

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА**



**ЕКОНОМІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА ЕКОНОМІЧНОЇ КІБЕРНЕТИКИ
КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА БАКАЛАВРА
«Моделювання сталої логістичної мережі підприємства»**

Студентки 4 курсу
ОС «Бакалавр»
спеціальності «Економіка»
ОП «Економічна кібернетика»
Куцало Діани Геннадіївни

Науковий керівник
Кандидат фізико-математичних наук, доцент
Банна Оксана Леонідівна

Засвідчую, що в цій роботі немає
запозичень із праць інших авторів без
відповідних посилань

Студент _____
(підпис)

Роботу допущено до захисту перед ЕК
рішенням кафедри економічної кібернетики
від 2023 р., протокол №17

Завідувач кафедри:
доктор економічних наук, професор
Ляшенко Олена Ігорівна _____ (підпис)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота бакалавра містить: 57 ст., 4 рис., 3 табл., 38 джерел, 2 додатки.

Ключові слова: стала логістична мережа, невизначеність, ризик, метод Монте-Карло, лінійне програмування.

Об'єкт дослідження: стала логістична мережа підприємства ТОВ «Сатіс ЛТД».

Предмет дослідження: моделі оптимізації стійких логістичних мереж, їх оцінка.

Мета дослідження: розробка моделі сталої логістичної мережі, що забезпечує оптимальний потік матеріальних ресурсів та товарів у підприємстві, враховуючи економічний, соціальний та екологічний фактори.

Методи дослідження: математичне моделювання, оптимізаційні методи, метод Монте-Карло, лінійне програмування.

Наукова новизна, теоретична значимість дослідження: розширення української наукової бази моделей сталої логістики в умовах невизначеності, впровадження нового підходу до моделювання сталих логістичних мереж підприємств.

Практична цінність: створення логістичної мережі для компанії ТОВ «Сатіс ЛТД», надано рекомендації щодо її вдосконалення для врахування критеріїв сталості, робота може бути взята за основу для проведення подальших досліджень.

RESUME

Taras Shevchenko National University of Kyiv,
Faculty of Economics, Department of Economic Cybernetics
Pages 57, tables 3, bibliog. 38, append. 2.

Keywords: sustainable logistics network, uncertainty, risk, Monte Carlo method, linear programming.

Object of research: sustainable logistics network of Satis Ltd.

Subject of research: models of optimization of sustainable logistics networks, their evaluation.

Purpose of the study: to develop a model of a sustainable logistics network that ensures the optimal flow of material resources and goods in the enterprise, taking into account economic, social and environmental factors.

Research methods: mathematical modeling, optimization methods, Monte Carlo method, linear programming.

Scientific novelty, theoretical significance of the study: expansion of the Ukrainian scientific base of sustainable logistics models under conditions of uncertainty, introduction of a new approach to modeling sustainable logistics networks of enterprises

Practical value: creation of a logistics network for Satis LTD, recommendations are provided for its improvement to take into account sustainability criteria., the work can be used as a basis for further research.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	5
ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ СТАЛОЇ ЛОГІСТИКИ	9
1.1. Концепція стійкої логістики	9
1.2. Три виміри стійкої логістики	13
1.3. Невизначеність та її вплив на ланцюги поставок	16
Висновки до розділу 1	22
РОЗДІЛ 2. ПІДХОДИ ДО МОДЕЛЮВАННЯ СТАЛОЇ ЛОГІСТИЧНОЇ МЕРЕЖІ	23
2.1 Методи моделювання сталої логістичної мережі	23
2.2. Метод Монте-Карло для моделювання стійкої логістичної мережі в умовах невизначеності	26
2.3. Оцінка ефективності стійких логістичних мереж	29
Висновки до розділу 2	33
РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ СТАЛОЇ ЛОГІСТИЧНОЇ МЕРЕЖІ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ	34
3.1 Постановка проблеми	34
3.2 Математичний опис проблеми моделювання логістичної мережі	37
3.3 Моделювання логістичної мережі компанії ТОВ «Сатіс ЛТД»	40
Висновки до розділу 3	45
ВИСНОВКИ	46
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	50
ДОДАТКИ	54

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

SSCM (sustainable supply chain management) - стале управління ланцюгом поставок;

SCM (supply chain management)- управлінням ланцюгом поставок;

SCS (supply chain sustainability) - сталість ланцюга поставок;

CSR (corporate social responsibility) – корпоративна соціальна відповідальність (КСВ);

EBITDA - прибуток до сплати відсотків, податків, зносу та амортизації;

R&D (research and development) - науково-дослідні розробки;

MOP (multi-objective programming) - багатокритеріальне програмування ;

TBL (triple-bottom-line) – потрійна нижня межа;

DEA (Data Envelopment Analysis) - аналіз охоплення даних;

DMU (Decision Making Unit – відділ прийняття рішень.

ВСТУП

Актуальність теми. Зростання світової торгівлі, зміни клімату, строгі екологічні норми та вимоги споживачів ставлять підприємствам вимоги щодо покращення стійкості їхньої логістичної мережі.

Моделювання стійкої логістичної мережі дозволяє підприємствам аналізувати і оптимізувати свої операції з точки зору екологічної ефективності та соціальної відповідальності, а також забезпечити стійке економічне зростання. Це дозволяє створити оптимальну мережу підприємств, складів, транспортних систем та інших елементів логістичного ланцюжка з метою забезпечення максимальної ефективності, екологічної сталості та соціальної відповідальності .

Застосування моделей стійкої логістичної мережі дозволяє підприємствам зменшити свій вплив на довкілля, знизити витрати на енергію та ресурси, покращити управління запасами та забезпечити більш ефективну доставку товарів до клієнтів. Крім того, це може сприяти створенню позитивного іміджу підприємства серед споживачів та інших зацікавлених сторін.

Незважаючи на вже існуючу літературу про планування логістичної мережі, встановлення стійкого управління логістикою з урахуванням невизначеностей є важливою темою, якою ще не займалися дослідники так детально. Як наслідок, необхідно розробити ефективні стратегії подолання ризиків і проблем сталого розвитку.

Саме тому тема моделювання стійкої логістичної мережі підприємства є актуальною, особливо в контексті сучасних викликів, пов'язаних зі сталим розвитком.

Стан наукової розробки проблеми.

Моделювання сталої логістичної мережі підприємства наразі вже є досить широкою та розвиненою темою дослідження. Логістичні мережі та сталість підприємств досліджували такі українські науковці, як Ю. Кожин та К. Смілов.

Розробкою системи логістичних показників стійкості процесу займались так вчені, як А.А. Александров, А.У. Альбекова, А.Е. Бром, О.В. Белова, В.В. Борисова, Л.А. Сосунова, Н.П. Коропова, І.І. Коблянська, Л.М., Зарецький, І.Н. Омельченко та Д.В. Чернова [1, с. 365]. За кордоном проблемами сталості логістичних мереж займались С. Картер та Д. Роджерс [2], М. Мюллер та С. Сьюринг [3], Р. Деккер, Дж. Бломхоф та І. Маллідіс [4], А. МакКінон, Я. Тонгзон, Х. Лі, Х. Гламс, С. Гіома, С. Мелтцер тощо.

Необхідно зазначити, що порівняно з зарубіжними науковцями, кількість наукових праць та досліджень, опублікованих українськими авторами, менша, особливо в питанні моделювання сталих логістичних процесів в умовах кризи чи/та невизначеності.

Наукова розробка проблеми моделювання сталої логістичної мережі підприємства продовжує розширюватися та вдосконалюватися, проте все ще потребує подальших досліджень, спрямованих на покращення розуміння, розвиток нових моделей та практичне впровадження.

Дана робота несе свій вклад як в теоретичних аспектах розширення української наукової бази моделей сталої логістики в умовах невизначеності, так і несе практичне значення створення стійкої логістичної мережі для компанії ТОВ «Сатіс ЛТД».

Об'єкт дослідження. Логістична мережа підприємства ТОВ «Сатіс ЛТД».

Предмет дослідження. Моделі оптимізації стійких логістичних мереж, їх оцінка.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є аналіз вже існуючих підходів до моделювання та оцінки сталих логістичних мереж, а також їх порівняння для знаходження оптимального варіанту, розробка теоретичних і методологічних основ для подальших досліджень у галузі стійкої логістичної мережі.

Поставлена мета дослідження зумовила необхідність вирішення наступних завдань:

- визначення основних понять, сутності сталої логістичної моделі;
- дослідження та обґрунтування типових методів для побудови та оцінки моделей;
- визначення впливу невизначеності на логістичні;
- побудова та дослідження економіко-математичних моделей стійкої логістичної мережі, в тому числі за допомогою метода Монте-Карло;
- оптимізація екологічних, економічних та соціальних аспектів.

Методи дослідження. В роботі застовується системний підхід до розгляду проблеми сталих логістичних процесів. Також використано такі методи наукового дослідження, як узагальнення, статистичні методи, оптимізація, аналіз, синтез, економіко-математичне моделювання та порівняння.

Інформаційною базою дослідження є науково-дослідницькі роботи вітчизняних та зарубіжних авторів; періодичні видання у фахових економічних виданнях; наукова література економічного характеру; інформація, яка розміщена в мережі Інтернет.

Структура роботи. Бакалаврська робота складається із вступу, переліку умовних позначень, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатка.

Публікації. Результати досліджень були представлені на міжнародній науково-практичній конференції, на якій вони обговорювались та опубліковані у збірнику тез доповідей «Шевченківська весна 2023. Повоєнне відновлення економіки України: проблеми та перспективи» у розділі «Моделювання та інформаційні технології в економіці: напрямки розвитку та адаптація під час війни». [5, с. 61]

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ СТАЛОЇ ЛОГІСТИКИ

1.1. Концепція стійкої логістики

Стале управління ланцюгом поставок (SSCM – sustainable supply chain management) стає все більш важливою темою в контексті сталого розвитку та управління ланцюгом поставок.

Порівняння кількості досліджень, що були опубліковані з 1990 року, вказує на те, що теми сталого розвитку, ланцюга поставок і стійкого ланцюга поставок з'явилися з початку 1990-х років. Проте, хоча цільові напрямки сталого розвитку та ланцюга поставок стали більш популярними в перші роки 2000-х, тема інтегрованого сталого ланцюга поставок отримала значну увагу приблизно через 5-10 років. Зауважимо, що третина статей зі сталого розвитку або ланцюга поставок була опублікована до 2009 року, у той час як понад 90% усіх робіт зі сталого ланцюга поставок з'явилися після 2009 року [6].

Згідно з визначенням Картера і Роджерса [2], SSCM передбачає стратегічну, прозору інтеграцію організації з метою досягнення соціальних, екологічних та економічних цілей. Це досягається шляхом системної координації міжорганізаційних бізнес-процесів з метою поліпшення довгострокових економічних показників окремої компанії та її ланцюга поставок.

Картер і Роджерс розробили концептуальну структуру, що пов'язує стійкість з управлінням ланцюгом поставок (SCM). Автори надали визначення поняттям стійкого управління ланцюгом поставок (SSCM) і виявили його різні сфери застосування. Автори визначили чотири допоміжні аспекти - управління ризиками, прозорість, стратегію і культуру - для зв'язку між управлінням ланцюгом поставок із тривимірною моделлю сталого розвитку (TBL). В рамках цього контексту ризик розглядається як соціально-екологічна шкода, що може виникати через продукти, послуги та операції компанії або ланцюга поставок, і ним необхідно керувати шляхом планування надзвичайних ситуацій, збоїв у постачанні та стратегій ланцюга поставок.

Дослідження авторів також виявило зв'язок між інтеграцією сталого розвитку в управлінні ланцюгом поставок і довгостроковим економічним успіхом [2].

Стійке управління ланцюгом поставок (Sustainable Supply Chain Management, SSCM) може бути описане як управління потоками матеріалів, інформації та капіталу, а також співпраця між компаніями вздовж ланцюга поставок, з одночасним урахуванням цілей сталого розвитку у всіх трьох вимірах: економічному, екологічному та соціальному, які виникають з вимог клієнтів та зацікавлених сторін. [с. 1700, 3]

Дослідження, проведене Seuring і Müller [3], аналізувало 191 наукову роботу зі стійкого управління ланцюгом поставок (SSCM), опубліковану між 1994 і 2007 роками. Вони оцінили розробки і тенденції у дослідженнях SSCM та запропонували концептуальну основу для SSCM на основі свого аналізу. Згідно з дослідженням, екологічний аспект однозначно переважав у дослідженнях SSCM (140 статей), тоді як лише приблизно кожна четверта робота зосереджувалася на соціальних аспектах або охоплювала всі аспекти сталого розвитку згідно концепції "потрійної нижньої межі" (TBL). Стандартні стратегії, такі як підвищення продуктивності і управління ризиками або стійкість продукту, допомагають поширювати стійкість ланцюга поставок, але високі витрати, складність і відсутність зв'язку виступають як головні перешкоди для впровадження SSCM. Дослідження підкреслює, що покращення міжорганізаційної комунікації, впровадження систем моніторингу та звітності та інших управлінських інструментів можуть сприяти ефективності та управлінню ризиками [3].

Основний внесок дослідження Деккера, Блоемгофа та Маллідіса (Dekker, R.; Bloemhof, J.; Mallidis, I.) у стійке управління ланцюгом поставок (SCM) полягає в наданні огляду аспектів, питань, внесків та викликів, пов'язаних з зеленим логістикою. Вони зосередилися на застосуванні операційного дослідження в контексті зеленого логістичного управління та визначили основні виклики та проблеми, що виникають у цій галузі.

Дослідження розглядає різні аспекти стійкого SCM, такі як зменшення викидів парникових газів, оптимізація маршрутів доставки, використання енергоощадних технологій та матеріалів, ефективне управління відходами та повторне використання ресурсів. Вони також звертають увагу на важливість співпраці між різними учасниками ланцюга поставок, включаючи виробників, постачальників, дистриб'юторів та споживачів, для досягнення стійкого розвитку.

Деккер, Блоемгоф та Маллідіс також ідентифікували виклики та перешкоди, з якими стикаються організації при впровадженні зелених практик в SCM, такі як високі витрати на зелені ініціативи, складність оцінки впливу зелених ініціатив на бізнес-процеси та потребу відповідного технологічного обладнання [4].

Сталість ланцюга поставок (SCS) або стійке управління ланцюгом поставок (SSCM) визначається як створення взаємозв'язаних ланцюгів поставок, де економічні, екологічні та соціальні аспекти об'єднуються з ключовими бізнес-системами між організаціями. Мета такого управління полягає у ефективному керуванні потоками матеріальних, інформаційних та капітальних ресурсів, пов'язаних з закупівлею, виробництвом та розповсюдженням продуктів або послуг. Це сприяє забезпеченню підвищеної прибутковості, конкурентоспроможності та стійкості організації як у короткостроковій, так і у довгостроковій перспективі [7].

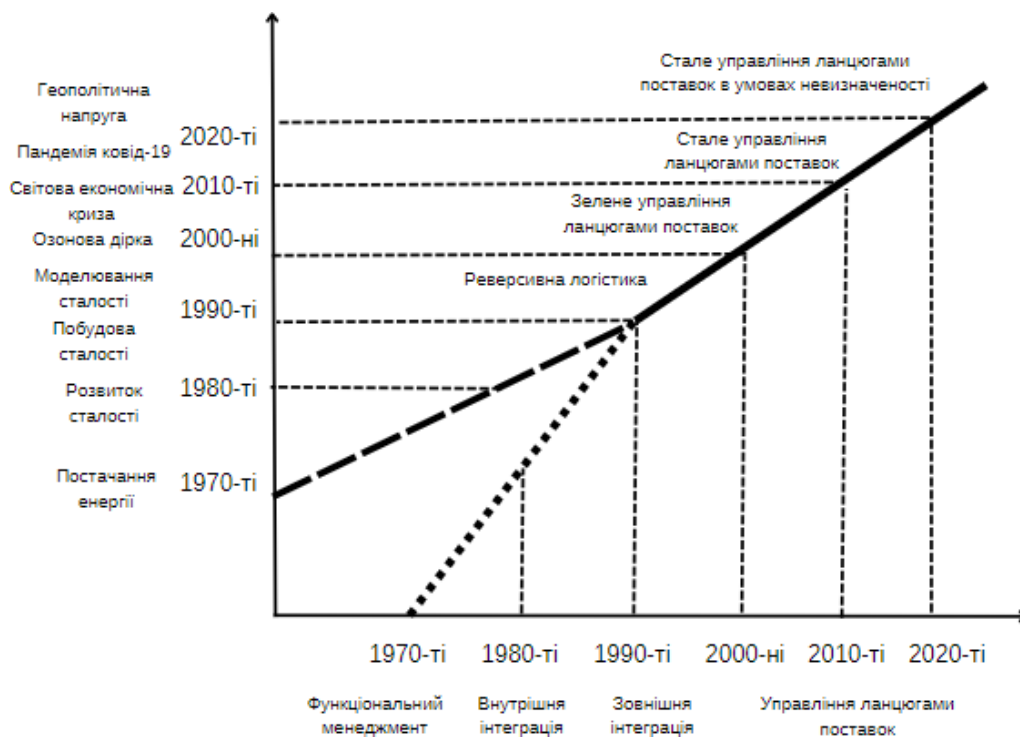


Рис. 1.1. Процес злиття сталого розвитку і управління ланцюгами поставок
 Джерело: Доповнено автором на основі [8],

де:

- - Розвиток сталості
- - Розвиток управління ланцюгами поставок
- - Процес злиття.

Сучасні вимоги як з боку уряду, так і споживачів, закликають підприємства приділяти увагу охороні навколишнього середовища та брати на себе більшу соціальну відповідальність. Сталий розвиток став необхідною умовою успішної діяльності підприємства. Компанії, такі як ІКЕА, НР, ІВМ і GE, впроваджують "сталі" ініціативи для покращення своєї соціальної відповідальності та створення позитивного корпоративного іміджу. Згідно з деякими вченими [9], SSCM є розширенням зеленого управління ланцюгом поставок, оскільки воно включає соціальні аспекти для поліпшення управління підприємством.

Рис. 1.1 демонструє інтеграцію між управлінням ланцюгом поставок (SCM) та стійкістю з 1970-тих років і до сьогодні.

1.2. Три виміри стійкої логістики

Як вже було зазначено, стала логістика розглядається з трьох сторін, включаючи економічну, екологічну та соціальну.

Економічна стійкість, заснована на розширеній теорії конвертованості капіталу Солоу та концепції Хікса-Ліндаля щодо максимального доходу, який може бути отриманий шляхом збереження капіталовкладень для майбутніх поколінь. Це спрямовано на досягнення економічної стійкості, максимізацію потоку прибутку та споживання в бізнес-організаціях.

Звітність є ключовим принципом стандарту ISO 26000, що охоплює питання етики та управління. Даний аспект є важливим в контексті сталого розвитку, а деякі компанії включають його у свої звіти шляхом аналізу різних показників КСВ.

Маржа прибутку, що називається також прибутком до сплати відсотків, податків, зносу та амортизації (ЕВІТДА), не відображає безпосередньо грошовий потік, доступний для обслуговування фінансового боргу, хоча вона слугує його оцінці.

У економічній стійкості існують інші витрати, які впливають на сталість розвитку, наприклад, витрати на сировину, матеріали та енергію. Ці витрати мають значний вплив на продажі, операційний дохід і чистий прибуток, тому компанії змушені зменшувати їх, щоб забезпечити оптимальний прибуток.

Сектор виробництва швидко розвивається, і це великою мірою обумовлено R&D. Цій галузі належить найбільша частка науково-дослідних робіт. Компанії вважають науково-дослідні розробки важливим інструментом для покращення продукту і забезпечення його тривалого успіху на ринку. Тому витрати на дослідження та розробки вважаються необхідними для забезпечення постійного інноваційного розвитку [7].

Економічний вимір стійкості ґрунтується на оцінці загальної вартості мережі або чистого прибутку. Загальна вартість мережі зазвичай включає витрати на створення об'єкта, транспорт, інвентар, собівартість виробництва

та продукції. Різні структури ланцюга поставок відображають різні складові витрат [8].

Деякі дослідники враховують інвестиційну вартість охорони навколишнього середовища як складову вартості мережі [10]. Інші вводять вартість вуглецевих кредитів у фактор витрат [11]. Або досліджують економію витрат, яка виникає при використанні багатофункціонального засобу порівняно з монофункціональним [11].

Вимірювання **соціальної ефективності** пов'язане з багатьма зацікавленими сторонами та міждисциплінарністю, тому його важко точно описати, оскільки дослідження в цій галузі обмежені і ще не сформували спеціалізовану систему. Міжнародна організація зі стандартизації (ISO) запропонувала керівні принципи для вимірювання соціальної ефективності в своєму керівництві щодо соціальної відповідальності ISO-26000, що класифікує соціальні питання на сім аспектів:

1. трудові практики
2. проблеми клієнтів
3. управління організацією
4. права людини
5. чесна праця
6. навколишнє середовище
7. розвиток громади.

Деякі з найбільш надійних та популярних методів вимірювання соціальних характеристик включають SA8000, ETI, FLA, GC, GSLCAP і GRI. Всі ці методи частково або повністю охоплюють сім аспектів, щоб забезпечити комплексне соціальне вимірювання [8].

С. Г. Тайяр, Д. Рой та С.Ф. Гадері досліджують проблему сталого постачання замкнутим циклом та мінімізації соціального впливу у дизайні ланцюга постачання [13].

З. Чен та С. Андресен обирають кількість виробничого травматизму як соціальний показник у вимірюванні соціальної ефективності [14].

Л. Сюй і Й.К.Тенг досліджують багатоцільову проблему проектування ланцюга постачання замкнутим циклом, а соціальний показник складається з таких компонентів, як створення робочих місць, річних втрачених днів, потенційно небезпечних ситуацій та розвиток благодійних ініціатив [15].

У вимірюванні **екологічного фактору** зазвичай використовуються показники викидів CO₂ або еквівалентів CO₂, такі як МГЕЗК та метод вуглецевого сліду. Дослідники вивчають споживання енергії та викиди CO₂ в ланцюгу постачання, оцінюючи їх за допомогою програм і методів, таких як Cargo Score. Крім того, використовуються інші показники, такі як викиди інших парникових газів (NO_x, SO₂, CO), споживання енергії (вода, електроенергія, мазут, земля) та обсяги викидів відходів у навколишнє середовище. Оцінка життєвого циклу (ОЖЦ) є ще одним методом вимірювання екологічного впливу, який оцінює навантаження на навколишнє середовище протягом усього життєвого циклу продукту або процесу. Існує кілька методів оцінки екологічного навантаження, таких як CML2001, Eco-indicator 99, EDIP 2003, EPS 2000, IMPACT 2002+, Ecological Scarcity, TRACI та ReCiPe2008, які враховують вплив на навколишнє середовище у різних аспектах. Ці методи використовуються для кількісної оцінки та нормалізації результатів, але доступні механізми зважування та нормалізації можуть варіюватись залежно від методу [8].

1.3. Невизначеність та її вплив на ланцюги поставок

Проектування стійких ланцюгів поставок, які можуть витримувати вплив непередбачуваних подій, отримує все більше уваги останнім часом. Багато досліджень зосереджені на врахуванні стохастичних параметрів, таких як попит або вартість, при розташуванні та розміщенні об'єктів. Однак небагато дослідників досліджували вплив інших джерел збоїв, які можуть спричинити численні переривання в діяльності через непередбачувані події. Насправді, такі перерви є неодмінною частиною нашого сучасного світу. Проте, події, що мають хвильовий ефект, наприклад, епідемічні спалахи, є складнішими для управління і розуміння. Збої можна умовно поділити на два типи: ізольовані збурення та каскадні збурення з хвильовими ефектами. Останні є особливими випадками збоїв у ланцюгах поставок, оскільки вони можуть швидко поширюватися і впливати на всьому світі, на відміну від ізольованих збоїв [8].

Було проведено кілька досліджень, які розглядали операційні ризики та ризики збоїв у роботі з економічними міркуваннями. Наприклад, В. Клібі та А. Мартель вивчали різні збої, пов'язані з природними катастрофами та промисловими аваріями, за допомогою стохастичної моделі "місцезнаходження-транспорт". Вони розглядали параметри невизначеності як випадкові змінні з кумулятивною функцією розподілу і використовували правдоподібні сценарії для моделювання перебоїв. Також було запропоновано різні стратегії для розробки стійких розподільчих мереж.

Аналогічно, Х. Цинь та ін. вирішили проблему проектування логістичної мережі з випадковими збоями, введенням двох стратегій зменшення ризику - укріплення та попереднє розміщення запасів у двоетапній моделі змішаного стохастичного програмування [17].

У роботі Д. Іванова, А. Павлова та А. Долгого було розглянуто сім різних стратегій для реконфігурації логістичних мереж з використанням моделей лінійного та динамічного програмування, приділяючи увагу рівню обслуговування та обсягам продажів як метрикам стійкості [18].

Таким чином, в деяких дослідженнях розглядалося питання про операційні ризики та ризики збоїв у роботі з економічними міркуваннями. Вони досліджували різні види збоїв, використовуючи стохастичні моделі та розробляючи стратегії для стійкого проектування розподільчих та логістичних мереж. Також були розглянуті випадки невизначеності та надзвичайних ситуацій, які впливають на проектування мережі ланцюгів поставок [19]. У останні роки, ланцюги поставок стали складнішими і більш вразливими. Це призвело до зіткнення логістичних мереж з невизначеністю, яка серйозно порушує функціонування ланцюга поставок. Крім того, ланцюги поставок можуть бути під впливом природних катастроф, економічних або політичних криз, а також епідемічних вибухів інфекційних захворювань, таких як пандемія COVID-19, світова геополітична напруга через війну в Україні, тощо. Це все серйозно вплинуло на різні сфери економічної і не тільки діяльності, а особливо на сектор вантажного транспорту. Насправді, порушення мають значний вплив на всю логістичну систему. Наприклад, операційні ризики, пов'язані зі властивою невизначеністю даних та коливаннями вхідних даних, можуть погіршити ефективність логістичних систем. Тому, поширення ризиків в проектуванні логістичної мережі стали ключовими питаннями, які потрібно вирішувати для протистояння невизначеності [19].

Війна в Україні суттєво впливає на глобальний ланцюг поставок, оскільки Україна є важливим виробником та постачальником різноманітних товарів та послуг, які використовуються в численних країнах світу. Наприклад, Україна займає одне з провідних місць у світі за експортом зернових культур, металургійної продукції та електроенергії.

Внаслідок війни спостерігається зниження обсягів виробництва та поставок товарів, погіршення якості продукції та збільшення ризику затримок у доставці товарів. Крім того, це призводить до підвищення цін на сировинні товари та зростання інфляції.

Блокування українських портів на Чорному морі та затримка вантажних суден порушують ланцюги поставок. Це створює труднощі для компаній, що

залежать від поставок, зокрема з України, та вимагає поліпшення управління ланцюгом поставок [20].

Якщо розглянути це детальніше, то відбулись перебої у поставках товарів з України, зокрема тих, які доставлялись морським шляхом і відсоток яких до війни становив 70% від загальної кількості українського експорту. У 2022 році перевезення морським транспортом залишилися найвагомішими у структурі експорту, хоча їхня частка знизилась до 54% від обсягу усього експорту.

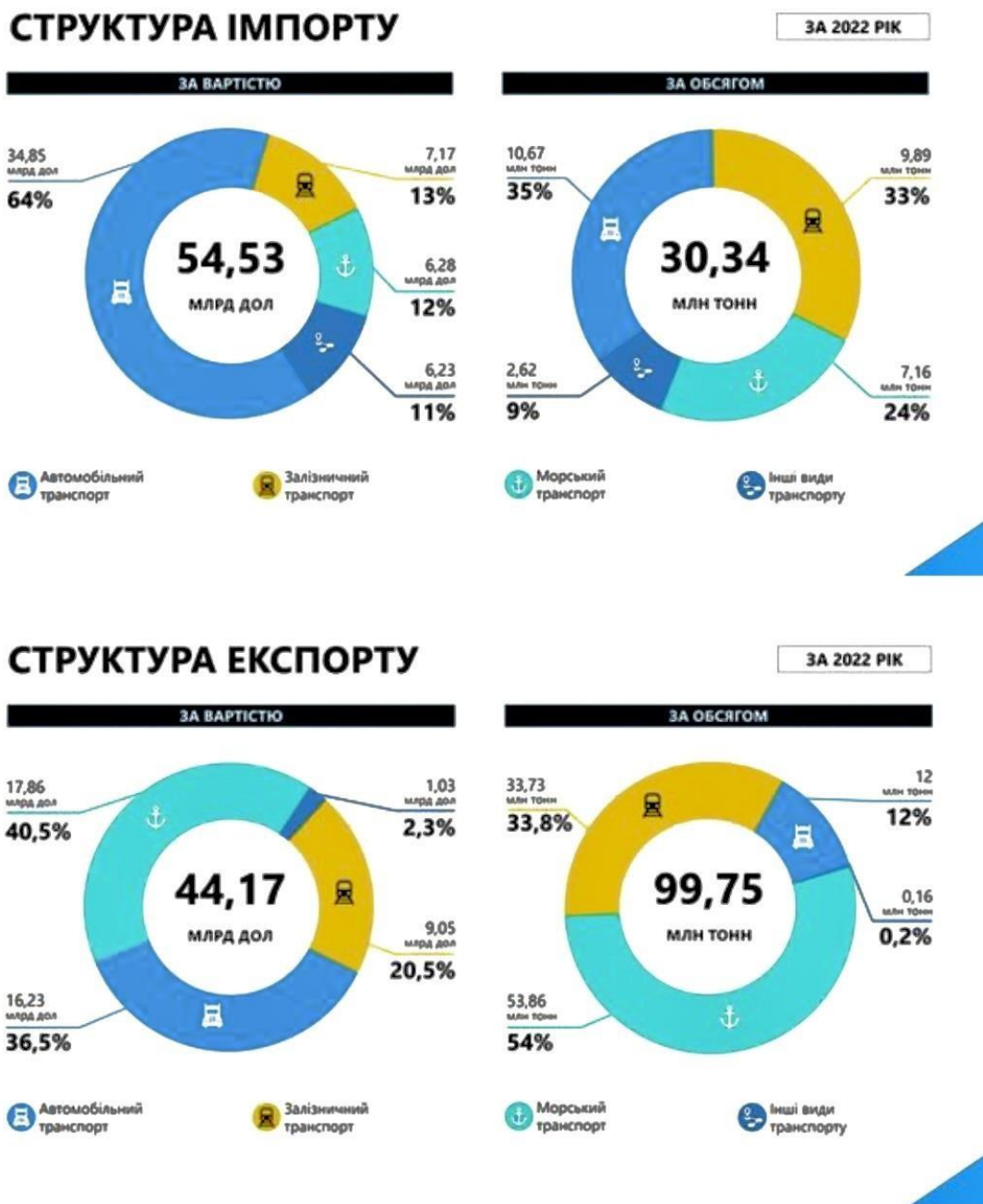


Рис. 1.2. Структура експорту та імпорту України у 2022 році.
Джерело [21].

Водночас загальний обсяг українського експорту - на 38,4% менший у порівнянні з попереднім роком, а вартісно відбулось скорочення на 35% [22].

Виробничі затрати зросли через збільшення цін на сировину. Зокрема, вартість пального зросла на третину з 90 доларів за барель до 120 доларів з початком повномасштабного вторгнення. Потрібно зазначити, що на сьогодні ціна має тенденцію до зниження і вже повернулась до рівня січня минулого року (нижче 80 доларів за барель), що сприятиме позитивним фактором на стабілізацію цін як на виробництво, так і на перевезення



Рис. 1.3. Динаміка цін на нафту

Джерело: [23].

Значного впливу зазнав також продовольчий ринок, а особливо скоротились поставки зернових культур з України.

У 2022 році виробництво зернових культур впало на 37% порівняно з попередніми рекордними показниками у 2021 році.

Варто вказати, що у 2021 році Україна забезпечувала Європейський Союз зерновими майже на 30%, а також майже 50% світового експорту соняшникової олії.

За результатами 2022 року було експортовано зернових культур на 24% менше аналогічного показника минулого року, та рослинних олій (на -17%).

Найбільше від експорту українських рослинних та тваринних олій та жирів залежали Польща (75,7%), Словачія (72,1%), Кіпр (більше 50%), Чехія та Португалія (більше 40%). Зниження обсягів експорту соняшникової олії на 16,3% та експорту зерна на 27% у зв'язку з проблемами у поставках є одними із основних причин світової продовольчої кризи [24].

Також необхідно зазначити збільшення часу самих перевезень, обмежений доступ до ресурсів та зниження рівня кібернетичної безпеки в ланцюгах поставок.

Усі ці фактори роблять війну в Україні серйозним викликом для світового ланцюга поставок. Компанії повинні вивчати ризики та забезпечити себе планами дій, а також шукати альтернативні шляхи постачання товарів та ринки.

Тобто, фактори, які мають значний вплив на глобальну логістику:

- Світові запаси вичерпних невідновних ресурсів: визначення максимально допустимих обсягів їх використання та створення інструментів контролю їх дотримання
- Глобальні матеріальні потоки: планування, створення системи задоволення потреб з мінімальною відстанню між суб'єктами створення і споживання благ, мінімізація негативного впливу від перевезень, створення глобальної мережі логістичних центрів
- Глобальні ланцюги поставок: мінімізація надлишкових потоків, створення інструментів для спрощення глобальних ланцюгів поставок
- Глобальна логістична інфраструктура: створення інструментів об'єднання національних логістичних систем та глобальних інфраструктурних елементів у єдину систему
- Стандартизація логістичного сервісу, методів та підходів зокрема соціального та екологічного виміру

- Створення відкритої глобальної інформаційної логістичної системи: формування глобальної бази даних, структурні зміни елементів глобальної логістичної системи, нормативна й організаційна підтримка [25].

Висновки до розділу 1

Стала логістична мережа розглядається з різних поглядів, включаючи економічний, екологічний та соціальний аспекти. Вона враховує оптимальну локацію складів та дистрибуційних центрів, оптимізацію маршрутів доставки, використання різних видів транспорту (наприклад, автомобілів, поїздів, суден, літаків) з урахуванням витрат, часу та впливу на довкілля. Також вона ставить завдання зменшення витрат і забезпечення оптимального управління запасами.

Головною метою сталої логістичної мережі є створення довгостроково стійкої та конкурентоздатної системи, яка забезпечує надійну та ефективну поставку товарів або послуг, зменшення витрат, оптимізацію використання ресурсів та мінімізацію негативного впливу на довкілля.

Проблема моделювання сталої логістичної мережі підприємства залишається активним напрямом наукових досліджень. Хоча було досягнуто певних результатів і розроблено деякі моделі та методи, проте, існує багато викликів і допущень, які потребують подальшого дослідження. Наприклад, розробка більш гнучких та адаптивних моделей, які можуть враховувати змінні умови на ринку, поставки та вимоги споживачів. Крім того, потрібно розробити практичні інструменти та методика для впровадження цих моделей у реальну практику підприємств.

Невизначеність має значний вплив на ланцюги поставок. Вона виникає з непередбачуваних змін в зовнішньому середовищі, таких як зміни попиту, постачання, технологічні проблеми, політичні зміни і т.д. Ця невизначеність може призвести до збоїв у ланцюгах поставок, затримок, непередбачуваного збільшення вартості та загрози для підприємств.

У даному розділі описано вплив війни в Україні на глобальний ланцюг поставок, у тому числі зменшення обсягів виробництва та постачання товарів, зниження якості продукції та збільшення ризику затримок у доставці товарів.

РОЗДІЛ 2. ПІДХОДИ ДО МОДЕЛЮВАННЯ СТАЛОЇ ЛОГІСТИЧНОЇ МЕРЕЖІ

2.1 Методи моделювання сталої логістичної мережі

Існує кілька методів моделювання стійкої логістичної мережі, які дозволяють враховувати різноманітні ризики та збої в її роботі. Деякі з цих методів використовуються для визначення оптимального розташування та розподілу об'єктів в мережі, з урахуванням стохастичних параметрів. Інші методи орієнтовані на розробку стратегій управління ризиками та підвищення стійкості мережі до непередбачуваних подій.

Один з методів - це стохастичне програмування, яке використовує стохастичні моделі для моделювання різних стохастичних параметрів, таких як попит, вартість, доставка тощо. Цей метод дозволяє враховувати невизначеність та ризики в прийнятті рішень про розташування та розподіл об'єктів у мережі.

Нариклад, задача стохастичного програмування для оптимізації запасів на підприємстві за умови невизначеного попиту може бути сформульована наступним чином: нехай потрібно зробити запас з n товарів у кількості $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, на які є випадковий попит $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)$. Нестача одиниці j -го товару, де $j = 1, \dots, n$, карається штрафом c_j , а витрати на зберігання одиниці відповідної продукції, яку не вдалося збути, задаються вектором $d = (d_1, d_2, \dots, d_n)$. Економіко математична модель цієї задачі може бути представлена у наступному вигляді:

$$f(x, \omega) = \sum_{j=1}^n \{c_j \max(0, \omega_j x_j) + d_j \max(0, x_j \omega_j)\} \rightarrow \min$$

Для знаходження оптимального розв'язку даної задачі необхідно знайти функцію розподілу випадкової величини $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)$ [26].

Ще один метод - це імітаційне моделювання, яке використовує комп'ютерні моделі для створення віртуальної логістичної мережі та імітації різних сценаріїв та подій. Цей метод дозволяє оцінити вплив різних ризиків та

збоїв на продуктивність та ефективність мережі. Імітаційне моделювання логістичних процесів дозволяє дослідити, як система реагує на зміни умов роботи, вивчити процес та напрям руху моделі, щоб визначити перспективи розвитку підприємства.

AnyLogic був першим середовищем моделювання на основі агентів, оскільки його моделі мали ієрархічну структуру, що складалася з взаємодіючих активних об'єктів. Для побудови ієрархічних моделей об'єктно-орієнтованим чином в AnyLogic використовуються структурні схеми UML-RT, а також гібридні стани для специфікації поведінки об'єкта [27].

Імітаційне моделювання є одним з методів математичного моделювання, використовуваним для об'єктів, для яких відсутні аналітичні моделі або методи їх розв'язання. У таких випадках математичну модель замінюють імітатором або імітаційною моделлю. Імітаційна модель, у вузькому значенні, є логіко-математичним описом об'єкта, який можна використовувати для комп'ютерного експериментування з метою проектування, аналізу та оцінки його функціонування. [28, с. 861–867].

Метод Монте-Карло, який відноситься до імітаційного моделювання детально описаний у наступній частині даного розділу, оскільки він безпосередньо використовується у практичній частині даної роботи.

Окрім того, в логістичних процесах використовуються такі методи оптимізації, як лінійне та динамічне програмування, для визначення оптимальних стратегій розташування, розподілу ресурсів та управління збоями у логістичній мережі. Ці методи дозволяють знайти найбільш ефективні рішення при різних умовах та обмеженнях.

Для широкого спектра оптимізаційних задач можна використовувати спеціальний рекурентний підхід. Згідно з цим підходом, вихідна задача розбивається на окремі простіші оптимізаційні задачі, які вкладені одна в одну. Послідовне розв'язування цих задач ґрунтується на вже знайдених розв'язках попередніх задач і, у кінцевому підсумку, призводить до знаходження

розв'язку вихідної задачі. Цей підхід і відповідні методи і задачі отримали назву "динамічного програмування" [29].

Використання традиційних лінійних моделей програмування не відповідає всім вимогам ринкового середовища. Аналіз таких моделей викликає сумніви щодо їх адекватності в багатьох реальних ситуаціях. Ці моделі не враховують такі фактори, як ефективність збільшення операцій в багатомоделювальних моделях, вплив обсягу реалізації на ціну продукції і дохід, а також вплив обсягу виробництва на собівартість. Тому, для найточнішого розв'язання задачі формування оптимальної виробничої програми, введення нелінійності є необхідною умовою. Більш того, сучасні технічні засоби здатні ефективно вирішувати нелінійні задачі практично будь-якої складності [30].

Методи моделювання стійкої логістичної мережі також включають аналіз чутливості, який дозволяє визначити, як зміна вхідних параметрів впливає на вихідні результати. Це допомагає ідентифікувати критичні фактори та виробляти ефективні стратегії управління ризиками.

Паралельно з цим, аналіз імовірності та статистичні методи використовуються для визначення імовірності виникнення різних ризикових ситуацій та оцінки їх впливу на логістичну мережу. Це дозволяє розробити стратегії резервування ресурсів, забезпечення надійності та підвищення стійкості мережі до різних подій.

Усі ці методи допомагають управляти ризиками та збоями у логістичній мережі, забезпечуючи сталість та надійність її функціонування. Врахування різних ризикових факторів і використання адекватних моделей дозволяють забезпечити ефективне планування, оптимізацію ресурсів та прийняття рішень для досягнення найкращих результатів в умовах невизначеності та змін [30].

2.2. Метод Монте-Карло для моделювання стійкої логістичної мережі в умовах невизначеності

Метод Монте-Карло є числовим алгоритмом, який використовує випадкові величини для моделювання і оцінки результатів. Він базується на використанні випадкових величин і статистичних методів для отримання результатів.

Імітаційне моделювання за допомогою метода Монте-Карло дозволяє поєднати аналіз чутливості та метод сценаріїв на основі теорії ймовірностей. У методі Монте-Карло генеруються випадкові значення для вхідних параметрів системи, а потім вони використовуються для виконання чисельних експериментів або симуляцій. Ці експерименти можуть бути повторені багато разів, щоб отримати статистично достовірні результати.

Метод Монте-Карло дозволяє моделювати складні системи, враховуючи невизначеність та стохастичність, та отримувати наближені результати, коли аналітичні рішення складні або неможливі. Він є потужним інструментом для розв'язання проблем, які вимагають статистичної обробки даних або великої кількості ітерацій.

На основі зібраних результатів за допомогою методу Монте-Карло можна оцінити розподіл результату, ризику, ймовірності або зробити статистичні висновки.

Основні кроки методу Монте-Карло:

1. Визначення проблеми: Формулювання проблеми або запитання, для якого необхідно отримати результат.
2. Моделювання: Побудова математичної моделі, яка описує проблему або систему. Ця модель повинна включати вхідні параметри та вихідні змінні.
3. Генерація випадкових значень: Генерація випадкових значень для вхідних параметрів, враховуючи їх розподіли або діапазони значень.
4. Виконання моделювання: Застосування випадкових значень до моделі та отримання вихідних результатів.

5. Повторення: Повторення кроків багато разів, згенерувавши нові випадкові значення при кожному повторенні.
6. Аналіз результатів: Аналіз отриманих результатів, включаючи середні значення, стандартне відхилення, інтервали надійності або інші важливі метрики.
7. Інтерпретація: Формулювання висновків на основі аналізу результатів і використання їх для прийняття рішень [31].

Метод Монте-Карло може бути застосований для моделювання стійкої логістичної мережі в умовах невизначеності. Він дозволяє враховувати невизначеність у вхідних параметрах та оцінювати різні сценарії для виявлення ризиків та можливостей. Це дозволяє покращити стійкість та ефективність логістичної мережі, а також забезпечити більш обґрунтоване прийняття рішень у невизначених умовах.

Важливо враховувати, що точність результатів методу Монте-Карло залежить від кількості повторень і від якості випадкових генерацій. Більше повторень дозволяє отримати більш точні результати, але також збільшує обчислювальну складність. Додатковою увагою до визначення параметрів і їх розподілу можна покращити якість моделювання.

Застосування методу Монте-Карло для моделювання стійкої логістичної мережі допоможе отримати більш реалістичне уявлення про поведінку мережі в умовах невизначеності та підготуватися до різних можливих сценаріїв.

Переваги методу Монте-Карло для моделювання стійкої логістичної мережі в умовах невизначеності:

1. Врахування невизначеності: Метод Монте-Карло дозволяє врахувати невизначеність, яка є невід'ємною частиною логістичних мереж. Він дозволяє моделювати різні можливі сценарії, включаючи випадкові зміни в попиті, поставках, транспортуванні тощо.
2. Оцінка ризиків та варіативності: За допомогою методу Монте-Карло можна оцінювати ризики та варіативність у логістичній мережі. Він дозволяє отримати розподіл можливих результатів та інформацію про

ймовірність виникнення певних подій, що допомагає управляти ризиками та приймати обґрунтовані рішення.

3. Адаптивність до змін: Метод Монте-Карло дозволяє легко адаптувати модель до змін у параметрах логістичної мережі. Якщо виникають нові умови або змінюються попит, поставки, вартість ресурсів тощо, модель може бути оновлена шляхом зміни вхідних параметрів.

Недоліки методу:

1. Великі обчислювальні витрати: Виконання багатьох повторень у методі Монте-Карло може вимагати значних обчислювальних ресурсів, особливо для складних та великих моделей логістичних мереж.
2. Статистична надійність: Якщо кількість повторень у методі Монте-Карло недостатня, результати можуть бути менш статистично надійними або мають велику дисперсію. Для отримання точних та достовірних результатів, необхідно виконати достатню кількість повторень.
3. Врахування взаємодії: Метод Монте-Карло не враховує взаємодію між різними компонентами логістичної мережі. Він розглядає їх незалежно, що може призвести до недооцінки впливу взаємодії та взаємозалежності між компонентами.
4. Залежність від моделі: Метод Монте-Карло базується на побудові моделі логістичної мережі. Якщо модель недостатньо точна або не відображає всіх важливих аспектів системи, результати можуть бути неточними або неправильними [19].

Незважаючи на недоліки, метод Монте-Карло є корисним інструментом для моделювання стійких логістичних мереж у вимірі невизначеності. Він дозволяє оцінювати ризики, аналізувати різні сценарії та здійснювати обґрунтовані рішення. З урахуванням його переваг і обмежень, метод Монте-Карло може бути використаний для покращення ефективності та стійкості логістичних мереж.

2.3. Оцінка ефективності стійких логістичних мереж

Стійкість ланцюга постачань, відома також як стійке управління ланцюгом постачання, відноситься до стабільності процесу постачання.

Сучасні компанії розглядають ефективний потік ланцюга постачання як чинник, що позитивно впливає на загальні показники компанії. Питання сталого розвитку на кожному етапі ланцюга постачань, включаючи постачальника, виробника, роздрібного продавця, кінцевого споживача та продукту, можна віднести до концепції стійкості ланцюга постачань (SCS) [7].

Підхід Парето вказує на досягнення оптимального рівня ефективності, де неможливо покращити один аспект без погіршення іншого. У контексті стійкого логістичного управління, це означає знаходження балансу між екологічними вимогами та економічною ефективністю.

Ефективність Парето дозволяє ідентифікувати компроміси, які можуть бути зроблені між захистом довкілля та зниженням витрат в логістичних мережах. Наприклад, можливо знайти оптимальний баланс між використанням екологічно чистих транспортних засобів та зменшенням витрат на паливо. Відтак, дослідження в галузі стійкого логістичного управління зосереджуються на розробці стратегій та методів, що допомагають знаходити цей баланс.

Це підходить до створення логістичних мереж, які мінімізують негативний вплив на довкілля, наприклад, шляхом використання енергоефективних транспортних засобів, оптимізації маршрутів доставки, використання вторинних матеріалів і переробки відходів. Ці рішення сприяють екологічній стійкості логістичної мережі.

Одночасно, ефективність Парето враховує витрати, пов'язані з реалізацією стійких практик. Це означає, що розроблені стратегії повинні бути економічно прийнятними і забезпечувати позитивний фінансовий результат. Досягнення ефективності Парето в стійких логістичних мережах означає забезпечення оптимального використання ресурсів та мінімізацію витрат без втрати якості довкілля.

Тестування, ремонт, переробка та виробництво енергії для продуктів, що вийшли з експлуатації, є основними діями, які впливають на бізнес і навколишнє середовище. Ці дії виконуються постачальниками, виробниками, споживачами, логістичними операторами та третіми сторонами, які є ключовими гравцями у цьому процесі [32]. Це зображено на рис. 2.1.

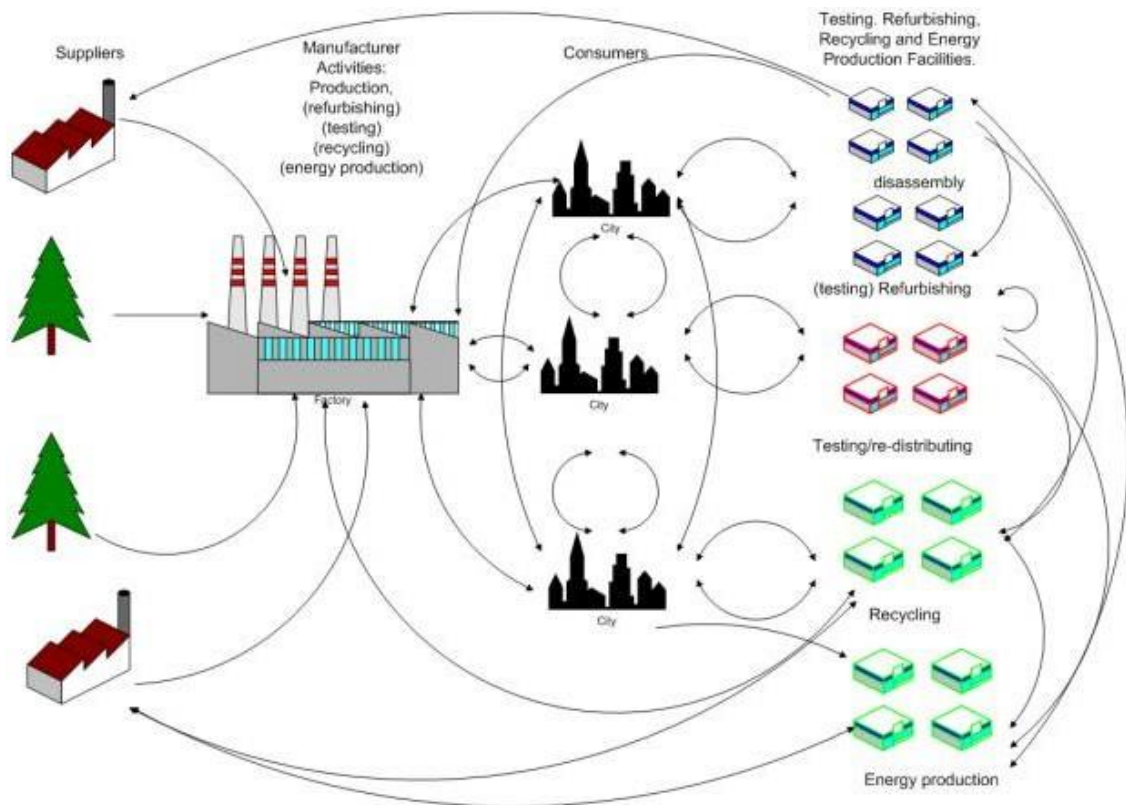


Рис. 2.1. Стала логістична мережа

Джерело: [32].

Багатокритеріальне програмування (MOP-multi-objective programming) - це методологія, яка використовується для розв'язання оптимізаційних задач з кількома цільовими функціями, що конфліктують між собою.

Багатокритеріальне програмування включає в себе оптимізаційну задачу, в якій потрібно знайти набір оптимальних рішень, що покращують одну цільову функцію без погіршення іншої. У випадку стійких логістичних мереж, ці цільові функції можуть бути пов'язані з навколишнім середовищем та витратами, такі як викиди CO₂, споживання енергії або загальні логістичні витрати.

МОР включає такі кроки:

1. Визначення цільових функцій: Спочатку потрібно визначити цільові функції, які відображають ефективність з точки зору навколишнього середовища та витрат. Ці функції можуть бути виражені вимірними показниками.
2. Формалізація оптимізаційної задачі: Задача формулюється як МОР, де ціль полягає в пошуку оптимальних рішень, які забезпечують покращення однієї цільової функції без погіршення іншої.
3. Використання методів МОР: Для розв'язання МОР застосовуються різні методи, такі як метод нев'язок, метод вагових коефіцієнтів, метод еволюційних алгоритмів тощо. Ці методи дозволяють знаходити компромісні рішення на основі різних критеріїв ефективності.
4. Генерація та оцінка альтернативних рішень: Застосовуються методи генерації альтернативних рішень, наприклад, за допомогою алгоритмів пошуку, перебору або стохастичних методів. Після генерації альтернатив проводиться їх оцінка за допомогою цільових функцій.
5. Побудова Парето-фронту: За допомогою методів МОР виконується побудова Парето-фронту, який представляє набір оптимальних рішень, що знаходяться на ненормованій границі. Ці альтернативи не можуть бути поліпшені в одному критерії без погіршення іншого.
6. Вибір оптимального рішення: З побудованих Парето-фронтів можна вибрати оптимальне рішення відповідно до конкретних вимог та обмежень. Вибір залежить від пріоритетів та цілей приймача рішень [33].

Робота Steuer і Piercy пропонує застосування МОР для оцінки ефективності стійких логістичних мереж з точки зору навколишнього середовища та витрат.

Математично модель може бути сформульована наступним чином:

$$\max\{c^1x = z_1\} \dots \max\{c^kx = z_k\}, \{x \in R^n \mid Ax \leq b, b \in R^m, x \geq 0\},$$

де k – кількість цілей.

Точка $\hat{x} \in S \subset R^n$ ефективна тоді і тільки тоді, коли не існує $x \in S$ такого, що $c^i x \geq c^i \hat{x}$ існує принаймні один $c^i x < c^i \hat{x}$. Ефективний набір або ефективний кордон – це сукупність усіх ефективних рішень [34].

У нашому формулюванні $c^1 x$ представляє вплив певного рішення на навколишнє середовище, а $c^2 x$ відповідна загальна вартість [32].

На основі цього можна виокремити наступні етапи оптимізації та оцінки логістичних мереж загалом:

1. Дослідження недомінуючих рішень логістичної мережі, частково або повністю. При повному дослідженні лінійних моделей можна побудувати опуклу кусково-лінійну границю. Для цілочисельних моделей границя, ймовірно, не буде опуклою і не може бути досліджена за допомогою стандартних методів DEA. Опуклі комбінації, хоча і не відповідають реальним мережам, все ще можуть бути використані для аналізу ефективності. При невичерпному дослідженні ефективних рішень, границя є верхньою межею реальної, а її близькість до теоретичної границі залежатиме від кількості досліджених недомінованих вершин.
2. Обчислення ефективності логістичної мережі. Поточна ситуація обмежена ефективною межею і представляє собою опуклу комбінацію ефективних точок або неповну ДМУ (недосяжність) за допомогою DEA. Також можна оцінити ефективність поточної ситуації за допомогою стандартних методів DEA для прийняття рішень щодо кінцевого використання та проблем розподілу, а також за допомогою нестандартних методів для рішень щодо кінцевого використання та проблем розподілу.
3. Оцінка ефективності обов'язкового законодавства шляхом визначення його здатності блокувати негативні рішення, які шкодять довкіллю, при цьому не погіршуючи запропоновані межі. Також оцінюється вплив ринкового законодавства. У деяких випадках можна поліпшити ефективну межу шляхом пропозиції економічно вигідних та екологічно безпечних рішень, а також блокування шкідливих для довкілля конфігурацій логістичних мереж за допомогою адекватного ринкового законодавства [32].

Висновки до розділу 2

Найпоширенішими методами моделювання сталої логістичної мережі є стохастичне програмування, імітаційне моделювання, лінійне та динамічне програмування, аналіз чутливості, аналіз імовірності та статистичні методи. Застосування цих методів дозволяє досягти оптимального планування, ефективного використання ресурсів, підвищення продуктивності та зниження витрат у сталій логістичній мережі.

Окреме місце посідає метод Монте-Карло, який можна використовувати для моделювання стійкої логістичної мережі в умовах невизначеності. Цей метод заснований на генерації випадкових значень для невідомих або невідповідно відомих факторів, що впливають на логістичну мережу, і виконанні багатьох повторних експериментів для отримання статистичної інформації. Він дозволяє враховувати невизначеність і отримати більш реалістичні результати, що допомагає покращити планування та управління стійкою логістичною мережею в умовах невизначеності.

Оцінка ефективності стійких логістичних мереж є важливим завданням, яке дозволяє визначити, наскільки добре вони функціонують та як ефективно вони задовольняють потреби клієнтів. У роботі наведено використання підходу Парето в стійких логістичних мережах для забезпечення оптимального використання ресурсів та мінімізацію витрат без втрати якості довкілля. Окрім того, наведено модель з використанням багатокритеріального програмування для оцінки ефективності стійких логістичних мереж з точки зору навколишнього середовища та витрат.

РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ СТАЛОЇ ЛОГІСТИЧНОЇ МЕРЕЖІ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

3.1 Постановка проблеми

Умови невизначеності і ризику вимагають оцінки логістики матеріальних потоків і технологічних операцій на всіх стадіях виробництва, від поставок сировини до реалізації готової продукції, та прийняття оптимальних рішень в оперативних умовах і довгострокових стратегіях підприємства.

Тому завдання підприємства в таких умовах зводиться до оцінки соціальних, економічних та екологічних факторів на всіх стадіях бізнес-процесів.

Стан складної логістичної системи в умовах невизначеності і ризику в більшості випадків непередбачуваний і не може бути прогнозований аналітично або шляхом логічного аналізу, оскільки він є результатом взаємодії матеріальних потоків і активних автономних елементів системи з навколишнім середовищем. Аналітичні методи прийняття рішень розглядають статичні стани окремих виробничих сфер, не враховуючи динаміки поведінки кожного активного елемента і його прямого впливу на інші елементи.

Оцінка і вибір стратегії виробничої діяльності в невизначеній ситуації поставок, виробництва і попиту на продукцію можлива за допомогою імітаційного моделювання поведінки кожного елемента виробничої системи. Тому для оптимізації управління запасами і матеріальними потоками в сферах поставок сировини, його переробки, зберігання і збуту готової продукції, важливо розробляти об'єктно-орієнтовані мультиагентні імітаційні моделі для аналізу стану і поведінки складних логістичних систем підприємства в умовах початкової стохастичної невизначеності виробничих і маркетингових ситуацій [35].

Мета практичної частини даної роботи полягає в розробці моделі сталої логістичної мережі для підприємства ТОВ "Сатіс ЛТД" з урахуванням невизначеності (такої як пандемія, війна та інші фактори).

Основними напрямками діяльності компанії є технічне та матеріальне забезпечення у клейових технологіях на ринок виробництва та ремонту громадського, вантажного, спеціального, залізничного, водного видів транспорту та на ринок будівництва у сегментах монтажу вентильованих фасадів, виробництва та установки сендвіч та СІП панелей, структурного скління. [36].

Поставленої мети можна досягти, визначивши оптимальні розподільчі центри (склади), розташування офісів та постачальників, рівні запасів і найкоротші маршрути доставки на кожен період. При проектуванні логістичної мережі будуть враховані три аспекти сталості: економічний, екологічний і соціальний.

Для вирішення цієї проблеми буде використано метод Монте-Карло, який дозволить провести стохастичне моделювання та отримати статистичні результати. Для реалізації моделі використаємо мову програмування Python (та середовище RStudio). Мова Python є потужним інструментом для реалізації цієї моделі. Ми можемо використати різні бібліотеки, наприклад, NumPy для генерації випадкових чисел та обчислень, Pandas для обробки та аналізу даних, і Matplotlib для візуалізації результатів.

Після отримання результатів моделювання і проведення аналізу, ми можемо зробити декілька висновків та рекомендацій:

1. Оптимальна кількість складських приміщень: Модель дозволить визначити оптимальну кількість складських приміщень для ТОВ "Сатіс ЛТД". Це може включати рішення про створення нових складів або реструктуризацію існуючих. З метою зниження витрат на транспортування та покращення обслуговування клієнтів, можуть бути розглянуті різні варіанти кількості складських приміщень.

2. Розташування складських приміщень: Модель також допоможе визначити оптимальне розташування складських приміщень. Враховуючи фактори, такі як географічне розташування клієнтів, вартість транспортування та доступність постачальників, можна знайти найбільш стратегічні місця для розташування складів.

3. Витрати на транспортування: Модель дозволить нам оцінити витрати на транспортування для різних варіантів розташування складських приміщень. Це дозволить нам знайти оптимальну логістичну мережу, яка зменшить витрати на транспортування та забезпечить ефективну поставку товарів.

4. Ефективність постачання: Аналіз результатів моделювання також допоможе визначити ефективність постачання в різних варіантах логістичної мережі. Це може включати оцінку часу доставки, частоти поставок та відповідності попиту.

5. Вигоди для клієнтів: Оптимізація логістичної мережі може позитивно вплинути на обслуговування клієнтів. Завдяки оптимальному розташуванню складських приміщень, можна скоротити час доставки замовлень та забезпечити їх більш точну та швидку обробку. Це покращить задоволеність клієнтів та сприятиме збільшенню лояльності до бренду.

6. Ризики та резервування: Модель може допомогти оцінити можливі ризики та розрахувати необхідний запас товарів на різних складах. Це дозволить забезпечити надійне постачання товарів навіть у випадку затримок або проблем з одним з постачальників.

Аналіз результатів моделювання та врахування цих рекомендацій допоможуть ТОВ "Сатіс ЛТД" оптимізувати свою логістичну мережу, знизити витрати та покращити ефективність постачання. Використання мови програмування Python та методу Монте-Карло дасть можливість провести стохастичне моделювання та знайти оптимальне рішення для компанії.

3.2 Математичний опис проблеми моделювання логістичної мережі

Проблему моделювання сталої логістичної мережі підприємства ТОВ "Сатіс ЛТД" можна математично описати наступним чином:

1. Позначення:

- N : Кількість регіонів, де присутня компанія "Сатіс ЛТД".
- M : Кількість можливих варіантів розташування складських приміщень.
- D : Матриця розміром $N \times M$, що вказує відстань від кожного регіону до

кожного потенційного складу.

- C : Матриця розміром $N \times M$, що вказує вартість транспортування одиниці товару з кожного регіону до кожного потенційного складу.

- D_i : Попит на адгезивні матеріали у регіоні i .
- Q_j : Вмістимість складу j .

2. Цільова функція:

Метою є мінімізація загальних витрат на логістику, яка складається з двох компонент:

- Витрати на транспортування: $\text{Транспортування} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M C_{ij} \cdot D_i$
Сума витрат на транспортування товарів з кожного регіону до кожного складу.

- Витрати на утримання складів = $\sum_{j=1}^M U_j \cdot Q_j$: Сума витрат на утримання складів, що залежить від вмістимості складів та використання їх потенціалу, де U_j позначає витрати на утримання одного складу j .

Отже, загальна цільова функція для оптимізації логістичної мережі буде:

$$f(x) = \text{Транспортування} + \text{Утримання} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M C_{ij} \cdot D_i + \sum_{j=1}^M U_j \cdot Q_j$$

3. Обмеження:

- Кількість товару, який може бути перевезений з кожного регіону до кожного складу, не може перевищувати вмістимість складу: $\sum_{i=1}^N C_{ij} \cdot D_i \leq Q_j$ для кожного $j = 1, 2, \dots, M$.

- Кількість товару, який може бути перевезений з кожного регіону, повинна задовольняти попит в цьому регіоні $\sum_{j=1}^M D_i \leq D_i, \forall i=1,2,\dots,N$,

де $\sum_{j=1}^M D_i$ - сума кількостей товару, які можуть бути перевезені з регіону i до всіх складів;

D_i - попит на товар у регіоні i .

• Змінні розташування складів повинні бути булевими (0 або 1), оскільки кожен регіон може мати лише один склад: $x_{ij} \in \{0,1\}, \forall i=1,2,\dots,N, \forall j=1,2,\dots,M$,

де x_{ij} - змінна, що вказує, чи регіон i має склад в місці розташування j .

• Логічне обмеження, що визначає, що кожен регіон може бути обслугований лише одним складом: $\sum_{j=1}^M x_{ij}=1, \forall i=1,2,\dots,N$,

де $\sum_{j=1}^M x_{ij}$ - сума змінних розташування складу для регіону i .

Ця сума вказує, скільки складів обслуговують регіон i .

Таким чином, проблему можна сформулювати як задачу лінійного програмування з метою мінімізації цільової функції при обмеженнях на обсяг перевезення товару, задоволення попиту та розташування складів. Для розв'язання такої задачі можна використовувати бібліотеки та інструменти мови Python, такі як PuLP або SciPy.

Продовжуючи математичний опис проблеми, додамо також обмеження щодо розміщення товарів на складах. Припустимо, що у нас є матриця T розміром $N \times M$,

де T_{ij} позначає кількість товару, розміщеного на складі j для регіону i .

4. Обмеження щодо розміщення товарів:

• Кількість товару, розміщеного на кожному складі, не може перевищувати його вмістимість: $\sum_{i=1}^N T_{ij} \leq Q_j, \forall j=1,2,\dots,M$.

• Кількість товару, розміщеного на кожному складі, не може перевищувати загальну кількість товару, що перевозиться з кожного регіону:

$$\sum_{j=1}^M T_{ij} \leq D_i, \forall i=1,2,\dots,N.$$

• Змінні розміщення товарів на складах повинні бути невід'ємними: $T_{ij} \geq 0, \forall i=1,2,\dots,N, \forall j=1,2,\dots,M$

5. Остаточна цільова функція:

Остаточна цільова функція для оптимізації логістичної мережі буде складатися з:

$$f(x) = \text{Транспортування} + \text{Утримання} + \text{Розміщення товарів}$$

Цей математичний опис проблеми моделювання логістичної мережі можна використовувати для розробки та реалізації алгоритму, використовуючи мову програмування Python та метод Монте-Карло для знаходження оптимального розв'язку.

3.3 Моделювання логістичної мережі компанії ТОВ «Сатіс ЛТД»

Приклад коду на мові програмування Python, який використовує метод Монте-Карло для знаходження оптимального розв'язку задачі логістичної мережі див. у Додатку А.

У цьому коді ми спочатку визначаємо вхідні дані, такі як матриці відстаней (D) та вартостей транспортування (C), а також вектор ємностей складів (Q). Потім ми визначаємо кількість ітерацій для методу Монте-Карло.

Варто зазначити, що під кількістю регіонів мається на увазі кількість областей, у яких працює компанія Сатіс (м. Київ, Київська область, Львівська та Дніпропетровська) [36]. При цьому кількість потенційних складів= 9 (2 у Києві, 3 у Київській області, 2 у Львові та 2 у Дніпрі), вмістимість яких наведена у табл.3.1:

Табл. 3.1

Вмістимість потенційних складів (у м. кв.)

Склад	Склад	Склад	Склад	Склад	Склад	Склад	Склад	Склад
1	2	3	4	5	6	7	8	9
185	200	200	250	250	150	150	120	150

Джерело: Складено автором на основі конфіденційної інформації.

У табл.3.2 наведено матрицю відстаней від області (місцезнаходження офісу) до складів

Табл. 3.2

Відстань від кожного регіону до кожного потенційного складу (у км)

	Склад	Склад	Склад	Склад	Склад	Склад	Склад	Склад	Склад
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
м. Київ	3	13	46	50	63	525	528	400	450
Київська область	48	35	15	20	25	550	580	425	380
Львівська область	550	530	585	600	580	45	30	940	960
Дніпропетровська область	440	450	425	430	450	930	965	15	30

Джерело: Складено автором на основі конфіденційної інформації.

Витрати на транспортування (у грн.)

	Склад 1	Склад 2	Склад 3	Склад 4	Склад 5	Склад 6	Склад 7	Склад 8	Склад 9
м. Київ	20,67	89,57	316,94	344,5	434,07	3617,25	3637,92	2756	3100,5
Київська область	330,72	241,15	103,35	137,8	172,25	3789,5	3996,2	2928,25	2618,2
Львівська область	3789,5	3651,7	4030,65	4134	3996,2	310,05	206,7	6476,6	6614,4
Дніпропетровська область	3031,6	3100,5	2928,25	2962,7	3100,5	6407,7	6648,85	103,35	206,7

Джерело: Складено автором на основі конфіденційної інформації.

У функції `monte_carlo_simulation` ми виконуємо вказану кількість ітерацій. На кожній ітерації ми генеруємо випадкове рішення, використовуючи булеву матрицю розташування складів. Потім розраховуємо вартість цього рішення, обчислюючи витрати на транспортування та утримання складів. Якщо поточна вартість є найкращою, ми оновлюємо найкраще рішення та вартість.

У головній частині коду ми викликаємо функцію `monte_carlo_simulation` і передаємо їй вхідні дані та кількість ітерацій. Потім виводимо найкраще рішення та вартість на екран.

Цей код здатен знайти наближений оптимальний розв'язок задачі логістичної мережі, використовуючи метод Монте-Карло. Результат може варіюватися в залежності від кількості ітерацій та випадкових генерацій рішень. Для точніших результатів можна збільшити кількість ітерацій або використовувати інші методи оптимізації, такі як імітація відпалу або генетичні алгоритми.

В результаті виконання коду будуть виведені найкращий розподіл товарів між регіонами і складами (матриця `best_solution`) та його вартість (значення `best_cost`). Значення `best_solution` буде представлено у вигляді матриці з нулями і одиницями, де одиниця позначає вибраний склад для кожного регіону. Значення `best_cost` відобразить загальну вартість розподілу

товарів, яка включає витрати на транспортування та утримання товарів на складах.

У коді, який був наведений раніше, ми використовували метод Монте-Карло для пошуку найкращого рішення задачі логістичної мережі. Однак, метод Монте-Карло є стохастичним і його точність залежить від кількості ітерацій. Якщо потрібні більш точні результати, можна використовувати інші методи оптимізації, такі як лінійне програмування або генетичні алгоритми.

Приклад коду, який використовує бібліотеку PuLP для формулювання та розв'язання задачі лінійного програмування для пошуку оптимальної логістичної мережі наведений в додатку Б.

Цей код використовує бібліотеку PuLP для формулювання задачі лінійного програмування. Ми створюємо змінні, об'єктивну функцію та обмеження, а потім розв'язуємо задачу за допомогою методу solve (). Після розв'язку задачі ми виводимо значення об'єктивної функції та найкраще рішення.

У цьому коді використовується більш точний метод розв'язання (метод симплексу) замість методу Монте-Карло. Результати, отримані з використанням лінійного програмування, будуть оптимальними.

При виконанні коду з вище наведеними даними, виведені результати будуть наступними:

Objective function value: 293986.0

Solution:

Region 1 is served by Warehouse 3

Region 2 is served by Warehouse 7

Region 3 is served by Warehouse 6

Region 4 is served by Warehouse 9

Це означає, що оптимальне рішення буде, коли регіон 1 обслуговується складом 3, регіон 2 складом 7, регіон 3 складом 6, а регіон 4 складом 9. Значення цільової функції вказує на загальну вартість, пов'язану з цим розподілом, яка в даному випадку становить $f(x)=293\,986$ грн. Цей результат є

оптимальним для даної задачі і забезпечує найменшу вартість логістичної мережі з урахуванням відстаней та вартості транспортування.

Оцінка ефективності ланцюга поставок здебільшого базується на економічних показниках, тому необхідно врахувати екологічний та соціальний аспекти також.

Для рахування критерію сталості для даної логістичної мережі можна врахувати наступне:

Для обчислення викидів транспорту за сценарієм s доцільно спиратися на формулу, запропоновану С. Паном [37]. Ця формула зазвичай використовується в науковій літературі для врахування масовості потоків у оптимізації. Викиди можна розрахувати наступним чином:

$$ETs = ef \left[\sum_{t \in T} \sum_{d \in D, j \in J} d_{d,j} (T_{sE} x_{d,j}^{t,s} + (T_{\underline{s}} - T_{sE}) \frac{Q1_{j,d}^{t,s}}{Qs}) \right. \\ \left. + \sum_{t \in T} \sum_{(i,j) \in A_2} d_{i,j} (T_{vE} x_{i,j}^{t,s} + (T_{vL} - T_{vE}) \frac{f_{i,j}^{t,s}}{Qv}) \right]$$

де: ETs – викиди від транспортної діяльності;

J - множина постачальників;

D - множина дистрибуційних центрів;

A_1, A_2 - множина дуг забору і доставки маршрутів;

T - множина періодів планування;

S - множина можливих сценаріїв;

Qs - максимальна вантажопідйомність напівпричепа;

Qv - вантажопідйомність транспортного засобу;

T_{sE} - споживання палива порожнього напівпричепа (л/км) ;

T_{sL} - споживання палива повністю завантаженого напівпричепа (л/км) ;

T_{vE} - споживання палива порожнього транспортного засобу (л/км) ;

T_{vL} - споживання палива повністю завантаженого транспортного засобу (л/км) ;

$d_{i,j}$ - відстань між двома вузлами i та j , $i, j \in J \cup D \cup I$;

$x_{i,j}^{t,s}$ - бінарна змінна, дорівнює 1, якщо дуга (i; j) проходить транспортним засобом/напівпричепом в період t за сценарію s; 0, в іншому випадку;

$Q1_{j,d}^{t,s}$ - кількість, яку постачальник j доставляє в центр d в період t за сценарію s;

$f_{i,j}^{t,s}$ - кількість вантажу, який перевозиться напівпричепом/транспортним засобом на дузі (i; j), якщо він пересувається безпосередньо з вузла i до вузла j в період t за сценарію s, (i; j) \in A2.

Окрім цього, можна виокремити викиди, викликані розподільчими центрами:

$$EF = e_c \sum_d y_d EC_d,$$

де:

e_c - коефіцієнт викиду CO2 на одиницю споживання енергії (кг CO2/кВтгод);

y_d - бінарна змінна, дорівнює 1, якщо дистрибуційний центр d відкритий; 0, в іншому випадку.

У наявній літературі досить мало уваги приділялося моделюванню соціальних аспектів сталих логістичних мереж. Одним зі шляхів визначення соціального впливу є визначення рівня аварійності, що стосується транспортної діяльності, відповідно до [38]. Частота аварій за сценарієм s обчислюється наступним рівнянням:

$$A_s = \frac{A_{ref}}{d_{ref}} \sum_{t \in T} \sum_{(i,j) \in A_1 \cup A_2} d_{i,j} x_{d,j}^{t,s},$$

де A_{ref} позначає частоту аварій для контрольної відстані d_{ref} .

Врахування вищенаведених аспектів сталості дозволить врахувати соціальний, економічний та екологічний вимір логістичної мережі компанії.

Висновки до розділу 3

У практичній частині даної роботи запропоновано модель логістичної мережі для компанії ТОВ "Сатіс ЛТД" з урахуванням невизначеності за допомогою методу Монте-Карло. Розроблено модель задачі лінійного програмування для пошуку оптимальної логістичної мережі компанії. Для досягнення цієї мети визначено оптимальне розміщення нових розподільчих центрів (складів).

Наведено шляхи вдосконалення моделі для проектування логістичної мережі з урахуванням трьох аспектів стійкості: включити викиди від транспорту, викиди, викликані розподільчими центрами, а також частоту аварій.

Даний розділ несе практичну цінність для подальших досліджень і може бути використаний за їх основу.

ВИСНОВКИ

У даній роботі було досліджено теоретичну базу, а також практичні аспекти моделювання сталої логістичної мережі, тому можна зробити наступні висновки.

Стійке управління ланцюгами поставок (SSCM) передбачає взаємодію та співробітництво організації з метою досягнення соціальних, екологічних та економічних цілей. Це досягається шляхом систематичної координації бізнес-процесів між організаціями з метою поліпшення довгострокових економічних показників окремої компанії та її ланцюга поставок.

Стала логістична мережа розглядається з різних аспектів, включаючи економічний, екологічний та соціальний. Вона враховує оптимальне розташування складів та дистрибуційних центрів, оптимізацію маршрутів доставки, використання різних видів транспорту з урахуванням вартості, часу та впливу на навколишнє середовище. Також її основною метою є зниження втрат і забезпечення оптимального управління запасами.

Створення довгостроково стійкої та конкурентоздатної сталої логістичної мережі є головною метою, яка забезпечує надійну та ефективну поставку товарів або послуг, зниження витрат, оптимізацію ресурсів та мінімізацію негативного впливу на навколишнє середовище.

Моделювання сталої логістичної мережі підприємства є активним напрямом наукових досліджень. Хоча було досягнуто певних результатів і розроблено деякі моделі та методи, проте існує багато викликів і проблем, які потребують подальшого дослідження. Наприклад, розробка більш гнучких та адаптивних моделей, які можуть враховувати змінні умови на ринку, поставки та вимоги споживачів. Крім того, потрібно розробити практичні інструменти та методики для впровадження цих моделей у реальну практику підприємств.

Деякі з напрямків досліджень, які залишаються актуальними, включають:

- Розробка більш комплексних та реалістичних моделей: це охоплює врахування більш широкого спектру факторів, таких як соціальні

аспекти, ризики, залежності між елементами логістичної мережі, нестабільність ринку тощо.

- Використання нових технологій: такі як штучний інтелект, машинне навчання, оптимізація на основі даних та інші інноваційні підходи для розв'язання складних задач моделювання сталої логістичної мережі.
- Розширення масштабів: більшість досліджень на сьогоднішній день зосереджені на рівні окремих підприємств або локальних мереж. Продовження досліджень в напрямку моделювання більших масштабів, таких як регіональні або глобальні логістичні мережі, буде корисним для більш повного розуміння проблеми.
- Практична реалізація: впровадження розроблених моделей та методів у реальну практику підприємств і визначення їхньої ефективності та вигоди в реальних умовах.
- Урахування екологічних викликів: дослідження в області сталої логістичної мережі повинні активно враховувати екологічні аспекти, такі як зменшення викидів парникових газів, ефективне використання ресурсів, впровадження зелених технологій та альтернативних джерел енергії.
- Управління ризиками та нестабільністю: моделі мережі повинні бути пристосовані до управління ризиками, такими як зміни в умовах ринку, надзвичайні події або збої в логістичному ланцюжку. Розробка методів прогнозування та планування для мінімізації впливу таких ризиків є важливим завданням.
- Соціальна відповідальність: моделювання сталої логістичної мережі також повинно враховувати соціальні аспекти, такі як управління трудовими ресурсами, забезпечення справедливих умов праці, впровадження соціально відповідальних практик у ланцюжку постачання.
- Інтеграція з іншими областями: дослідження моделювання сталої логістичної мережі можуть бути зв'язані з іншими областями, такими як

інформаційні технології, електронна комерція, даних на основі прийняття рішень та інші. Інтеграція цих аспектів може забезпечити більш повну та ефективну модель логістичної мережі.

Безпосередній внесок автора:

У першому розділі вдосконалено теоретичну модель процесу злиття сталого розвитку і управління ланцюгами поставок з урахуванням сучасних світових викликів: пандемія Covid-19, війна в Україні.

Також було описано вплив війни в Україні, як прикладу невизначеності, на глобальний ланцюг поставок, у тому числі зменшення обсягів виробництва та постачання товарів, зниження якості продукції та збільшення ризику затримок у доставці товарів.

У другому розділі описано методи моделювання сталої логістичної мережі, таких як стохастичне програмування, імітаційне моделювання, лінійне та динамічне програмування, аналіз чутливості, аналіз імовірності та статистичні методи. Вони допомагають досягти оптимального планування, ефективного використання ресурсів, підвищення продуктивності та зниження витрат у сталій логістичній мережі.

Запропоновано використання методу Монте-Карло в моделюванні стійких логістичних процесах в умовах невизначеності, що дозволяє враховувати невизначеність та ризики і отримувати більш реалістичні результати, а отже сприяє поліпшенню планування та управління логістичними процесами.

У роботі наведено підхід Парето для досягнення оптимального використання ресурсів та мінімізації витрат без погіршення якості довкілля в стійких логістичних мережах. Крім того, описано модель, яка використовує багатокритеріальне програмування для оцінки ефективності стійких логістичних мереж з урахуванням аспектів навколишнього середовища та витрат.

У останньому розділі була розроблена модель логістичної мережі для компанії ТОВ "Сатіс ЛТД", яка враховує невизначеність, за допомогою методу

Монте-Карло. Також була створена модель лінійного програмування для знаходження оптимальної логістичної мережі компанії, включаючи оптимальне розміщення нових розподільчих центрів (складів).

Наведено пропозиції щодо вдосконалення моделі для проектування логістичної мережі з урахуванням трьох аспектів стійкості: викидів від транспорту, викидів, спричинених розподільчими центрами, а також частоти аварій. Цей розділ має практичне значення для подальших досліджень і може бути використаний як основа для них.

Отже, дана робота розширює українську літературу з тематики моделювання сталої логістики в умовах невизначеності, пропонує підхід до створення та вдосконалення такої моделі для компанії ТОВ «Сатіс ЛТД», а також робота може бути взята за основу для проведення подальших досліджень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Моделювання та інформаційні технології в економіці. Розділ 3.4: Сучасні технології управління сталим розвитком соціально-економічних систем: стратегічний підхід : монографія / за загальної ред. В.М. Соловйова. Черкаси : Брама-Україна, 2014. С. 363–383
2. C. R. Carter and D. S. Rogers, “A framework of sustainable supply chain management: moving toward new theory,” *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, vol. 38, no. 5, pp. 360–387, 2008
3. Seuring, S.; Müller, M. From a literature review to a conceptual framework for sustainable supply chainmanagement. *J. Clean. Prod.* 2008,16, 1699—1710.
4. Dekker, R.; Bloemhof, J.; Mallidis, I. Operations Research for green logistics – An overview of aspects, issues, contributions and challenges. *Eur. J. Oper. Res.* 2012,219, 671–679.
5. Шевченківська весна 2023. Повоєнне відновлення економіки України: проблеми та перспективи, матеріали Міжнародної науковопрактичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених / За заг. ред. Л.А. Анісімової: - К., Інтерсервіс, 2023. – Вип. XXI. – 392 с. URL: <https://econom.knu.ua/science/conferences/2023-2/>
6. Marcus Brandenburg, Tim Gruchmann, Nelly Oelze. Sustainable Supply Chain Management—A Conceptual Framework and Future Sustainable Supply Chain Management 2019,11, 7239; doi:10.3390/su11247239 URL: https://www.researchgate.net/publication/337987407_Sustainable_Supply_Chain_Management__A_Conceptual_Framework_and_Future_Research_Perspectives
7. Mohd Faiz Mokhtar et al Social and Economic Concern of Supply Chain Sustainability (SCS) 2016 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 160 01207. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/160/1/012073/pdf>
8. Sustainable Logistics Network Modeling for Enterprise Supply Chain Lan Zhu and Dawei Hu
URL: https://www.researchgate.net/publication/313816793_Sustainable_Logistics_Network_Modeling_for_Enterprise_Supply_Chain
9. P. Ahi and C. Searcy, “A stochastic approach for sustainability analysis under the green economics paradigm,” *Stochastic Environmental Research & Risk Assessment*, vol. 28, no. 7, pp. 1743–1753, 2014.
10. F. Wang, X. Lai, and N. Shi, “A multi-objective optimization for green supply chain network design,” *Decision Support Systems*, vol. 51, no. 2, pp. 262–269, 2011.
11. A. Chaabane, A. Ramudhin, and M. Paquet, “Design of sustainable supply chains under the emission trading scheme,” *International Journal of Production Economics*, vol. 135, no. 1, pp. 37–49, 2012

12. M. S. Pishvaei, J. Razmi, and S. A. Torabi, "An accelerated Benders decomposition algorithm for sustainable supply chain network design under uncertainty: a case study of medical needle and syringe supply chain," *Transportation Research Part E: Logistics & Transportation Review*, vol. 67, pp. 14–38, 2014
13. S. G. Tayyar, D. Roy, and S. F. Ghaderi, "Economic, environmental and social responsible supply chain design using differential evolution multi objective algorithm," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM '13)*, pp. 1617–1621, IEEE, Bangkok, Thailand, December 2013.
14. Z. Chen and S. Andresen, "A multiobjective optimization model of production-sourcing for sustainable supply chain with consideration of social, environmental, and economic factors," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2014, Article ID 616107, 11 pages, 2014
15. L. Xu and Y. Q. Teng, "Sustainable supply chain network design based on social responsibility," *Logistics Technology*, vol. 34, no. 21, 2015.
16. Klibi, W.; Martel, A. Modeling approaches for the design of resilient supply networks under disruptions. *Int. J. Prod. Econ.* 2012, 135, 882–898.
17. Qin, X.; Liu, X.; Tang, L. A two-stage stochastic mixed-integer program for the capacitated logistics fortification planning under accidental disruptions. *Comput. Ind. Eng.* 2013, 65, 614–623.
18. Ivanov, D.; Pavlov, A.; Dolgui, A.; Pavlov, D.; Sokolov, B. Disruption-driven supply chain (re)-planning and performance impact assessment with consideration of pro-active and recovery policies. *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.* 2016, 90, 7–24.
19. Designing a Resilient and Sustainable Logistics Network under Epidemic Disruptions and Demand Uncertainty URL: https://www.researchgate.net/publication/357219702_Designing_a_Resilient_and_Sustainable_Logistics_Network_under_Epidemic_Disruptions_and_Demand_Uncertainty
20. Post-war Reconstruction: Case Studies URL: <https://kpmg.com/ua/uk/home/insights/2022/12/post-war-reconstruction-of-economy-case-studies.html>
21. Торгівля-2022: третину імпорту товарів в Україну привезли міжнародні автомобільні перевізники [Електронний ресурс] // Міністерство розвитку громад, територій та інфраструктури України: URL: <https://mtu.gov.ua/news/33944.html>
22. Україна в 2022 році експортувала майже 100 млн тон товарів [Електронний ресурс] // Міністерство економіки України: URL: <https://www.kmu.gov.ua/news/minekonomiky-ukraina-v-2022-rotsi-eksportovala-maizhe-100-mln-tonn-tovariv>

23. Динаміка цін на нафту URL:
<https://tradingeconomics.com/commodity/crude-oil>
24. Key figures on the European food chain 2022 edition URL:
<https://ec.europa.eu/eurostat/documents/15216629/15559935/KS-FK-22-001-EN-N.pdf/1cb9d295-6868-70e3-0319-4725040cfdb8?version=3.0&t=1670599965263> .
25. Сивак Р.Б. Глобальна логістика у забезпеченні сталого розвитку світового господарства URL: <http://www.vestnik-ekonom.mgu.od.ua/journal/2015/13-2015/07.pdf>
26. Д.С. Яшкін Методи оптимізації в управлінні логістичними ризиками промислових підприємств URL:
<http://dspace.op.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/1903/1/52.pdf>
27. Використання імітаційних моделей в управлінні логістичними процесами на підприємстві Солодучін С.В. URL:
<https://chmnu.edu.ua/wp-content/uploads/2019/06/Ekonomika-i-suspilstvo-18-2018.pdf#page=1096>
28. Мельничук Д.А. Структура комплексной имитационной модели цепи поставок / Д.А. Мельничук // Економіка: проблеми теорії та практики: Зб. наук. праць. – Дніпропетровськ: ДНУ, 2008. С. 861–867.
29. В.Р. Кігель Оптимізація логістичних рішень Навчальний посібник URL:
<https://library.krok.edu.ua/media/library/category/navchalni-posibniki/kigel-0018.pdf>
30. Корпоративні інформаційні системи для студентів спеціальності НМетАУ, 2012. – 52 с. URL: <https://posibniki.com.ua/post-metodi-i-modeli-upravlinnya-logistichnimi-procesami>
31. Г. І. Купалова Теорія економічного аналізу Начало формы URL:
https://pidru4niki.com/11510409/ekonomika/metod_monte-karlo
32. Designing and Evaluating Sustainable Logistics Networks J. Quariguasi Frota Neto, J.M. Bloemhof-Ruwaard, J.A.E.E. van Nunen and H.W.G.M. van Heck URL:
https://www.researchgate.net/publication/4913520_Designing_and_evaluating_sustainable_logistics_networks
33. В. Теслюк Методи багатокритеріальної оптимізації URL:
<https://foundry.kpi.ua/wp-content/uploads/2020/05/teslyuk-vm-metody-bagatokryterialnoyi-optymizacziyi.pdf>
34. E. Steuer and C. A. Piercy. A regression study of the number of efficient extreme points in multiple objective linear programming. European Journal of Operational Research, 162(2):484–496, 2005.
35. Самостян В. Р. Ефективне використання підходів для імітаційного моделювання логістичних процесів URL:
<https://eforum.lntu.edu.ua/index.php/jurnal-mbf/article/download/400/390/>
36. Офіційний сайт ТОВ «Сатіс ЛТД» . URL: <http://satis.com.ua/index.php>

37. Pan, S.; Ballot, E.; Fontane, F.; Hakimi, D. Environmental and economic issues arising from the pooling of SMEs' supply chains: Case study of the food industry in western France. *Flex. Serv. Manuf. J.* 2014, 26, 92–118.
38. Aloui, A.; Hamani, N.; Delahoche, L. An integrated optimization approach using a collaborative strategy for sustainable cities freight transportation: A Case study. *Sustain. Cities Soc.* 2021, 75, 103331

ДОДАТКИ

Додаток А

Програмна реалізація логістичної мережі методом Монте-Карло

```
import numpy as np
import random

def monte_carlo_simulation(D, C, Q, num_iterations):
    num_regions, num_warehouses = D.shape

    best_cost = float('inf')
    best_solution = None

    for _ in range(num_iterations):
        # Generate a random solution
        solution = np.zeros((num_regions, num_warehouses), dtype=int)
        for i in range(num_regions):
            j = random.randint(0, num_warehouses-1)
            solution[i, j] = 1

        # Calculate the cost of the solution
        transport_cost = np.sum(np.dot(D, C) * solution)
        holding_cost = np.sum(np.maximum(np.dot(solution, Q) - D, 0))
        total_cost = transport_cost + holding_cost

        # Update the best solution if the cost is lower
        if total_cost < best_cost:
            best_cost = total_cost
            best_solution = solution.copy()

    return best_solution, best_cost

N = 4 # Number of regions
M = 9 # Number of warehouses

# Distance matrix (D)
D = np.array([[3, 13, 46, 50, 63, 525, 528, 400, 450],
              [48, 35, 15, 20, 25, 550, 580, 425, 380],
              [550, 530, 585, 600, 580, 45, 30, 940, 960],
              [440, 450, 425, 430, 450, 930, 965, 15, 30]])

# Transportation cost matrix (C)
C = np.array
```

```
([[21, 90, 317, 345, 434, 3617, 3638, 2756, 3101],  
 [331, 241, 103, 138, 172, 3790, 3996, 2928, 2618],  
 [3790, 3652, 4031, 4134, 3996, 310, 207, 6477, 6614],  
 [3032, 3101, 2928, 2963, 3101, 6408, 6649, 103, 207]])  
  
# Warehouse capacity (Q)  
Q = np.array([85, 200, 200, 250, 250, 150, 150, 120, 150])  
  
# Number of Monte Carlo iterations  
num_iterations = 1000  
  
# Run Monte Carlo simulation  
best_solution, best_cost = monte_carlo_simulation(D, C, Q, num_iterations)  
  
print("Best solution:")  
print(best_solution)  
print("Best cost:", best_cost)
```

**Розв'язання задачі лінійного програмування для пошуку
оптимальної логістичної мережі**

```
from pulp import
```

```
N = 4 # Number of regions
```

```
M = 9 # Number of warehouses
```

```
# Distance matrix (D)
```

```
D = [[3, 13, 46, 50, 63, 525, 528, 400, 450],  
      [48, 35, 15, 20, 25, 550, 580, 425, 380],  
      [550, 530, 585, 600, 580, 45, 30, 940, 960],  
      [440, 450, 425, 430, 450, 930, 965, 15, 30]]
```

```
# Transportation cost matrix (C)
```

```
C = [[21, 90, 317, 345, 434, 3617, 3638, 2756, 3101],  
     [331, 241, 103, 138, 172, 3790, 3996, 2928, 2618],  
     [3790, 3652, 4031, 4134, 3996, 310, 207, 6477, 6614],  
     [3032, 3101, 2928, 2963, 3101, 6408, 6649, 103, 207]]
```

```
# Warehouse capacity (Q)
```

```
Q = [85, 200, 200, 250, 250, 150, 150, 120, 150]
```

```
# Create the LP problem
```

```
prob = LpProblem("LogisticsNetwork", LpMinimize)
```

```
# Variables
```

```
x = [[LpVariable(f"x_{i}_{j}", cat=LpBinary) for j in range(M)] for i in  
range(N)]
```

```
# Objective function
```

```
prob += lpSum([D[i][j] * C[i][j] * x[i][j] for i in range(N) for j in range(M)])
```

```
# Constraints
```

```
for i in range(N):
```

```
    prob += lpSum([x[i][j] for j in range(M)]) == 1
```

```
for j in range(M):
```

```
    prob += lpSum([D[i][j] * x[i][j] for i in range(N)]) <= Q[j]
```

```
# Solve the problem
```

```
prob.solve()
```

```
# Print the results
print("Objective function value:", value(prob.objective))
print("Solution:")
for i in range(N):
    for j in range(M):
        if value(x[i][j]) > 0.5:
            print(f"Region {i+1} is served by Warehouse {j+1}")
```