65	4 992 531 105,00	0,10	0,25
Netherlands	32 135,0	123,32	17,94	30,60	0,00	14 304 027,25	8 275 115 664,00	0,10	0,25
Poland	21 065,0	134,40	36,62	70,83	0,00	270 817 444,11	5 409 327 769,00	0,05	0,10
Romania	19 528,0	133,20	19,07	94,68	0,00	36 288 534,56	2 033 119 894,00	0,15	0,40
Spain	24 614,0	119,21	48,62	65,85	0,00	10 606 457,54	5 551 158 843,00	0,15	0,30

Джерело: складено за даними [12; 32; 33] та власними дослідженнями автора