ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ ТА ТЕХНОЛОГІЙ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «Методи моделювання логістичних процесів для їх оптимізації»

на здобуття освітнього ступеня бакалавра
зі спеціальності 124 Системний аналіз
освітньо-професійної програми «Системний аналіз»

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

_____ Максим СТОРЧАК

(*підпис*)

Виконав: здобувач вищої освіти групи САД-41
Максим СТОРЧАК

Керівник к.ф.-м.н. Ровіл НАФЄЄВ
науковий ступінь, Ім'я, ПРИЗВІЩЕ
вчене звання

Рецензент _____
науковий ступінь, Ім'я, ПРИЗВІЩЕ
вчене звання

Київ – 2025

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Навчально-науковий інститут інформаційних технологій

Кафедра Інформаційних систем та технологій
Ступінь вищої освіти - «Бакалавр»
Спеціальність 124 Системний аналіз
Освітньо-професійна програма «Системний аналіз»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ІСТ
Каміла СТОРЧАК
"____" _____2025 року

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Сторчак Максим Сергійович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1.Тема кваліфікаційної роботи: Методи моделювання логістичних процесів для їх оптимізації

Керівник кваліфікаційної роботи Нафєєв Ровіл Касимович, к.ф.-м.н,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій від "24" 02 2025 року № 56

2.Строк подання кваліфікаційної роботи «30 травня» 2025 року

3. Вихідні дані до роботи: Методи моделювання логістичних систем для їх оптимізації, дослідження сучасних методів моделювання для створення логістичної моделі

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1.Актуальність методів моделювання логістичних процесів для їх оптимізації

2. Загальна опис методів моделювання логістичних систем

3. Дослідження методів моделювання логістичних систем

4. Розробка логістичної моделі «Оптимізація розподілу ресурсів у логістичній системі»

5. Перелік ілюстративного матеріалу: презентація, слайди

6. Дата видачі завдання «24» лютого 2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Збір інформації		
2	Аналіз сучасних методів моделювання логістичних систем		
3	Дослідження сучасних методів моделювання логістичних систем		
4	Проектування логістичної моделі «оптимізація розподілу ресурсів у логістичній системі»		
5	Підведення підсумків проведеного дослідження, написання висновку		
6	Підготовка та завершення дипломної роботи, перевірка, оформлення, написання висновків		

Студент _____ Максим СТОРЧАК

(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ Ровіл НАФЄЄВ

(підпис) (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Текстова частина кваліфікаційної роботи складається зі вступу, трьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел загальний обсяг роботи складає 54 сторінки, має 3 рисунків, 9 таблиць. Список літератури складає 30 джерел.

У кваліфікаційній роботі розглядаються сучасні підходи до моделювання логістичних процесів з метою підвищення їх оптимізації. Актуальність теми зумовлена стрімким ускладненням логістичних ланцюгів, забезпеченням зниження витрат, підвищення швидкості доставки та адаптації до змін зовнішнього середовища в умовах цифровізації та глобальної конкуренції. Об’єктом дослідження виступають логістичні процеси, пов’язані з постачанням, транспортуванням, складуванням, розподілом та інформаційним забезпеченням. Метод роботи є теоретичне обґрунтування та практичне застосування сучасних методів моделювання (математичних, імітаційних, комп’ютерних та гібридних) для оптимізації логістичних операцій, зниження витрат і підвищення якості обслуговування у ланцюгах постачання. У дослідженні використано аналіз і синтез для узагальнення теоретичних основ логістики, порівняльний аналіз для оцінки підходів до моделювання, математичне моделювання для формалізації логістичних задач, імітаційне моделювання для аналізу поведінки системи в динаміці, а також програмні засоби для побудови моделей і візуалізації результатів.

КЛЮЧОВІ СЛОВА : ЛОГІСТИЧНА СИСТЕМА, ЛОГІСТИЧНІ ПРОЦЕСИ, МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, ЛОГІСТИЧНІ СИСТЕМИ, ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, ОПТИМІЗАЦІЇЯ, АВТОМАТИЗАЦІЯ

ЗМІСТ

ВСТУП 8

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ МОДЕЛЮВАННЯ ЛОГІСТИЧНИХ СИСТЕМ 10

1.1.Огляд сучасних підходів для моделювання логістичних процесів 10

1.2.Використання математичних методів аналізу логістичних систем 15

РОЗДІЛ 2.ДОСЛІДЖЕННЯ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ МОДЕЛЮВАННЯ ЛОГІСТИЧНИХ СИСТЕМ 21

2.1.Роль імітаційного моделювання у вдосконаленні логістичних процесів .. 21

2.2.Використання аналітичних і числових методів для оптимізації логістичних маршрутів та розподілу ресурсів 34

РОЗДІЛ 3. ПРОЄКТУВАННЯ ЛОГІСТИЧНОЇ МОДЕЛІ «ОПТИМІЗАЦІЯ РОЗПОДІЛУ РЕСУРСІВ У ЛОГІСТИЧНІЙ СИСТЕМІ» 40

3.1.Етапи створення і впровадження власної логістичної моделі 40

3.2.Приклади практичного застосування моделі у реальних умовах 50

ВИСНОВКИ 60

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 62

ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ (ПРЕЗЕНТАЦІЯ) 65

ВСТУП

Актуальність дослідження методів моделювання логістичних процесів для їх оптимізації обумовлена зростаючою складністю сучасних логістичних систем, необхідністю зниження витрат, скорочення часу доставки, підвищення точності операцій та адаптації до змінних умов зовнішнього середовища. В умовах глобалізації, цифровізації та постійного вдосконалення технологій, підприємства змушені переглядати свої логістичні стратегії, впроваджувати інноваційні інструменти аналізу та прийняття рішень, які базуються на даних. Одним із ключових інструментів у цьому контексті є математичне та імітаційне моделювання, що дозволяє не лише описати логістичні процеси, але й виявити їх вузькі місця, протестувати альтернативні сценарії та передбачити результати управлінських рішень без ризику для реальних операцій.

Мета дослідження полягає у теоретичному обґрунтуванні та практичному застосуванні сучасних методів моделювання логістичних процесів з метою підвищення ефективності функціонування логістичних систем, зниження витрат, оптимізації ресурсного забезпечення та покращення якості обслуговування в ланцюгах постачання.

Завдання дослідження:

1. Проаналізувати теоретичні основи логістичних процесів, класифікацію та структурні елементи логістичних систем.
2. Вивчити сучасні підходи до моделювання логістичних процесів, зокрема математичні, імітаційні та комп’ютерні методи.
3. Оцінити існуючі проблеми функціонування логістичних процесів на прикладі конкретного підприємства або типового логістичного ланцюга.
4. Побудувати математичну модель одного з ключових логістичних процесів (наприклад, транспортного, складського, дистрибуційного або інформаційного).
5. Провести аналіз ефективності запропонованого рішення за допомогою розрахункових або програмних засобів.

6. Обґрунтувати економічну доцільність впровадження моделювання у логістичну діяльність підприємства.

7. Надати практичні рекомендації щодо удосконалення логістичних процесів на основі результатів моделювання.

Предметом дослідження є методи моделювання логістичних процесів та їх застосування для аналізу, оптимізації і вдосконалення функціонування логістичних систем підприємства або логістичного ланцюга загалом.

Об’єктом дослідження є логістичні процеси, що забезпечують ефективне функціонування систем постачання, транспортування, складування, розподілу та інформаційного забезпечення в рамках логістичної діяльності підприємства.

У процесі дослідження застосовувались загальнонаукові та спеціальні методи, зокрема аналіз і синтез для узагальнення теоретичних основ логістики, індукція та дедукція для формулювання висновків і побудови логічної структури дослідження, порівняльний аналіз для вивчення різних підходів до моделювання логістичних процесів, а також математичне моделювання для формалізації логістичних задач і розрахунку оптимальних рішень. Імітаційне моделювання дозволяло досліджувати поведінку логістичних систем у динаміці, а елементи економічного аналізу застосовувались для оцінки ефективності запропонованих рішень. Крім того, використовувалися програмні засоби для побудови моделей та візуалізації результатів.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ МОДЕЛЮВАННЯ ЛОГІСТИЧНИХ СИСТЕМ

1.1.Огляд сучасних підходів для моделювання логістичних процесів

У сучасних умовах глобалізації, цифровізації економіки та підвищених вимог до ефективності логістики особливого значення набуває застосування моделювання як інструменту управління логістичними процесами. Стрімке ускладнення логістичних ланцюгів, зростання обсягів інформації, поява нових форм взаємодії між суб'єктами постачання та розширення функціоналу логістичних інформаційних систем призводить до того, що традиційні методи планування і прогнозування втрачають ефективність. На цьому тлі моделювання дозволяє створити формалізоване представлення логістичних процесів, виявити їхні вузькі місця, здійснити оцінку різних сценаріїв управлінських рішень та оптимізувати витрати. Різноманіття задач, які вирішуються в логістиці, обумовлює існування багатьох підходів до моделювання — від математичних до комп'ютерних і гібридних. У цьому підпункті здійснюється систематизація сучасних методів моделювання логістичних процесів, їх класифікація, опис основних характеристик, переваг і обмежень кожного з них.

Таблиця 1.1

Класифікація сучасних підходів до моделювання логістичних процесів

Критерій класифікації	**Типи моделей**	**Характеристика**
За рівнем формалізації	Аналітичні, імітаційні, евристичні, гібридні	Визначають ступінь формалізованості моделей, використання точних математичних методів або евристичних підходів
За способом відображення об'єкта	Дискретні, неперервні	Відображають логістичні процеси або як послідовність подій, або як безперервний потік
За ступенем інтерактивності	Статичні, динамічні	Враховують або фіксовані умови функціонування, або зміну параметрів у часі
За використаними інструментами	Математичні, комп'ютерні, графічні, програмно-аналітичні	Характеризують засоби реалізації моделей — від математичних формул до складних програмних систем

За функціональним призначенням	Описові, оптимізаційні, прогнозні	Залежно від мети: описати процес, знайти найкраще рішення або спрогнозувати майбутні стани

Подана класифікація дозволяє систематизувати існуючі підходи до моделювання логістичних процесів залежно від різних характеристик, що впливають на точність, гнучкість та адаптивність моделей. Найбільш формалізованими є аналітичні моделі, які забезпечують високу точність, проте складні у застосуванні в динамічному середовищі. Імітаційні та гібридні моделі є більш адаптивними і дозволяють враховувати зміни у процесах у реальному часі. Важливим є також поділ за способом відображення: дискретні моделі підходять для процесів із чітко визначеними подіями, тоді як неперервні – для потоків ресурсів. Динамічні моделі дозволяють оцінити поведінку логістичної системи у часі, що особливо актуально для прогнозування. Залежно від інструментальної бази, моделі можуть бути реалізовані як через класичні математичні методи, так і за допомогою сучасного програмного забезпечення.

Таблиця 1.2

Основні напрями математичного моделювання у логістиці

Напрям моделювання	**Застосування в логістиці**	**Особливості та переваги**
Лінійне програмування	Оптимізація розподілу ресурсів, управління запасами, визначення найкращих маршрутів	Висока точність, можливість отримання оптимального рішення
Нелінійне програмування	Удосконалення складних логістичних моделей із залежністю між змінними	Можливість врахування складних взаємозв’язків між параметрами системи
Теорія графів	Побудова та аналіз транспортних мереж, визначення найкоротших або найменш завантажених маршрутів	Візуалізація логістичної мережі, ефективний аналіз зв’язків і пропускної здатності
Теорія масового обслуговування	Моделювання черг на складах, у транспортних вузлах, прогнозування затримок і навантаження	Оцінка й оптимізація обслуговування клієнтів у системах з обмеженими ресурсами
Транспортні та мережеві моделі	Оптимізація переміщення вантажів, маршрутизація, управління розподілом між точками постачання й споживання	Забезпечення мінімізації витрат, часу або інших логістичних критеріїв ефективності

Зміст таблиці відображає ключові інструменти математичного моделювання, які використовуються для опису, аналізу та оптимізації логістичних процесів. Лінійне програмування є найпоширенішим методом, що дає змогу вирішувати завдання оптимального розподілу ресурсів, управління запасами та вибору маршрутів з урахуванням обмежень. Нелінійне програмування розширює можливості моделювання, дозволяючи враховувати складніші взаємозв'язки між змінними. Теорія графів широко використовується для формалізації логістичних мереж, оскільки дає змогу будувати модель у вигляді взаємозв'язаних об'єктів, аналізувати потоки та вибирати ефективні шляхи доставки. Моделі масового обслуговування дають можливість прогнозувати черги та навантаження, що є важливим для ефективного функціонування складів і терміналів. Транспортні та мережеві моделі спрямовані на мінімізацію витрат або часу доставки шляхом побудови оптимальних маршрутів у межах складної мережі постачання. Сукупно ці методи формують надійну базу для прийняття обґрунтованих управлінських рішень у логістиці[3].

Імітаційне моделювання логістичних процесів є одним із найбільш перспективних напрямів у сучасному управлінні логістикою, оскільки дозволяє створювати цифрові копії реальних логістичних систем і на їх основі аналізувати поведінку об'єктів у змінних умовах. Його головна особливість полягає в можливості урахування стохастичних впливів, таких як коливання попиту, затримки в постачанні, зміна часу виконання операцій або вплив людського чинника. Завдяки цьому імітаційне моделювання стає незамінним у тих випадках, коли логістичні процеси є складними, багатокомпонентними та динамічними. Цифрові репліки систем, які створюються в межах імітаційних моделей, відтворюють логіку, часові характеристики та взаємодії елементів у реальному середовищі, що дозволяє не лише вивчити поточний стан системи, а й протестувати її поведінку за різних сценаріїв.

Імітаційні моделі активно використовуються для аналізу функціонування складів, транспортних вузлів, логістичних центрів, мереж

доставки, виробничо-логістичних ланцюгів. Вони є особливо корисними при дослідженні вузьких місць у логістиці, плануванні навантаження ресурсів, розробці графіків перевезень, визначенні розміщення складів або складанні стратегії управління потоками товарів. Популярність такого типу моделювання зумовлена його візуальністю: за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення користувач може спостерігати за віртуальним перебігом логістичного процесу, змінювати параметри, запускати сценарії з різними початковими умовами й одержувати відповідну статистику результатів.

До найбільш поширених інструментів імітаційного моделювання в логістиці належать програмні продукти AnyLogic, Arena, Simul8, FlexSim, які дозволяють моделювати як окремі логістичні операції, так і повномасштабні ланцюги постачання. Наприклад, AnyLogic підтримує мультипарадигмове моделювання — об’єднання дискретно-подійного, агентного та системно-динамічного підходів. Arena та Simul8 орієнтовані на візуальне представлення потоків і часу обробки логістичних задач. FlexSim часто використовується для моделювання операційної діяльності складів, у тому числі завантаження/розвантаження, комплектування замовлень, обслуговування клієнтів[19].

Серед переваг імітаційного моделювання варто відзначити здатність моделі відображати реальну структуру логістичних процесів із високою деталізацією, враховуючи затримки, непередбачувані події, обмеження ресурсів. Це забезпечує можливість прийняття рішень на основі сценарного аналізу та зменшення ризиків при впровадженні змін у реальних умовах. Імітаційне моделювання дозволяє протестувати нові логістичні стратегії або структури систем без необхідності змін у фізичному середовищі, що особливо важливо при трансформаціях великомасштабних логістичних систем.

Проте разом із перевагами імітаційне моделювання має і певні обмеження. По-перше, побудова якісної імітаційної моделі потребує значних часових та трудових ресурсів, особливо у випадку складних систем із великою

кількістю параметрів і логічних зв’язків. По-друге, калібрування моделі, тобто приведення її до стану, що точно відображає реальну систему, вимагає точних і повних вхідних даних, що не завжди можливо в умовах обмеженого доступу до інформації. По-третє, такі моделі зазвичай є специфічними і слабо придатними до повторного використання в інших задачах — кожен проект потребує створення нової моделі або значної адаптації наявної. Також значну роль відіграє людський чинник: некоректне налаштування моделі або хибна інтерпретація її результатів можуть призвести до помилкових управлінських рішень.

Агентно-орієнтоване моделювання дозволяє описати поведінку окремих учасників логістичного процесу як автономних агентів, що взаємодіють між собою. Це особливо актуально у випадках багаторівневої кооперації постачальників, посередників, складів і розподільчих центрів. Системно-динамічні моделі, своєю чергою, дають змогу аналізувати поведінку логістичних систем у довгостроковому періоді, виявляти циклічність, затримки, ефекти накопичення та інерції. Вони базуються на взаємозв’язку між елементами системи через диференціальні рівняння. Обидва підходи особливо корисні у стратегічному плануванні, дослідженні довгострокових трендів і прийнятті рішень у системах із високою складністю[27].

Сучасна логістика активно інтегрує методи штучного інтелекту, зокрема нейронні мережі, дерева рішень, генетичні алгоритми, байєсівські моделі, які дозволяють виявляти закономірності у великих масивах даних, прогнозувати попит, оптимізувати маршрутизацію й автоматизувати управлінські рішення. Генетичні алгоритми ефективно застосовуються для задач комівояжера або багатокритеріальної маршрутизації. Нейронні мережі здатні враховувати складні залежності між параметрами процесу та прогнозувати їх зміну в часі. Ці підходи мають високу адаптивність і самонавчання, але водночас вимагають значних обчислювальних потужностей і можуть бути «чорними скриньками» — складними для інтерпретації.

З огляду на недоліки кожного з окремих методів, дедалі більшого поширення набуває підхід до створення гібридних моделей, які поєднують сильні сторони математичних, імітаційних та інтелектуальних методів. Наприклад, математичне ядро може бути вбудоване в імітаційне середовище, яке дозволяє тестувати поведінку моделі при зміні зовнішніх умов. Або ж нейронна мережа використовується для прогнозування параметрів, які потім підставляються в математичну модель. Гібридизація підвищує гнучкість системи моделювання, але водночас ускладнює її структуру та потребує багатофакторної калібрування[1].

Огляд сучасних підходів до моделювання логістичних процесів засвідчив, що жоден із методів не є універсальним, а ефективність їх застосування залежить від конкретної задачі, рівня складності системи, доступних ресурсів та вимог до точності й адаптивності. Математичні моделі дають змогу отримувати оптимальні рішення, імітаційні — досліджувати поведінку системи в динаміці, агентно-орієнтовані — враховувати децентралізовану взаємодію, а методи штучного інтелекту — виявляти приховані закономірності. У сучасній логістиці особливої актуальності набуває комбіноване використання різних підходів, що дозволяє комплексно аналізувати логістичні системи, приймати обґрунтовані управлінські рішення та досягати високої ефективності в умовах невизначеності та динамічних змін.

1.2.Використання математичних методів аналізу логістичних систем

Математичні методи аналізу логістичних систем займають ключове місце в сучасному інструментарії управління матеріальними, інформаційними та фінансовими потоками, оскільки дозволяють не лише формалізувати процеси, що відбуваються в логістиці, але й на основі точних аналітичних інструментів знаходити оптимальні рішення у складних умовах багатофакторної взаємодії. Логістичні системи, як складні соціотехнічні утворення, характеризуються високим ступенем складності, невизначеності та

динамізму, що обумовлює потребу в застосуванні саме математичних методів, здатних відтворити закономірності їх функціонування та забезпечити ефективне управління ресурсами. Розглядаючи логістичну систему як множину взаємопов'язаних елементів, об'єднаних єдиним потоком ресурсів і керування, слід зазначити, що аналітичне описання її функціонування вимагає точних числових моделей. Математичне моделювання дає змогу абстрагуватись від складної природи логістичних процесів і перейти до кількісного аналізу шляхом побудови відповідних функціональних залежностей, рівнянь, нерівностей або систем обмежень. У цьому контексті найбільш поширеними є методи лінійного і нелінійного програмування, теорії масового обслуговування, транспортні та мережеві моделі, методи теорії графів, імовірнісні та статистичні підходи, а також елементи дискретної математики й комбінаторики.

Лінійне програмування вважається одним із базових підходів у математичному аналізі логістичних задач. Воно дозволяє сформулювати задачу оптимального розподілу ресурсів між конкурентними напрямками або каналами постачання з урахуванням обмежень щодо запасів, потужностей, часових рамок чи інших факторів. Типовими прикладами є задача оптимального планування поставок, задача оптимального розміщення складів, задача маршрутизації з обмеженням пропускної здатності тощо. За допомогою симплекс-методу або методів внутрішньої точки можливо знайти рішення задачі з великою кількістю змінних і обмежень, що дає змогу приймати виважені управлінські рішення навіть у багаторівневих логістичних системах. У випадках, коли залежності між змінними не є лінійними, застосовуються методи нелінійного програмування, які охоплюють широкий спектр задач – від розміщення логістичних об'єктів до балансування виробничих навантажень і моделювання витрат у залежності від обсягів споживання ресурсів[23].

Теорія масового обслуговування відіграє важливу роль у прогнозуванні навантаження на вузлові елементи логістичної системи, такі як склади,

транспортні термінали, пункти переробки або сервісного обслуговування. Основна мета її застосування полягає у визначенні імовірностей виникнення черг, оцінці середнього часу очікування, рівня завантаженості обслуговуючих каналів та ймовірності відмови у обслуговуванні. Зокрема, моделі типу M/M/1, M/M/c або G/G/c дозволяють математично описати системи із стохастичними надходженнями запитів і обслуговуванням з випадковою тривалістю. На основі цих моделей логістичні аналітики мають можливість прогнозувати ефективність роботи складу, оцінювати потребу у додаткових ресурсах або змінювати політику обслуговування для мінімізації затримок.

Транспортна задача, яка є окремим випадком задачі лінійного програмування, дозволяє визначити оптимальну схему перевезення вантажів з кількох пунктів відправлення в кілька пунктів призначення за критерієм мінімізації вартості транспортування. Мережеві моделі розширюють цю задачу, дозволяючи враховувати складніші структури логістичних систем із проміжними пунктами, декількома рівнями перевезення, резервними маршрутами. Метод потенціалів, метод розгалужень і меж, метод Форда-Фалкерсона, алгоритм Дейкстри – це лише деякі інструменти, які використовуються в межах аналізу транспортних та мережевих моделей. Їх застосування дозволяє будувати оптимальні маршрути, оцінювати пропускну здатність логістичних мереж, планувати доставку в умовах обмежених ресурсів [10].

Теорія графів є потужним засобом опису логістичних систем як множини вершин (об’єктів) і дуг (зв’язків між ними), що відкриває можливість візуалізації потоків, аналізу варіантів маршрутизації, визначення найкоротших або найефективніших шляхів між пунктами постачання і споживання. Такі методи як побудова остовних дерев, пошук ейлерового чи гамільтонового циклу, оптимізація мереж за критеріями вартості, часу або надійності активно використовуються для побудови логістичних маршрутів та планування розподілу навантаження між логістичними вузлами. У великих логістичних мережах з багатьма учасниками та маршрутами аналіз графових

структур дозволяє виявляти «вузькі місця», прогнозувати перевантаження та знаходити резервні напрямки для забезпечення стійкості функціонування системи.

Імовірнісні та статистичні методи широко застосовуються для аналізу даних про логістичні процеси, особливо у випадках наявності великого масиву історичної інформації. Регресійний аналіз, дисперсійний аналіз, кореляційний аналіз дозволяють виявляти залежності між обсягами поставок і часовими витратами, рівнем запасів і швидкістю реалізації, частотою поставок і витратами на зберігання. Методи статистичного прогнозування використовуються для планування попиту, прогнозування потреб у ресурсах, оцінювання рівнів ризику у постачанні. Імовірнісні моделі, зокрема ланцюги Маркова, застосовуються для моделювання переходів логістичної системи між різними станами, що дозволяє оцінити її поведінку в довгостроковій перспективі[9].

Елементи комбінаторики, дискретної математики та оптимізаційних методів особливо корисні у задачах вибору конфігурацій логістичних мереж, формування наборів товарів для доставки, визначення черговості виконання замовлень або завантаження транспортних засобів. Наприклад, задача комівояжера, яка полягає у знаходженні найкоротшого шляху через низку точок з поверненням у початковий пункт, належить до класу NP-складних задач, але має практичне застосування у плануванні маршрутів доставки. Генетичні алгоритми, мурашині алгоритми, жадібні стратегії та інші евристики дають змогу ефективно вирішувати ці задачі у практично прийнятний час навіть при великій кількості варіантів.

Інтеграція математичних методів у логістичну діяльність дозволяє не лише підвищити ефективність поточних операцій, а й забезпечити основу для стратегічного планування. Такі методи можуть бути реалізовані як у вигляді автономних розрахункових моделей, так і через інтеграцію в інформаційні логістичні системи або цифрові платформи управління ланцюгами постачання. Наприклад, модулі оптимізації в ERP-системах, розрахункові

блоки в TMS-платформах, алгоритми планування в WMS-рішеннях – усі вони ґрунтуються на відповідних математичних принципах. Це дає змогу підприємствам адаптуватися до мінливого попиту, знижувати рівень запасів без втрати рівня обслуговування, мінімізувати логістичні витрати при одночасному забезпеченні високої гнучкості системи.

Таблиця 1.3

Аналіз математичних методів, що застосовуються у моделюванні логістичних систем

Математичний метод	**Сфера застосування в логістиці**	**Основні переваги**	**Основні обмеження**
Лінійне програмування	Оптимізація розподілу ресурсів, складування, вибір маршрутів доставки	Простота реалізації, чітке математичне рішення, ефективність при великих обсягах	Лише лінійні залежності, складність адаптації до змін у динамічних умовах
Нелінійне програмування	Оптимізація зі змінними витратами, комплексне планування ресурсів	Врахування складних взаємозв'язків, точніші результати	Високі обчислювальні витрати, складність побудови моделей
Теорія масового обслуговування	Прогнозування черг на складах, у логістичних центрах, терміналах	Моделювання стохастичних процесів, аналіз завантаження систем	Висока залежність від точності вхідних імовірнісних даних
Транспортна модель	Побудова маршрутів поставок між кількома пунктами, мінімізація витрат	Прямий алгоритм розв'язання, ефективність у класичних задачах доставки	Не враховує складні маршрути, обмеження на реальні логістичні умови
Мережеві моделі	Оптимізація розподільчих мереж, маршрутизація у багаторівневих системах	Моделювання складних структур, використання реальних обмежень	Складність при масштабуванні, потреба в детальній топології
Теорія графів	Візуалізація маршрутів, пошук найкоротших шляхів, побудова логістичних мереж	Універсальність, швидкість пошуку оптимальних рішень	Не враховує стохастичні або економічні показники без додаткових модифікацій
Статистичні методи	Прогнозування попиту, аналіз залежностей, оцінка ефективності операцій	Виявлення закономірностей, робота з великими масивами даних	Залежність від репрезентативності даних, ризик помилкових висновків

Імовірнісні методи (ланцюги Маркова)	Аналіз поведінки систем у часі, моделювання перехідних станів логістичних елементів	Врахування випадковості та переходів, побудова моделей для довгострокового планування	Потреба в точних ймовірностях переходів, обмеження на структуру станів
Комбінаторні методи	Розміщення складів, задачі комплектування замовлень, розв’язання задач маршрутизації	Рішення складних дискретних задач, використання евристичних підходів	Велика кількість варіантів, обчислювальна складність
Оптимізаційні алгоритми (евристики, генетичні)	Задачі комівояжера, багатокритеріальна маршрутизація, адаптивне планування поставок	Гнучкість, можливість адаптації до різних задач	Не завжди гарантують глобально оптимальний результат, потреба в налаштуванні параметрів

Математичні методи аналізу логістичних систем є не лише інструментом розрахунків, а й засобом прийняття стратегічних і тактичних рішень у логістиці. Їх використання дозволяє забезпечити обґрунтованість управлінських дій, підвищити адаптивність систем, зменшити витрати та ризики, а також сформувати аналітичну базу для цифрової трансформації логістичних процесів. Розширення застосування цих методів є логічним кроком у розвитку логістики як науки і практики, особливо з огляду на складність сучасних викликів глобальної економіки. У поєднанні з інформаційними технологіями та аналітичними платформами математичні моделі створюють основу для інтелектуальної логістики, яка забезпечує високу продуктивність, точність і надійність логістичних рішень.

РОЗДІЛ 2.ДОСЛІДЖЕННЯ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ МОДЕЛЮВАННЯ ЛОГІСТИЧНИХ СИСТЕМ

2.1.Роль імітаційного моделювання у вдосконаленні логістичних процесів

Із розвитком цифрових технологій і поступовим ускладненням логістичних систем, які включають в себе численні етапи постачання, складування, транспортування та обробки інформації, постала нагальна потреба у використанні ефективних інструментів, здатних не лише відтворювати реальні логістичні процеси, але й оцінювати їх ефективність у змінних умовах. Одним із найважливіших таких інструментів є імітаційне моделювання, яке дозволяє створювати точні цифрові аналоги логістичних систем, тестувати їх поведінку в умовах варіативності та випадковості, і на цій основі ухвалювати обґрунтовані управлінські рішення. Імітаційні моделі мають здатність відтворювати складну структуру логістичних потоків у часі, враховувати стохастичні впливи, поведінку окремих об’єктів системи та їхню взаємодію. Цей метод стає все більш затребуваним у контексті стратегічного й оперативного управління логістичними системами різного рівня складності – від внутрішніх логістичних підрозділів підприємств до глобальних ланцюгів постачання.

Імітаційне моделювання у логістиці являє собою надзвичайно важливу аналітичну та управлінську технологію, яка забезпечує глибоке вивчення внутрішньої динаміки логістичних процесів без необхідності втручання в реальне середовище. Суть цього підходу полягає у створенні комп’ютерної моделі логістичної системи або її окремих елементів з метою проведення експериментів у змінних умовах, аналізу ефективності функціонування, виявлення слабких місць, прогнозування результатів управлінських рішень та вдосконалення структури потоків. Така модель виступає віртуальним аналогом реальної логістичної системи й дозволяє детально вивчати взаємодію між її складовими – транспортними засобами, складами,

маршрутами, персоналом, інформаційними каналами, замовленнями, ресурсами тощо. Кожен об’єкт моделі діє відповідно до заданих логічних правил і обмежень, а його поведінка формується з урахуванням конкретних вхідних параметрів, включаючи час виконання операцій, маршрути, черговість дій, пріоритети обслуговування, наявність або відсутність ресурсів, стан навколишнього середовища тощо. Таким чином, імітаційна модель виконує функцію лабораторного середовища для дослідження логістичних явищ і механізмів[11].

Особливістю імітаційного моделювання є те, що воно дає змогу враховувати часовий вимір та стохастичні впливи, тобто непередбачувані або випадкові чинники, що є притаманними реальному логістичному середовищу. На відміну від аналітичних чи статичних моделей, імітаційна модель відтворює поведінку логістичної системи у часовій послідовності, дозволяючи простежити її функціонування крок за кроком у динаміці. Це дозволяє не лише оцінити поточний стан, але й передбачити, як система реагуватиме на ті чи інші зміни, наприклад, збільшення навантаження, затримки транспорту, збої в поставках, раптові зміни попиту або впровадження нового логістичного механізму. Завдяки цьому керівництво підприємства отримує унікальну можливість проаналізувати наслідки своїх рішень ще до того, як вони будуть реалізовані в реальності. Імітація дозволяє реалізовувати гнучке планування, оцінювати ризики, перевіряти різні сценарії функціонування системи та приймати оптимальні рішення без втрати часу та ресурсів.

Моделювання логістичних процесів імітаційними методами може охоплювати як окремі функціональні елементи (наприклад, зона приймання товару, блок зберігання, транспортування між складами), так і всю логістичну систему підприємства або навіть міжрегіональний чи глобальний ланцюг постачання. У межах однієї моделі можуть одночасно взаємодіяти десятки або навіть сотні елементів, дії яких координуються відповідно до заданих алгоритмів. Наприклад, у системі доставки товарів модель може відтворювати рух транспорту на маршрутах, обробку вантажу на складах, очікування

клієнтів, зміну пріоритетів, облік затримок, зміну погоди або непередбачувані події на дорогах. За результатами такої симуляції можна побачити, де виникають "вузькі місця", які операції спричиняють затримки, як змінюється навантаження на ресурси при зміні вхідних параметрів, і які варіанти реагування є найбільш доцільними.

Унікальність імітаційного підходу також полягає у тому, що він дозволяє створити візуальне, наочне уявлення процесів, що полегшує розуміння навіть для осіб, які не мають спеціалізованої технічної підготовки. У більшості сучасних імітаційних програм користувач може спостерігати, як «рухається» модель: відвантаження товару, переміщення вантажів, виникнення черг, затримок, скупчень. Це робить результати симуляції не лише точними у кількісному вимірі, а й інтуїтивно зрозумілими, що є надзвичайно корисним у прийнятті рішень на рівні стратегічного менеджменту. Окрім того, імітаційне моделювання підтримує концепцію багаторазових повторень з різними умовами, що дозволяє здійснювати порівняння ефективності різних стратегій та технологічних рішень у однакових вихідних умовах[2].

Таблиця 2.1

Сфери застосування імітаційного моделювання у логістиці

Сфера застосування	**Основні можливості імітаційного моделювання**	**Очікуваний ефект**
Складська логістика	Оптимізація розміщення стелажів, переміщення товарів, завантаження ресурсів	Зменшення затримок, підвищення швидкості обробки замовлень, ефективність простору
Транспортна логістика	Побудова маршрутів, управління чергами, планування графіків перевезень	Скорочення часу доставки, зниження витрат на транспортування, краща маршрутизація
Управління запасами	Урахування коливань попиту, затримок доставки, впливу зовнішніх чинників	Зменшення дефіциту або надлишку, підвищення точності планування
Виробнича логістика	Синхронізація виробництва з логістикою, регулювання обсягів напівфабрикатів	Підвищення продуктивності, зменшення простоїв, оптимізація черговості операцій

Представлені у таблиці приклади свідчать про широке і практично орієнтоване використання імітаційного моделювання в ключових напрямках

логістичної діяльності. У складській логістиці моделювання дозволяє оптимізувати просторове планування, зменшити втрати часу на переміщення товарів та уникнути перевантаження окремих зон. Це, своєю чергою, сприяє скороченню затримок, підвищенню швидкості обробки замовлень і забезпеченню ефективного використання наявної площі. У транспортній логістиці моделі імітації забезпечують побудову реалістичних маршрутів з урахуванням заторів, завантаженості вузлів, непередбачуваних подій та графіків роботи, що дозволяє суттєво скоротити витрати на транспортування, покращити планування перевезень і зменшити час доставки. В управлінні запасами імітаційне моделювання є корисним при прогнозуванні попиту, аналізі нестабільних термінів постачання, що забезпечує баланс між мінімізацією надлишків і уникненням дефіциту. Особливо це актуально для підприємств, що працюють у глобальних ланцюгах постачання з високим рівнем невизначеності. У виробничій логістиці імітація дозволяє синхронізувати графіки виробництва та постачання, управляти обсягами напівфабрикатів, уникати надмірного накопичення продукції між етапами і зменшувати простої. Усі ці переваги свідчать про значну роль імітаційного моделювання як інструменту підвищення загальної ефективності логістичних систем та прийняття обґрунтованих рішень у складному динамічному середовищі[15].

Таблиця 2.2

Переваги використання імітаційного моделювання у логістичних системах

Перевага	**Зміст**	**Практичне значення для логістики**
Відтворення реальних умов	Урахування затримок, випадковостей, обмежень ресурсів, людського фактору	Висока достовірність результатів моделювання
Гнучкість моделей	Можливість швидко змінювати параметри, сценарії, вхідні дані	Швидка адаптація до нових умов і зовнішніх впливів
Візуалізація процесів	Графічне відображення логістичних операцій і сценаріїв	Краще розуміння складних взаємозв’язків у системі
Повторюваність експериментів	Тестування одного і того ж процесу в різних варіантах, багаторазове моделювання	Оцінка ефективності альтернативних стратегій, вибір оптимального рішення

Виявлення прихованих закономірностей	Аналіз ефектів, які не виявляються в рамках традиційного планування	Запобігання небажаним наслідкам, виявлення вузьких місць і потенційних ризиків

Наведена таблиця узагальнює ключові переваги, які надає імітаційне моделювання підприємствам у процесі оптимізації логістичних операцій. Однією з найважливіших характеристик є здатність моделі точно відтворювати реальні умови функціонування логістичної системи, зокрема вплив випадкових затримок, обмежень ресурсів і чинників людського середовища, що забезпечує високу достовірність результатів симуляції. Завдяки гнучкості імітаційної моделі можливо оперативно змінювати параметри, коригувати сценарії та відтворювати непередбачувані ситуації, що дозволяє адаптувати логістику до нестабільних ринкових умов і зовнішніх викликів. Висока візуалізація процесів, притаманна більшості сучасних імітаційних платформ, дає змогу краще зрозуміти механізми взаємодії об’єктів у системі, що підвищує якість управлінських рішень на всіх рівнях. Повторюваність експериментів дозволяє багаторазово тестувати різні варіанти функціонування, порівнювати сценарії та обирати найефективніші з них без втручання у реальні логістичні процеси. Ще однією вагомою перевагою є здатність моделювання виявляти приховані взаємозв’язки та закономірності, які не виявляються у звичайному плануванні, що сприяє завчасному виявленню ризиків, усуненню критичних точок та формуванню стратегій упередження негативних ефектів. Сукупно всі ці переваги створюють потужну основу для ухвалення обґрунтованих і безпечних рішень у складному, динамічному логістичному середовищі[26].

Інструментальні засоби імітаційного моделювання логістичних процесів являють собою спеціалізовані програмні продукти, які забезпечують створення, управління, візуалізацію та аналіз цифрових моделей логістичних систем різної складності. Їх використання дозволяє значно підвищити ефективність досліджень і розробки управлінських рішень у сфері логістики завдяки можливості точного відтворення динаміки функціонування елементів

системи, врахування стохастичних впливів, аналізу різних сценаріїв роботи та прогнозування результатів впровадження змін. На практиці одним із найпоширеніших інструментів є програмне забезпечення Arena, яке спеціалізується на дискретно-подвійному моделюванні та орієнтоване переважно на бізнес-процеси. Воно широко застосовується для дослідження логістичних ланцюгів, виробничих систем і потоків обробки замовлень, дозволяючи з великою точністю відображати черговість операцій, час обслуговування, черги, обмеження ресурсів, і формувати статистику продуктивності системи.

Особливо важливим серед сучасних засобів є програмна платформа AnyLogic, яка підтримує мультипарадигмовий підхід, тобто поєднання дискретно-подвійного, агентно-орієнтованого та системно-динамічного моделювання. Це надає користувачеві можливість моделювати логістичні системи, у яких взаємодіють автономні агенти (наприклад, постачальники, споживачі, транспортні одиниці), одночасно з урахуванням загальної динаміки системи на макрорівні. AnyLogic також відзначається гнучкістю у налаштуванні вхідних параметрів, можливістю інтеграції з реальними базами даних і підтримкою масштабованих сценаріїв, що робить його придатним для стратегічного планування у великих логістичних мережах або мережах розподілу. Його функціонал включає механізми візуалізації процесів, що забезпечує користувачеві глибше розуміння динаміки системи й підвищує інформативність моделі при демонстрації результатів управлінському персоналу[7].

Програма FlexSim є ще одним потужним інструментом імітаційного моделювання, яка особливо ефективна для візуального моделювання логістичних процесів у реальному часі. Її можливості охоплюють створення тривимірних моделей складів, логістичних вузлів, транспортних систем, у яких можна відтворювати рухи об’єктів, взаємодію персоналу, затримки, черги, розміщення вантажів тощо. FlexSim дозволяє відстежувати продуктивність системи в реальному часі, виводити ключові показники

ефективності, будувати діаграми та графіки, що значно полегшує прийняття рішень та дає змогу глибше аналізувати поведінку системи. Його застосування є актуальним як для навчання логістичних фахівців, так і для практичного тестування нових логістичних стратегій перед їх впровадженням на підприємстві.

Plant Simulation, розроблений компанією Siemens, широко застосовується в інтеграції з ERP-системами, оскільки дозволяє безпосередньо пов’язувати модель логістичних процесів із реальними виробничими та плановими даними підприємства. Завдяки цьому забезпечується узгоджене моделювання потоку матеріалів, контролю виробничих замовлень, синхронізації між цехами та управління ресурсами. Особливо актуальним є застосування Plant Simulation у виробничій логістиці, де важливо враховувати взаємодію виробничих і логістичних підрозділів, мінімізувати простої та визначати оптимальні обсяги буферних запасів. Програмне забезпечення дозволяє не лише візуалізувати процеси, а й формувати розрахунки продуктивності, прогнозувати вплив зміни навантаження або структурних параметрів на загальний результат функціонування системи[3].

Також варто згадати платформу ProModel, яка орієнтована на моделювання операційної діяльності, у тому числі логістичних центрів, медичних систем постачання, складів і виробничих систем. ProModel дозволяє створювати точні аналітичні моделі, керувати потоками, формувати графіки використання ресурсів, оптимізувати розміщення потужностей і аналізувати вплив змін у структурі логістичної мережі. Його функціонал включає генерацію великого масиву статистичних звітів і сценарного аналізу, що дозволяє зіставити різні варіанти організації процесів та оцінити їх переваги й недоліки.

Усі зазначені інструменти мають спільну рису — вони дозволяють здійснювати симуляцію складних логістичних процесів із високою точністю, враховуючи випадкові події, черги, затримки, поведінкові сценарії, зміни обсягів навантаження, графіки обслуговування тощо. Це забезпечує

підприємствам потужну аналітичну базу для ухвалення рішень і впровадження змін, а також сприяє скороченню витрат, підвищенню продуктивності та досягненню конкурентних переваг на ринку. Імітаційне моделювання за допомогою сучасних програмних засобів уже стало стандартом у стратегічному та оперативному плануванні логістики, а його роль у цифровій трансформації підприємств постійно зростає.

Світовий досвід демонструє високу ефективність імітаційного моделювання як практичного інструменту для вдосконалення логістичних систем, зокрема у сфері оптимізації операцій, планування ресурсів, зниження витрат і скорочення часу виконання логістичних функцій. Яскравим прикладом успішного застосування цього підходу є досвід компанії DHL, яка провела моделювання структури одного зі своїх великих логістичних хабів у Європі. У ході проекту була створена детальна симуляційна модель, що враховувала просторову конфігурацію складу, потоки вантажів, завантаження співробітників, часові параметри обробки та переміщення посилок, а також типові сценарії коливань обсягів. Результати моделювання дали змогу ідентифікувати проблемні ділянки, де виникали черги, збої у синхронізації процесів і нерівномірне навантаження на персонал. Запропоновані заходи з реорганізації зони приймання, зміни маршрутів внутрішніх переміщень та вдосконалення черговості обробки призвели до зменшення середнього часу обробки вантажів на 18%, при цьому жодних додаткових витрат на персонал або технічне переоснащення не було здійснено, що підтверджує високу економічну ефективність такого підходу[27].

Іншим відомим прикладом є реалізація проекту компанією BMW, яка застосувала програмне забезпечення Plant Simulation для побудови повної моделі внутрішнього логістичного ланцюга на одному з автомобільних заводів. Модель включала всі етапи руху комплектуючих від центрального складу до виробничих ліній, із врахуванням часу на транспортування, зон завантаження, взаємодії між лінійними підрозділами, а також впливу зміни графіків виробництва на логістику. Завдяки глибокому сценарному аналізу

компанія змогла змінити розташування деяких проміжних складів, переоптимізувати маршрути доставки, синхронізувати внутрішні перевезення з ритмом виробництва, що дало змогу зменшити відстань внутрішньозаводських переміщень на 12%, підвищити точність постачання до цехів і скоротити кількість аварійних поставок. Це дозволило не лише зменшити витрати, але й підвищити надійність логістичної підтримки виробництва[9].

Досвід імітаційного моделювання активно впроваджується і в українському бізнес-середовищі, особливо у тих галузях, де логістика відіграє критично важливу роль у забезпеченні конкурентоспроможності. У фармацевтичному секторі, де особливо важливі точність постачання, швидкість обробки замовлень і відповідність санітарним вимогам, імітаційне моделювання використовується для оптимізації роботи складів, формування маршрутів доставки ліків до аптечних мереж і синхронізації процесів комплектації. Зокрема, одна з провідних українських дистрибуційних компаній у сфері охорони здоров’я застосувала імітаційні моделі для аналізу своєї логістичної системи у період пікових навантажень, що дозволило зменшити середній час виконання замовлень на 22% та уникнути надмірного залучення тимчасового персоналу.

В агропромисловому секторі імітаційне моделювання довело свою ефективність у плануванні логістики збору врожаю, транспортування зерна, обслуговування елеваторів і зберігання продукції. Одне з українських агропідприємств застосувало симуляційний підхід для моделювання потоку вантажів під час жнив, враховуючи характеристики доріг, завантаження техніки, погодні умови, роботу елеваторних установок і час простою. Завдяки моделі вдалося оптимізувати використання транспортного парку, уникнути перевантаження приймальних пунктів, а також скоротити середній час доставки врожаю до складів на 15%, що безпосередньо позначилося на збереженні якості продукції і загальних логістичних витратах підприємства.

У сфері роздрібної торгівлі та електронної комерції імітаційне моделювання використовується для вдосконалення роботи розподільчих центрів, зон комплектування, маршрутів доставки, особливо у контексті сезонного зростання навантаження. Українська рітейл-компанія, яка керує мережею понад 150 магазинів і власним логістичним центром, впровадила програму моделювання для перевірки ефективності нової схеми сортування товарів. Модель дозволила виявити неочевидні затримки на етапі упаковки замовлень, які спричиняли затримки у розподілі товару. Запровадження нового алгоритму, протестованого через імітаційну модель, призвело до скорочення часу на комплектування одного замовлення на 9% та загального зниження витрат на логістику на 6% у пікові періоди.

Усі ці приклади переконливо доводять, що імітаційне моделювання у сфері логістики є не лише ефективним інструментом аналітики, а й реальним засобом досягнення відчутних економічних результатів. Незалежно від галузі чи масштабу діяльності підприємства, створення цифрової копії логістичної системи відкриває нові можливості для стратегічного планування, виявлення неефективностей, підвищення продуктивності й зниження витрат. Більш того, у контексті глобальних викликів і зростання невизначеності у постачанні, саме здатність проводити віртуальні експерименти та обирати найкращу з множини альтернатив дає компаніям реальну конкурентну перевагу[1].

Таблиця 2.3

Обмеження та виклики впровадження імітаційного моделювання у логістиці

Обмеження / виклик	**Суть проблеми**	**Вплив на ефективність моделювання**	**Можливі шляхи подолання**
Складність побудови моделі	Необхідність ретельного збору даних, налаштування алгоритмів і логіки функціонування системи	Збільшує тривалість проєкту, потребує високої кваліфікації персоналу	Стандартизація процесів, використання готових шаблонів моделей
Високі вимоги до якості вхідних даних	У разі неточностей у даних — отримання	Може призвести до помилкових управлінських рішень	Використання актуальних даних, валідація і перевірка джерел

	некоректних результатів		
Обмежена адаптивність моделей	Деякі моделі створені для вузьких задач і важко адаптуються до нових сценаріїв	Знижує гнучкість при масштабуванні або зміні умов	Створення гібридних моделей, використання універсальних інструментів
Високі фінансові витрати на впровадження	Закупівля ліцензій, навчання персоналу, інтеграція в IT-інфраструктуру	Може стримувати рішення про використання моделювання у малому та середньому бізнесі	Застосування хмарних рішень, відкритого ПЗ, поступове впровадження поетапно
Необхідність міждисциплінарних знань	Потреба у володінні знаннями з логістики, IT, математичного моделювання	Обмежує коло фахівців, здатних повноцінно працювати з інструментами моделювання	Командна робота спеціалістів, розробка освітніх курсів для логістичних аналітиків
Повільна окупність	Економічна ефективність виявляється не відразу, а після кількох циклів впровадження	Зниження мотивації до використання в короткостроковій перспективі	Формування KPI для довгострокового аналізу вигоди від моделювання

Подана таблиця відображає основні проблеми, з якими стикаються підприємства під час впровадження імітаційного моделювання в логістичну діяльність. Одним із найпоширеніших обмежень є складність побудови моделі, яка потребує не лише глибокого розуміння логістичних процесів, а й здатності формалізувати їх у вигляді цифрових алгоритмів. Цей процес вимагає ретельного збору вихідних даних, визначення логіки взаємодії елементів, побудови часових зв’язків і перевірки відповідності моделі реальним умовам. Як наслідок, час на розробку моделей може бути значним, що стримує широке впровадження таких підходів, особливо в умовах обмежених часових і людських ресурсів. Додатково ускладнює ситуацію те, що для побудови ефективної імітаційної моделі потрібен висококваліфікований персонал, який одночасно володіє знаннями в логістиці, математичному моделюванні, аналітиці та роботі з програмним забезпеченням.

Ще одним критичним викликом є вимоги до якості вхідних даних. Оскільки моделі будуються на основі історичної та поточної інформації про процеси, будь-які помилки або невідповідності в даних можуть призвести до спотворених результатів симуляції. У такому випадку модель не лише втрачає свою цінність як аналітичний інструмент, а й стає джерелом хибних управлінських рішень. Особливо небезпечно це для стратегічного планування або реалізації масштабних логістичних змін. Забезпечення достовірності вхідних даних вимагає розробки спеціалізованих процедур збору, валідації, очищення та актуалізації інформації, що, у свою чергу, потребує ресурсів і технічного забезпечення.

Проблема вузької спеціалізації моделей також є поширеною. У багатьох випадках імітаційна модель розробляється під конкретне технічне або організаційне завдання й має обмежену придатність до використання в інших сценаріях. Це означає, що при зміні умов функціонування логістичної системи або розширенні її масштабів модель вимагає повного або часткового перепроєктування. Така низька адаптивність моделей істотно знижує гнучкість підприємства у реагуванні на виклики зовнішнього середовища, особливо в умовах динамічних змін ринку або логістичних ланцюгів. Подолати цю проблему можливо за рахунок створення універсальних або гібридних моделей, які передбачають можливість масштабування та сценарної модифікації в межах єдиної платформи[23].

Фінансові витрати є ще одним суттєвим бар’єром. Імітаційне моделювання, особливо в промисловому масштабі, потребує ліцензійного програмного забезпечення, впровадження нових IT-інструментів, навчання персоналу, іноді — модернізації всієї інформаційної архітектури. Для малого та середнього бізнесу ці витрати можуть бути критичними, що знижує доступність технології навіть за наявності зацікавленості. Однак розвиток хмарних сервісів, доступність відкритого програмного забезпечення, зростання конкуренції серед розробників імітаційних платформ поступово знижують поріг входу. У довгостроковій перспективі вартість впровадження

починає компенсуватись підвищенням ефективності логістичних процесів, зниженням витрат і підвищенням якості прийняття рішень.

Також варто відзначити виклик, пов’язаний із міждисциплінарністю. Побудова повноцінної імітаційної моделі вимагає участі фахівців з логістики, аналітики, інформаційних технологій, іноді — промислового інжинірингу чи економіки. Таку команду не завжди легко сформувати в межах одного підприємства, особливо якщо йдеться про компанії, що не мають власного R&D-відділу. Виходом може стати залучення зовнішніх консультантів, партнерство з IT-компаніями або інтеграція освітніх програм із логістики й моделювання у підготовку персоналу підприємства. У перспективі формування таких міждисциплінарних команд забезпечить значну конкурентну перевагу тим організаціям, які планують цифрову трансформацію своїх логістичних систем[20].

Ще один аспект, який часто недооцінюється на початковому етапі, — це повільна окупність імітаційного моделювання. Результати впровадження можуть проявитися не одразу, а лише після завершення повного циклу аналізу, оптимізації, апробації та реалізації нових рішень. Це може створити хибне враження про низьку рентабельність або навіть марність використання подібних інструментів, особливо в середовищі, де управлінські рішення оцінюються з позиції короткострокового ефекту. Однак стратегічний підхід із визначенням довгострокових KPI, застосування сценарного аналізу та накопичення статистичних даних дозволяє поступово оцінити реальний вплив моделювання на всі аспекти логістичної системи.

У сукупності всі розглянуті обмеження не применшують цінності імітаційного моделювання як ефективного інструменту оптимізації логістики, проте підкреслюють необхідність свідомого, поетапного і ресурсно забезпеченого підходу до його впровадження. Розуміння цих викликів дає змогу підприємствам краще підготуватись до інтеграції технології у свої бізнес-процеси та досягти максимального результату за рахунок грамотного

планування, підбору фахівців і адаптації інструментів під специфіку конкретної логістичної системи.

Імітаційне моделювання є потужним і гнучким інструментом удосконалення логістичних процесів, який дозволяє підприємствам ефективно аналізувати динаміку своїх систем, передбачати проблеми та ухвалювати оптимальні рішення на основі перевірених сценаріїв. Його застосування забезпечує адаптивність логістичних систем до зовнішніх впливів, підвищує точність планування, знижує ризики і сприяє інноваційному розвитку підприємств у межах цифрової економіки. Незважаючи на виклики, пов’язані з ресурсними витратами та потребою у спеціалізованій експертизі, вигоди від застосування імітаційного моделювання значно перевищують потенційні труднощі. У майбутньому роль цього підходу лише зростатиме, особливо в умовах цифровізації логістичних ланцюгів, розвитку штучного інтелекту та автоматизованих систем управління.

2.2.Використання аналітичних і числових методів для оптимізації логістичних маршрутів та розподілу ресурсів

Використання аналітичних і числових методів для оптимізації логістичних маршрутів та розподілу ресурсів є одним із ключових напрямів розвитку сучасної логістики, оскільки дозволяє системно вирішувати завдання мінімізації витрат, підвищення швидкості доставки, ефективного використання транспортних засобів, складів, трудових ресурсів і зменшення ризиків у ланцюгах постачання. У контексті цифровізації, зростання конкуренції та підвищення складності логістичних процесів підприємства змушені переходити від інтуїтивного або емпіричного управління до математично обґрунтованих рішень, базованих на точному аналізі, моделюванні та розрахунках. Аналітичні та числові методи забезпечують необхідний інструментарій для побудови оптимізаційних моделей, які

дозволяють враховувати множину обмежень, цілей та змінних, притаманних реальному логістичному середовищу.

Таблиця 2.4

Класифікація аналітичних і числових методів в оптимізації логістики

Метод	Тип методу	Сфера застосування	Основна мета
Лінійне програмування	Аналітичний	Розподіл ресурсів, вибір оптимального плану	Мінімізація витрат, врахування обмежень
Нелінійне програмування	Аналітичний	Складні логістичні задачі з нелінійною залежністю	Оптимізація витрат із врахуванням нелінійностей
Теорія графів	Аналітичний	Побудова маршрутів, оптимізація мереж	Пошук найкоротших або найефективніших шляхів
Задача комівояжера	Комбінований	Планування маршрутів доставки	Мінімізація загальної довжини маршруту
Генетичні алгоритми	Числовий	Мережеве планування, багатокритеріальні задачі	Пошук наближеного глобального оптимуму
Мурашині алгоритми	Числовий	Транспортна логістика, маршрутизація	Самоорганізація і пошук ефективних шляхів
Метод Монте-Карло	Числовий	Оцінка ризиків, сценарний аналіз	Імітація варіантів при невизначених умовах
Багатокритеріальна оптимізація	Аналітичний / числовий	Вибір між витратами, швидкістю, сервісом	Баланс між конфліктними цілями
Моделі управління запасами (EOQ)	Аналітичний	Управління обсягами замовлень	Зниження витрат на зберігання та поповнення
Алгоритм Дейкстри	Аналітичний	Пошук оптимального шляху в мережі	Визначення найкоротшого шляху між точками мережі

Наведена таблиця охоплює найпоширеніші методи, які застосовуються для аналітичного та числового моделювання в логістиці, демонструючи їхнє різноманіття, функціональні особливості та відповідність конкретним логістичним задачам. Лінійне та нелінійне програмування залишаються основою математичної оптимізації, забезпечуючи точні рішення у задачах розподілу ресурсів, маршрутизації та планування перевезень. Теорія графів і пов’язані з нею алгоритми, зокрема Дейкстри, використовуються для побудови оптимальних маршрутів у транспортних мережах, дозволяючи враховувати не лише географічні, а й операційні особливості логістичних

систем. У свою чергу, комбіновані методи, такі як задача комівояжера, поєднують аналітичні та евристичні елементи для вирішення задач послідовної доставки з мінімальними витратами. Сучасні числові методи, серед яких особливо виділяються генетичні алгоритми, мурашині алгоритми та метод Монте-Карло, є ефективними при роботі зі складними, стохастичними або багатокритеріальними завданнями, де класичні аналітичні підходи стають непридатними або занадто обмеженими. Вони дозволяють враховувати варіативність зовнішніх умов, працювати зі сценаріями невизначеності, генерувати рішення в умовах великої кількості змінних і параметрів. Моделі EOQ та багатокритеріальна оптимізація, що поєднують аналітику з адаптивним розрахунком, мають високу практичну цінність у сферах управління запасами й вибору між конфліктними критеріями, такими як витрати, час і рівень сервісу. Загалом, кожен із наведених методів відповідає специфічному класу логістичних задач і підвищує здатність підприємства до системного, обґрунтованого прийняття рішень в умовах обмежених ресурсів і динамічного середовища[12].

Таблиця 2.5

Порівняльний аналіз методів побудови логістичних маршрутів

Метод	**Критерій оптимізації**	**Швидкість обчислень**	**Масштабованість**	**Приклад використання**
Алгоритм Дейкстри	Найкоротший шлях	Висока	Висока	Побудова оптимального шляху між складами
Алгоритм Беллмана–Форда	Найкоротший шлях із від'ємними дугами	Середня	Висока	Аналіз маршруту з обмеженням часу та витрат
Задача комівояжера (жадібна евристика)	Мінімальна загальна довжина шляху	Середня	Обмежена при N>20	Оптимізація доставки у сфері e-commerce
Генетичний алгоритм	Багатокритеріальна оптимізація	Залежить від налаштувань	Висока	Складне планування в національних логістичних мережах

Мурашиний алгоритм	Найефективніша траєкторія	Помірна	Висока	Самоорганізація маршрутів доставки палива

Дана таблиця наочно демонструє ключові характеристики найбільш поширених методів побудови логістичних маршрутів, які використовуються в сучасній практиці для вирішення задач оптимізації переміщення товарів та ресурсів. Алгоритм Дейкстри є класичним інструментом, що забезпечує високу точність і швидкість пошуку найкоротшого шляху в мережі з позитивними вагами. Його ефективність особливо проявляється в умовах міської логістики або при визначенні найоптимальніших комбінацій маршрутів між вузлами постачання. Алгоритм Беллмана–Форда, хоча і поступається в продуктивності, має перевагу в роботі з графами, що містять дуги з від'ємною вагою, дозволяючи враховувати ситуації зі знижками, штрафами або непередбачуваними витратами. Задача комівояжера, що відома своєю обчислювальною складністю, дає змогу ефективно вирішувати задачі обслуговування багатьох клієнтів при мінімізації загального маршруту. Її практичне значення проявляється у плануванні маршрутів для кур'єрської доставки, дистрибуції або виїзного сервісу[8].

Генетичний алгоритм виступає як адаптивний числовий підхід, що дозволяє знаходити наближені до оптимальних рішення у ситуаціях з багатьма змінними, де класичні методи не забезпечують достатньої гнучкості. Його сильна сторона — здатність працювати з багатокритеріальними задачами, що одночасно враховують витрати, час, навантаження та інші параметри. У свою чергу, мурашиний алгоритм, який імітує поведінку колоній мурах у пошуку найкоротших шляхів, ефективно самоорганізовується і забезпечує динамічну адаптацію маршрутів, що особливо актуально в нестабільних або змінних умовах логістичного середовища. Застосування таких методів дає змогу підприємствам формувати гнучкі та адаптивні транспортні схеми, враховувати стохастичні фактори та обмеження, підвищувати загальну ефективність

логістичних операцій і досягати кращих економічних показників у розподільчих системах.

Таблиця 2.6

Аналітичні моделі розподілу ресурсів у логістиці

Модель	**Об'єкт управління**	**Основний параметр оптимізації**	**Результат використання**
EOQ (Economic Order Quantity)	Обсяг замовлення	Мінімізація сумарних витрат на замовлення і зберігання	Визначення оптимального розміру партії постачання
Модель з фіксованим інтервалом	Частота замовлень	Забезпечення регулярного поповнення запасів	Формування графіка поставок із фіксованим періодом
Модель з фіксованим рівнем поповнення	Мінімальний запас	Поповнення запасу до певного рівня	Забезпечення стабільного рівня обслуговування
Багаторівнева модель постачання	Запаси в розподільчій мережі	Баланс між рівнем запасів і витратами на логістику	Раціоналізація ресурсного забезпечення в багатоскладських мережах
Модель розподілу потужностей	Транспорт / складські ресурси	Максимізація використання доступної інфраструктури	Зменшення простоїв, оптимізація графіка навантаження

Подана таблиця висвітлює ключові типи аналітичних моделей, які застосовуються в логістиці для оптимізації управління матеріальними та інфраструктурними ресурсами. EOQ-модель (економічний обсяг замовлення) залишається класичним інструментом визначення оптимального розміру постачання, що забезпечує мінімізацію сукупних витрат на зберігання і замовлення. Її використання дозволяє підприємствам уникати надлишкових запасів, знижуючи витрати, але водночас підтримувати необхідний рівень обслуговування. Модель із фіксованим інтервалом дає змогу автоматизувати поповнення на регулярній основі, що є зручним при плановому виробництві або сталому попиті. Такий підхід забезпечує передбачуваність логістичних операцій та зменшує навантаження на управлінський персонал[16].

Модель із фіксованим рівнем поповнення орієнтується на моніторинг запасу і його поповнення до встановленого рівня, що дозволяє ефективно

реагувати на зміни попиту, особливо в умовах нерівномірного завантаження складів. У більш складних розподільчих мережах, що складаються з кількох рівнів (центральний склад, регіональні склади, торгові точки), застосовується багаторівнева модель постачання, яка дозволяє збалансувати обсяг запасів на кожному рівні, з урахуванням логістичних витрат, часу доставки та пріоритетів обслуговування. Це сприяє підвищенню гнучкості та адаптивності всієї логістичної системи.

Остання з моделей у таблиці, модель розподілу потужностей, орієнтована на ефективне використання інфраструктурних елементів – транспортних засобів, складів, вантажно-розвантажувальних зон. Вона дозволяє уникати надмірного простою ресурсів, розвантажити пікові години роботи та рівномірно розподіляти навантаження між об’єктами. У результаті застосування цих моделей підприємства отримують змогу більш точно планувати логістичні процеси, уникати втрат і неефективностей, покращувати рівень сервісу та реагувати на зміни ринку з більшою оперативністю. Сукупно ці підходи створюють базу для стратегічного та тактичного управління ресурсами в логістиці, формуючи конкурентні переваги в умовах нестабільного зовнішнього середовища[27].

Аналітичні і числові методи є критично важливими для підвищення ефективності логістичних систем. Їх застосування дозволяє знизити витрати, покращити обслуговування клієнтів, забезпечити прозорість і керованість логістичних процесів, сформувати основу для стратегічного планування і побудови адаптивних, стійких логістичних мереж. Розвиток інформаційних технологій, поява нових алгоритмів і збільшення обчислювальних потужностей лише розширюють сферу застосування цих методів і відкривають нові можливості для логістичних аналітиків і керівників підприємств. У сучасних умовах аналітична обґрунтованість є запорукою прийняття рішень, які відповідають не лише поточним, а й перспективним викликам ринку.

РОЗДІЛ 3. ПРОЄКТУВАННЯ ЛОГІСТИЧНОЇ МОДЕЛІ «ОПТИМІЗАЦІЯ РОЗПОДІЛУ РЕСУРСІВ У ЛОГІСТИЧНІЙ СИСТЕМІ»

3.1.Етапи створення і впровадження власної логістичної моделі

У сучасних умовах динамічного розвитку економіки та зростання конкуренції логістика перестає бути лише допоміжною функцією підприємства, перетворюючись на стратегічний інструмент забезпечення ефективності бізнес-процесів. Одним із основних напрямів удосконалення логістичних систем є розробка і впровадження математично обґрунтованих моделей управління матеріальними, інформаційними та трудовими потоками. Особливої актуальності набуває проєктування логістичних моделей, спрямованих на оптимізацію розподілу ресурсів, оскільки саме від цього залежить ритмічність постачання, витрати на зберігання, ефективність використання транспорту та якість обслуговування споживачів. Етапи створення та впровадження такої моделі є багаторівневим процесом, що включає глибокий аналіз логістичної системи, побудову математичної структури моделі, апробацію в тестових умовах і поступову інтеграцію в практичну діяльність підприємства. Нижче розглянуто кожен із цих етапів детально.

Аналіз логістичної системи підприємства та формулювання проблеми, яка підлягає оптимізації, є фундаментальною основою для побудови будь-якої ефективної логістичної моделі. Саме на цьому початковому етапі закладається аналітична база, що дозволяє виявити системні дисбаланси, неефективні механізми розподілу ресурсів, надлишкові витрати та упущення в управлінні потоками. Цей процес розпочинається з поглибленого дослідження структури логістичних процесів на підприємстві, де аналізуються як матеріальні потоки, що включають транспортування сировини, напівфабрикатів і готової продукції, так і інформаційні потоки, які супроводжують замовлення, поставки, інвентаризацію й облік. Здійснюється детальне картографування

логістичного ланцюга — від постачальника до кінцевого споживача — з виокремленням усіх етапів обробки, зберігання, переміщення та передачі товарів. Оцінюється ступінь завантаження складів, ефективність використання транспортних засобів, циклічність замовлень, час виконання кожної логістичної операції, обсяги залишків, співвідношення між попитом і фактичними поставками.

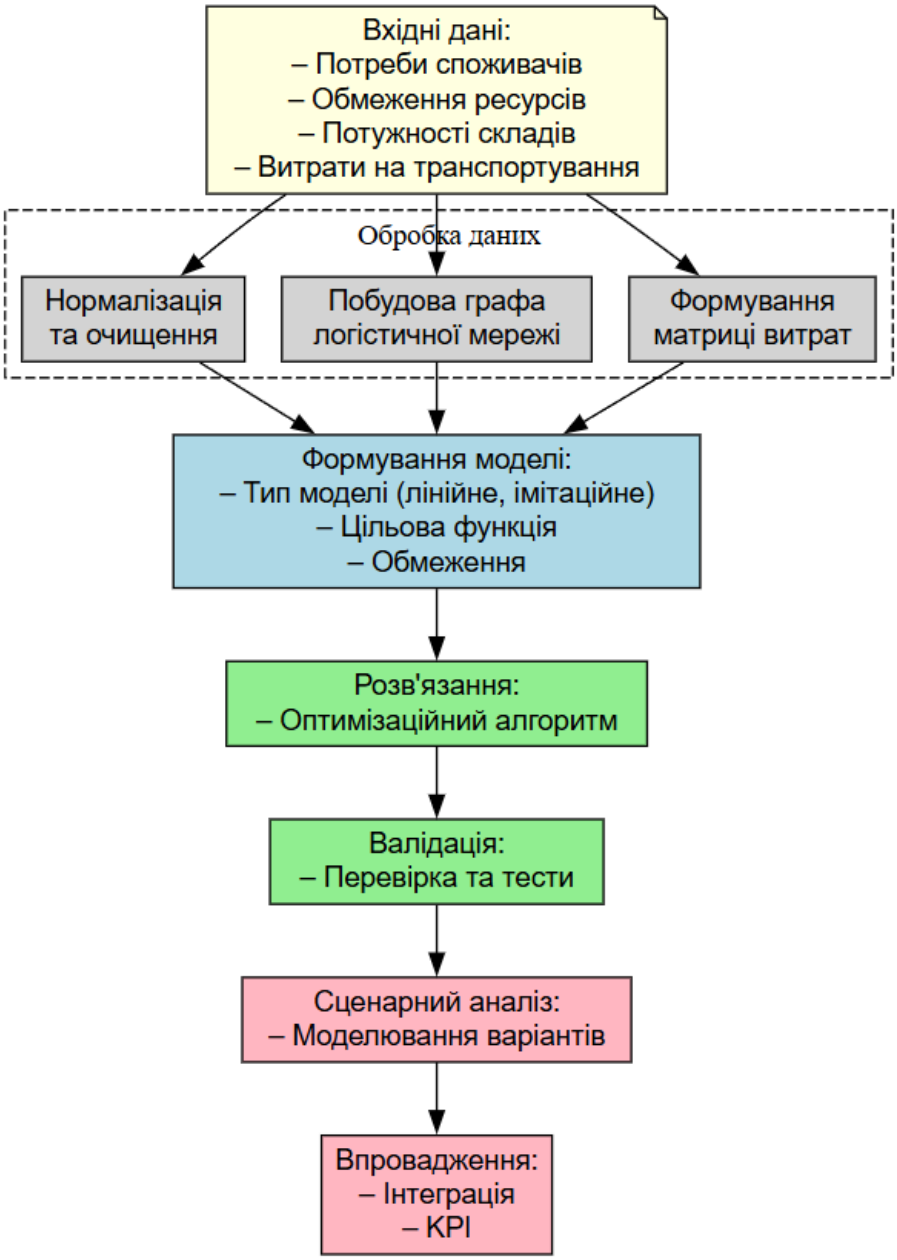


Рис 3.1 «Структурна схема побудови логістичної моделі оптимізації розподілу ресурсів у системі постачання»

Поглиблений аналіз виявляє вузькі місця, які негативно впливають на ритмічність постачання, наприклад, затримки у відвантаженні, надмірну концентрацію товарів у певних точках, нерівномірність логістичного навантаження протягом доби або тижня, що спричиняє простої, перевантаження або зниження продуктивності. Також виявляється дублювання функцій між підрозділами, зайві логістичні цикли, неузгодженість у графіках перевезень, які зумовлюють додаткові витрати або втрату часу. На рівні запасів аналіз фіксує відсутність логічного зв’язку між динамікою попиту та рівнем товарного залишку, що призводить до накопичення товарів, які не обертаються, або навпаки — до дефіциту при зростанні замовлень. Додатково аналізується структура витрат на логістику: розподіл між транспортними, складськими, адміністративними і допоміжними витратами, які часто виявляють диспропорції та перекоси на користь менш продуктивних елементів логістичної системи[3].

На основі всіх цих досліджень здійснюється узагальнення результатів, формується системне уявлення про реальний стан логістики на підприємстві, виявляються пріоритетні напрями для оптимізації. Важливим аналітичним кроком є формалізація виявлених проблем у вигляді чітко визначеної логістичної задачі, яку можна виразити мовою математичного моделювання. Це означає, що проблема повинна бути переведена у форму, де існують змінні (наприклад, обсяги постачання, кількість одиниць транспорту, точки розподілу), обмеження (місткість складу, час доставки, фінансові рамки), і цільова функція, яка підлягає оптимізації. Вибір цільової функції залежить від стратегічних цілей підприємства: якщо пріоритетом є зменшення витрат, модель орієнтується на мінімізацію сукупної логістичної вартості; якщо важливіша швидкість, функція може відображати мінімізацію часу проходження замовлення через систему; якщо акцент зроблено на надійність — максимізацію коефіцієнта виконання замовлень у задані терміни. Таким чином, етап аналізу логістичної системи не лише виявляє проблеми, а й створює підґрунтя для їх структурованого вирішення через логістичну модель,

що базується на формалізованих залежностях, реальних показниках і чітко визначених управлінських цілях.

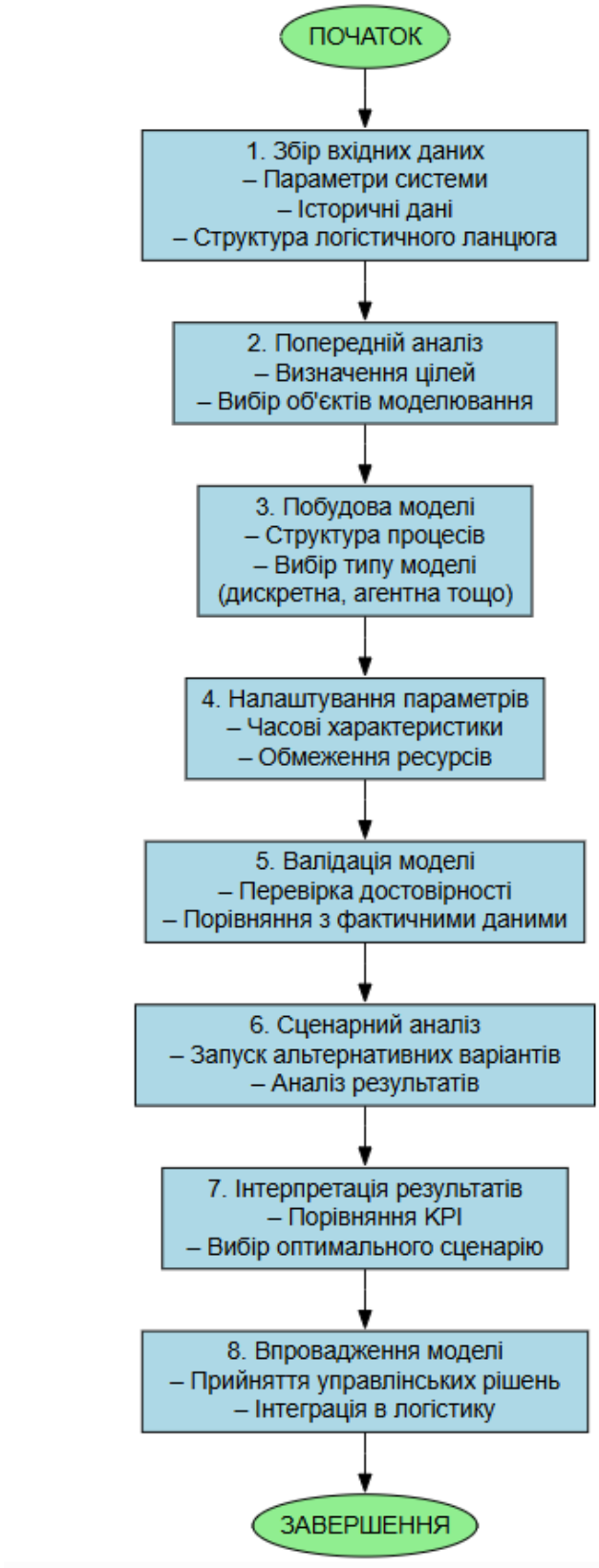


Рис 3.2 «Алгоритм побудови і реалізації логістичної моделі методом імітаційного моделювання»

Збір і підготовка вхідних даних для побудови логістичної моделі є критично важливим етапом, який визначає не лише технічну придатність майбутньої моделі, а й достовірність усіх подальших розрахунків, сценарних прогнозів та управлінських рішень. Модель, побудована на неякісних або фрагментарних даних, ризикує не лише не принести очікуваного ефекту, а й навпаки — створити уявлення про оптимізацію, що не відповідає реальній динаміці логістичних процесів. Саме тому на цьому етапі основна увага приділяється ідентифікації джерел даних, їх верифікації, перевірці на повноту, внутрішню узгодженість, а також адаптації до формату, придатного для обчислювальних процедур. Збір інформації охоплює повний спектр логістичних характеристик: обсяги товарних потоків між окремими точками мережі, фізичні параметри складів, типи та характеристики транспортних одиниць, середній та піковий час виконання окремих логістичних операцій, регулярність та обсяги замовлень, коефіцієнти заповнення складів, структуру попиту з урахуванням сезонності або регіонального розподілу. Також враховуються часові параметри, що впливають на логістику: добовий та тижневий ритм навантаження, відстані між логістичними вузлами, середній час відвантаження, тривалість комплектації, затримки внаслідок погодних або адміністративних факторів. Значну роль відіграють також фінансові параметри — зокрема, змінні та постійні витрати на транспортування, вартість зберігання продукції, витрати на завантаження та розвантаження, страхові та адміністративні витрати.

Після етапу збору вся інформація проходить процес очищення від логічних, арифметичних або структурних помилок. Часто дані надходять із різних джерел: ERP-систем, управлінських звітів, таблиць Excel, облікових документів тощо, — і можуть відрізнятися форматом, одиницями виміру або навіть рівнем точності. У процесі підготовки інформація перетворюється у єдину систему координат, нормалізується за періодами часу, уніфікується за форматом і приводиться до машиночитного вигляду. Частину даних доводиться доповнювати на основі експертних оцінок або

середньостатистичних значень. Окремо розробляються алгоритми перевірки: перехресна звірка між системами обліку, пошук аномальних відхилень, фільтрація за заданими параметрами та автоматичне виявлення пропущених значень. Після всіх підготовчих процедур формується остаточний масив даних, на основі якого можна будувати математичну або імітаційну модель логістичної системи. Цей набір стає єдиною основою для всіх розрахунків і повинен бути стабільним, надійним і відображати фактичний стан справ з високою точністю[17].

Після завершення підготовки даних логістична система переводиться в абстрактну форму, придатну для формалізованого опису. Формалізація логістичних процесів і побудова математичної моделі є наступним ключовим етапом, що визначає архітектуру управлінського рішення. Це означає, що всі логістичні дії, обмеження та взаємозв'язки описуються в термінах змінних, рівнянь, систем обмежень та цільових функцій. Модель має відображати реальну структуру підприємства: кількість складів, маршрути постачання, точки споживання, ресурси перевезення, нормативи запасів, умови зберігання та розміщення. Залежно від поставленої задачі обирається тип моделі: для завдань розподілу ресурсів застосовуються методи лінійного програмування, для маршрутного планування — алгоритми транспортної оптимізації та теорії графів, для складних комбінацій обмежень — числові евристики або гібридні підходи.

Кожна змінна в моделі має практичну інтерпретацію: обсяг відвантаження з точки А в точку В, час, необхідний на транспортування, розмір партії, кількість машин, вартість певної операції тощо. Обмеження встановлюються на основі фізичних, економічних або адміністративних факторів: максимальна місткість складу, вантажопідйомність транспортного засобу, графік роботи персоналу, термін зберігання вантажу. Цільова функція моделі — це показник, який необхідно мінімізувати або максимізувати. У логістиці найчастіше використовується мінімізація сукупних витрат або мінімізація часу логістичного циклу. У деяких випадках модель може бути

багатокритеріальною — коли одночасно враховуються кілька параметрів: вартість, швидкість, рівень сервісу. Для складних багатопараметричних задач використовуються методи зважених коефіцієнтів, аналіз Парето-ефективності або евристичні процедури пошуку.

Готова модель є цифровою репрезентацією логістичної системи, яка дозволяє здійснювати прогнозні розрахунки, перевіряти різні сценарії, тестувати зміни у структурі потоків або ресурсного забезпечення. Вона є основою для наступного етапу — симуляції та впровадження, однак саме якість формалізації та математичного опису визначає надійність, точність і практичну цінність моделі. Усе це перетворює логістику з набору емпіричних рішень на чітко структуровану, математично керовану систему[6].

Після завершення етапу побудови математичної структури логістичної моделі надзвичайно важливим є її симуляційне тестування, яке проводиться з метою перевірки її практичної придатності, точності прогнозування та здатності адекватно реагувати на зміну параметрів у реальному або наближеному до реального середовищі. Симуляція дає змогу створити віртуальне середовище, в якому модель проходить випробування у вигляді численних сценаріїв функціонування логістичної системи. У таких умовах змінюються обсяги попиту, логістичні маршрути, часові обмеження, завантаження складів, графіки руху транспорту, а також вводяться непередбачувані фактори, наприклад, затримки постачань, тимчасова недоступність ресурсів або порушення звичних схем розподілу. У процесі симуляції генерується новий набір вихідних даних, що дає змогу оцінити, наскільки модель наближена до реальності та які варіанти рішень вона формує у відповідь на ті чи інші ситуації.

Оцінювання результатів симуляції здійснюється шляхом зіставлення розрахованих показників із фактичними або історичними даними. Якщо розбіжності не перевищують допустимих значень, модель визнається придатною до подальшого використання. У разі наявності суттєвих відхилень виконується її коригування: уточнюються параметри змінних, переглядаються

коефіцієнти впливу окремих факторів, уточнюється функція цільового призначення, і за необхідності вносяться нові обмеження або змінюється сама структура моделі. Особлива роль належить сценарному аналізу, який дозволяє оцінити поведінку моделі в умовах нестабільного середовища або підвищеного ризику. Наприклад, для моделювання ситуацій із сезонним піком попиту або раптовим зростанням обсягу замовлень розробляються альтернативні варіанти роботи системи, які дозволяють перевірити, наскільки модель здатна витримати додаткове навантаження без втрати ефективності. Так само моделюються ситуації затримки транспорту, непередбаченої зміни ціни пального, часткового виходу з ладу складів або перебоїв в IT-системах. Завдяки такому підходу виявляються межі функціональної стійкості моделі, її слабкі сторони, а також резерви для подальшого удосконалення[19].

Завершальним етапом логістичного моделювання є повноцінна інтеграція створеної моделі в діючу систему управління підприємством. Цей процес охоплює кілька технічних і організаційних рівнів. Перш за все, розробляються та затверджуються регламенти використання моделі — це внутрішні документи, які визначають порядок введення даних, періодичність оновлення параметрів, обов'язковість застосування моделі для прийняття певних рішень і відповідальність за дотримання розрахункових сценаріїв. Наступним етапом є технічна інтеграція моделі з корпоративними інформаційними системами: ERP (Enterprise Resource Planning), TMS (Transportation Management System), WMS (Warehouse Management System) або CRM (Customer Relationship Management). Завдяки цьому модель отримує доступ до актуальних даних у режимі реального часу та може оперативно генерувати рішення на основі фактичної ситуації. Особливу увагу приділяють розробці зручного інтерфейсу, який забезпечує простоту користування навіть для персоналу, який не має глибоких знань у сфері математичного моделювання. Проводиться навчання ключових користувачів моделі, організовується інформаційна підтримка, технічний супровід, а також закладається механізм оновлення — тобто регулярної адаптації моделі до змін

ринкових умов, внутрішньої структури підприємства або технологічного прогресу.

Інтеграція моделі в реальне середовище логістичного управління супроводжується запуском системи моніторингу ключових показників ефективності. Серед таких показників — час доставки, точність виконання замовлень, обсяг логістичних витрат на одиницю товару, коефіцієнт використання транспорту, рівень заповнення складів, частота перевантажень або дефіцитів. Ці показники відстежуються як у режимі реального часу, так і за певні періоди, що дозволяє оперативно реагувати на відхилення, прогнозувати майбутні ризики та приймати обґрунтовані управлінські рішення. У разі виявлення тенденцій до зниження ефективності модель піддається перегляду, оновленню вхідних даних або масштабуванню. Такий підхід забезпечує не лише ефективне функціонування моделі, але й її динамічну актуальність, що є особливо важливим в умовах високої турбулентності логістичного середовища[22].

Впровадження логістичної моделі дозволяє досягти значного підвищення точності прогнозування, зменшення витрат, скорочення часу виконання замовлень і формування більш гнучкої, адаптивної логістичної системи. Автоматизація прийняття рішень, підвищення прозорості процесів і забезпечення цілісного контролю над логістичними потоками створює передумови для зростання конкурентоспроможності підприємства на ринку, покращення клієнтського сервісу та підвищення ефективності операційної діяльності в цілому.

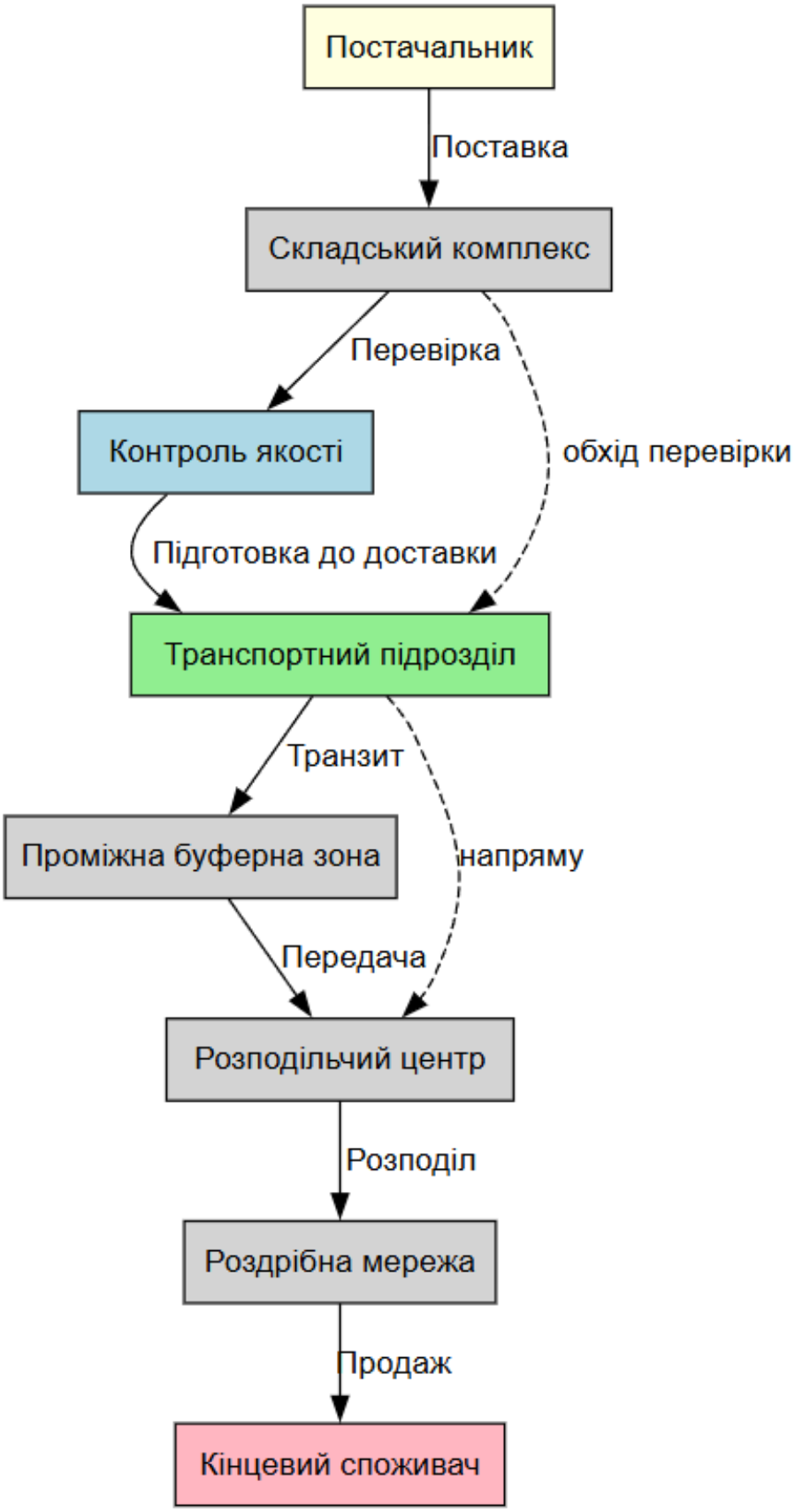


Рис 3.3 «Взаємодія елементів логістичної системи при моделюванні розподілу ресурсів»

Етапи створення і впровадження логістичної моделі охоплюють повний цикл від аналізу поточної ситуації до інтеграції моделі в реальне середовище функціонування підприємства. Кожен із етапів — від підготовки вхідних даних до валідації та впровадження — має критичне значення для досягнення надійності, точності й практичної корисності моделі. Правильно розроблена логістична модель дозволяє підприємству не лише зменшити витрати та підвищити продуктивність, але й сформувати гнучку, адаптивну логістичну систему, яка здатна ефективно реагувати на зміну ринкових умов, попиту, транспортної інфраструктури чи поведінки постачальників. Інструментальна база, побудована на аналітичних та числових методах, перетворює логістику на керовану та прогнозовану систему, яка відіграє ключову роль у конкурентоспроможності сучасного бізнесу.

3.2.Приклади практичного застосування моделі у реальних умовах

Розробка логістичної моделі є важливим етапом у підвищенні ефективності системи постачання, однак не менш значущим є її практичне впровадження у виробниче або комерційне середовище. Реалізація моделі в умовах реального підприємства дозволяє оцінити її життєздатність, точність, адаптивність до змін і вплив на загальну ефективність логістичних процесів. Відмінність лабораторної моделі від практично застосовної полягає не лише в наявності шуму даних, але й у необхідності врахування людського фактора, непередбачених збоїв, технічних обмежень, адміністративних рішень і зміни зовнішнього середовища. Саме тому застосування логістичних моделей на практиці потребує апробації, сценарного аналізу та готовності до коригувань. У цьому розділі розглянуто приклади застосування моделі оптимізації розподілу ресурсів на підприємствах різного типу, що дозволяє оцінити її універсальність, ефективність та гнучкість адаптації.

Оптимізація транспортних маршрутів у національній торговельній мережі виявилася ефективним прикладом практичного застосування

логістичної моделі, орієнтованої на раціональний розподіл ресурсів. У межах цієї мережі функціонувало понад вісімдесят об’єктів роздрібної торгівлі, розташованих у різних регіонах країни, що обумовлювало велику протяжність транспортних маршрутів і високий рівень логістичної складності. Основною проблемою була інерційна схема організації доставки, яка базувалась на застарілому графіку, сформованому ще на ранніх етапах розширення компанії. Транспортні засоби виїжджали згідно з фіксованим розкладом, незалежно від фактичного обсягу замовлень у кожній торговельній точці. У результаті одні машини відправлялися напівпорожніми, а інші — затримувалися через перевантаження. Це спричиняло значні порожні пробіги, нераціональне використання пального, надмірні експлуатаційні витрати, хаотичне завантаження складів у регіональних центрах і порушення термінів доставки, особливо у пікові дні або в періоди акційної активності[11].

Для розв’язання зазначеної проблеми було вирішено впровадити логістичну модель оптимізації маршрутів, засновану на принципах лінійного програмування. У цій моделі були враховані кілька ключових змінних, зокрема місткість кожного транспортного засобу, точне розташування об’єктів, обсяги замовлень за кожним напрямком, часові вікна для розвантаження в кожному магазині та обмеження щодо тривалості щоденного рейсу. Додатково враховувалися коефіцієнти заповнення транспорту на різних ділянках маршруту, що дозволило мінімізувати кількість порожніх пробігів і збалансувати логістичне навантаження. Окрім цього, була реалізована можливість динамічної адаптації маршрутів до змін попиту: модель автоматично перераховувала оптимальні схеми доставки на основі щоденного оновлення даних про сформовані замовлення та доступність транспорту.

Застосування цієї моделі впродовж лише одного кварталу дало вражаючі результати. Середня довжина маршруту доставки на день скоротилася на 16%, що автоматично зменшило витрати на паливно-мастильні матеріали та обслуговування автопарку. Заповненість транспортних засобів зросла до 92%, тобто майже кожен рейс став повноцінним з точки зору логістичної

доцільності, а не формальним виконанням графіку. Загальні витрати на доставку продукції до торговельних об’єктів скоротилися на 11% у порівнянні з попереднім періодом, що стало важливим фінансовим результатом для компанії. Окрім економічних показників, помітним став і якісний ефект: завдяки зниженню рівня незапланованих відвантажень значно зменшилася кількість термінових замовлень, стабілізувалась структура графіків роботи регіональних складів, що дозволило більш рівномірно розподіляти трудові ресурси. Водночас у результаті симуляційного моделювання з’явилася можливість протестувати альтернативні маршрути для нових торговельних точок, які планувалося відкрити, що перетворило логістичну модель з інструмента оперативного планування на стратегічний інструмент розвитку. Таким чином, впровадження математичної моделі оптимізації транспортної логістики дозволило не лише підвищити операційну ефективність, але й забезпечило новий рівень системного управління у великій національній мережі[24].

Раціоналізація складування у фармацевтичній компанії стала ще одним наочним прикладом ефективного застосування логістичної моделі в умовах складного та динамічного середовища. У фармацевтичній дистрибуції точність, оперативність і надійність логістичних процесів мають ключове значення, адже мова йде не лише про збереження продукції, а й про безперебійне постачання до аптечних мереж, медичних закладів, лабораторій та оптових партнерів. У межах зазначеної компанії функціонувала розгалужена мережа регіональних складів, які обслуговували тисячі замовлень щодня. Особливістю логістики цієї структури була висока номенклатурна насиченість, значна частина якої змінювалася залежно від сезонності, тендерної активності або коливань у нормативному регулюванні ринку. Традиційні підходи до формування запасів не дозволяли досягти балансу між наявністю продукції та ефективністю її розміщення. Частина препаратів зберігалася з надлишком і займала дефіцитну площу, що створювало навантаження на систему обігу, тоді як інші позиції постійно потребували

термінового поповнення або формували незадоволений попит. Це призводило до порушення графіків комплектації, затримок у постачанні й нераціонального використання ресурсів зберігання.

У відповідь на ці виклики було розроблено і впроваджено комплексну логістичну модель оптимізації зон складування. В її основу було покладено принцип багатофакторного аналізу, який включав класифікацію продукції за рівнем обігу, сезонністю, чутливістю до змін попиту (ABC/XYZ-аналіз), а також урахування специфічних вимог до температурного режиму, терміну придатності, умов обігу контрольованих речовин і ступеня логістичної цінності кожної позиції. Простір складів було переконфігуровано відповідно до інтенсивності обігу товарів: продукція класу «А» із високою швидкістю обертання розміщувалася ближче до зон відвантаження, у той час як повільно обертові товари класу «С» — на верхніх ярусах або в зонах глибокого зберігання. Була впроваджена система динамічного розміщення, яка дозволяла змінювати локацію зберігання товару в реальному часі залежно від актуальної потреби. Додатково була реалізована функція між-складського перерозподілу: при виявленні надлишків на одному складі й дефіциту на іншому система автоматично пропонувала оптимальний маршрут перенаправлення товару з урахуванням логістичних витрат і термінів придатності[4].

Особливу увагу приділено алгоритмам обліку терміну придатності — система не лише обмежувала вивантаження продукції з найкоротшим терміном зберігання, а й враховувала її залишкову логістичну цінність при зміні каналів дистрибуції. У моделі також закладено механізм попередження утворення прострочених залишків: при виявленні ймовірного ризику система генерувала рекомендацію щодо акційного виведення продукції, перенаправлення до регіонів з вищим обігом або навіть розробки стратегії зниження залишків через управління попитом.

Результати впровадження моделі стали очевидними вже протягом перших шести місяців роботи. Рівень точності формування відправлень зріс до 99,2%, що суттєво знизило частку рекламацій, повернень та втрат у каналі

аптечного роздрібу. Загальні витрати на утримання складів зменшилися на 13% за рахунок вивільнення площ, зниження обсягів надлишкового товару та скорочення витрат на обігрів і охолодження приміщень, які до цього неефективно використовувалися. Окрім цього, втрати, пов’язані з простроченими препаратами, скоротилися втричі, що мало прямий фінансовий ефект і позитивно позначилося на рівні відповідності до нормативних вимог фармацевтичного регулювання. Модель показала себе як високоточний і адаптивний інструмент, який забезпечив системне управління складською логістикою з урахуванням численних змінних і обмежень, характерних для фармацевтичного ринку. Вона також була інтегрована в діючу ERP-систему компанії, що дозволило забезпечити її автоматичне оновлення, щоденну синхронізацію з фактичними залишками та зменшення обсягів ручного втручання з боку персоналу. Таким чином, логістична модель продемонструвала свою ефективність не лише в аспекті зниження витрат, а й у забезпеченні якості обслуговування, підвищенні точності операцій і зміцненні позицій компанії на ринку медичної дистрибуції[11].

Удосконалення внутрішньозаводської логістики на машинобудівному підприємстві стало яскравим прикладом ефективного використання логістичного моделювання для підвищення операційної ефективності виробничого процесу. Підприємство, що спеціалізувалося на випуску сільськогосподарської техніки, мало розгалужену мережу виробничих цехів, між якими постійно переміщувалися напівфабрикати, заготовки та вузли, що проходили послідовну технологічну обробку. Традиційна схема організації внутрішнього переміщення базувалась на принципі періодичного відвантаження з цеху в цех із залученням обмеженої кількості внутрішньозаводського транспорту. Розподіл транспорту та формування маршрутів відбувались вручну, без чіткого алгоритму пріоретизації, у результаті чого виникали ситуації перевантаження одних ділянок виробництва й простою інших, несвоєчасного підвезення необхідних компонентів та накопичення залишків у проміжних точках логістичного ланцюга. Відсутність

адаптивної логістичної системи зумовлювала загальну нестабільність внутрішньозаводського потоку, що безпосередньо впливало на порушення графіків виробництва, збільшення витрат на тимчасове зберігання та зниження коефіцієнта використання устаткування.

Щоб змінити ситуацію, було запропоновано розробити й впровадити математично обґрунтовану логістичну модель внутрішньозаводських перевезень, яка б дозволила враховувати всі критично важливі фактори — від часу обробки виробничого замовлення та поточної завантаженості цехів до фізичних відстаней між логістичними вузлами й часових обмежень переміщення. Структура моделі передбачала побудову оптимізованого графіка маршрутів, у якому внутрішньозаводський транспорт використовувався з максимальною ефективністю, а всі замовлення отримували пріоритет відповідно до критичності їх виконання. Задля цього було введено систему коефіцієнтів важливості для кожного виду внутрішнього вантажу, яка залежала від стадії виробництва, запланованого терміну виконання, а також рівня навантаження на кінцевий склад готової продукції. Модель дала можливість у режимі симуляції змоделювати кілька сценаріїв роботи внутрішнього транспорту, в тому числі в умовах пікового завантаження, затримки обробки в окремому цеху або поломки техніки[29].

Під час симуляційного тестування було виявлено кілька критичних точок, де регулярно відбувалося накопичення напівфабрикатів через невдалу маршрутизацію або недостатню координацію з боку диспетчерського відділу. Наприклад, найчастіше це траплялося на вузлах перетину потоків із трьох і більше цехів, де при відсутності централізованої черговості виконання замовлень виникали конфлікти та простій техніки. Після впровадження алгоритмів управління маршрутизацією, що базувалися на аналізі завантаженості в реальному часі та пріоритетах виробничих партій, ситуацію вдалося кардинально змінити. Середній час переміщення продукції між цехами скоротився на 21%, що, у свою чергу, позитивно позначилося на ритмічності виробництва. Крім того, вдалося на 30% зменшити кількість

внутрішніх логістичних збоїв — випадків, коли переміщення не виконувалося в запланований термін або вантаж затримувався через неузгодженість дій між логістичними та виробничими підрозділами.

Надзвичайно важливою складовою успіху стало те, що модель була адаптована до інтеграції в систему оперативного управління виробництвом (MES — Manufacturing Execution System). Завдяки цьому рішення, сформовані моделлю, могли в автоматичному режимі відображатися в диспетчерській системі, оновлюватися в реальному часі залежно від поточної ситуації на виробництві, зменшуючи потребу в ручному втручанні та підвищуючи рівень автоматизації. Після впровадження моделі підприємство отримало не лише кращі операційні показники, але й можливість будувати довгострокові сценарії розвитку внутрішньої логістики з урахуванням майбутніх обсягів виробництва, модернізації цехів і розширення продуктового портфеля. Таким чином, оптимізація внутрішньозаводської логістики через проектування логістичної моделі довела свою ефективність як у поточному управлінні, так і в контексті стратегічного планування розвитку виробничої інфраструктури.

Оптимізація логістики в аграрному кластері на основі погодних прогнозів стала прикладом ефективного застосування інтелектуальної логістичної моделі в умовах високої залежності від зовнішніх нестабільних факторів, зокрема метеорологічних умов. Аграрний кооператив, що об'єднував декілька великих виробників сільськогосподарської продукції, зіткнувся з типовими для галузі проблемами в період збирання врожаю — а саме з простоєм техніки, неузгодженістю між операціями на полі та логістикою транспортування, а також із перенавантаженням елеваторів у дні пікового постачання. Розриви між фактичними можливостями збирання і пропускною здатністю логістичних вузлів призводили до того, що врожай або залишався на полі довше від допустимих агротехнічних строків, або накопичувався у транспорті, що чекало черги на вивантаження, втрачаючи якість або створюючи втрати. Через обмеженість технічних засобів і персоналу навіть короткочасні дощі або зниження температури могли повністю зламати

розроблений графік, змушуючи керівництво діяти в авральному режимі. Особливо критичними були ситуації, коли комбайни працювали в полі, а транспорт не встигав своєчасно забирати зібрану продукцію, що призводило до вимушених зупинок або до псування частини врожаю на стадії зберігання в кузові машин.

З метою усунення цих дисбалансів була розроблена логістична модель, яка інтегрувала прогнозні погодні дані з внутрішніми виробничими параметрами — темпами збирання окремих полів, кількістю задіяної техніки, черговістю обслуговування земельних ділянок, а також з доступністю транспортних одиниць і технічними характеристиками елеваторів. До складу моделі увійшли алгоритми оцінки часових вікон, коли ймовірність сприятливих погодних умов була найвищою, що дозволило формувати адаптивні графіки збирання. У системі щодня оновлювалися дані супутникового моніторингу, метеостанцій та локальних сенсорів, що надавали прогноз вологості повітря, опадів, швидкості вітру і температурного режиму. Ця інформація лягала в основу рішення щодо визначення послідовності польових робіт, черговості відправлення техніки на певні поля, а також формування завчасних логістичних маршрутів транспортування на основі розрахункових обсягів зібраного зерна[17].

Важливою складовою моделі стала автоматична координація обсягів збору з потужністю зберігання. Система щоденно оцінювала залишкову ємність елеваторів та формувала повідомлення про доступні обсяги, з урахуванням того, скільки тонн продукції очікується з конкретної ділянки. Це дозволяло уникати ситуацій, коли зерно одночасно прибувало з кількох полів, перевантажуючи приймальні пункти. За допомогою алгоритму було створено черговість відвантаження за принципом пріоритету — в першу чергу транспортувалися ті культури, які мали найменший термін допустимого перебування без охолодження або очищення. У разі прогнозованих дощів модель автоматично формувала рекомендацію щодо зміщення акценту на інші

поля з вищим рівнем готовності до збору або пропонувала консервацію оброблених ділянок на кілька днів.

Результати впровадження моделі виявилися більш ніж показовими. За перші два місяці сезону вдалося скоротити час простою транспорту на 28%, що означало суттєве підвищення ефективності використання машинного парку і зменшення витрат на очікування. Вивантаження на елеваторах проходило рівномірно, без черг і перевантажень, що зменшило знос обладнання та підвищило загальну пропускну здатність на 18%. Окрім цього, втрати продукції, пов’язані з порушенням термінів зберігання або псуванням у польових умовах, скоротилися практично до нуля, що було особливо важливо для збереження якісних характеристик продукції при постачанні на переробні підприємства. Значною перевагою моделі стала її здатність працювати в умовах невизначеності та реагувати на несподівані зміни без втручання людини — алгоритм самостійно адаптував графіки, перерозподіляв ресурси й оптимізував маршрути, підвищуючи гнучкість логістичної системи.

У цілому ця модель стала платформою для формування інтегрованої системи управління аграрною логістикою, яка поєднувала в собі прогнозування, диспетчеризацію, контроль якості, управління транспортом і складську логістику. Завдяки впровадженню цієї системи кооператив не лише зменшив прямі логістичні витрати, а й забезпечив своєчасне виконання зобов’язань перед партнерами, сформувавши позитивну репутацію як технологічно орієнтованого учасника ринку. Такий підхід до організації логістики, заснований на синтезі даних і математичному моделюванні, продемонстрував ефективність навіть у найскладніших умовах, підтвердивши необхідність переходу аграрного сектору до сучасних цифрових інструментів управління логістичними процесами[10].

Реальні приклади застосування логістичної моделі оптимізації розподілу ресурсів свідчать про її універсальність, багатофункціональність і високу здатність адаптації до специфіки підприємства, галузі чи логістичного контексту. Незалежно від розміру компанії, сфери діяльності або типу

логістичних процесів, модель виявляє свою ефективність як інструмент аналізу, прогнозування і прийняття рішень. Її гнучкість дозволяє одночасно вирішувати завдання зменшення витрат, підвищення точності доставки, раціонального використання інфраструктури та покращення внутрішньої взаємодії між логістичними елементами системи. Важливо, що успішне впровадження моделі передбачає не лише технічну реалізацію, а й глибоке розуміння логіки процесів, управлінську волю до змін, а також готовність до періодичного оновлення і вдосконалення системи на основі нових даних і викликів.

ВИСНОВКИ

Отже, в даній кваліфікаційній роботі здійснено комплексне дослідження теоретичних засад, методичних підходів і практичних механізмів проектування та впровадження логістичних моделей для оптимізації розподілу ресурсів у логістичних системах підприємств. З огляду на зростаючу складність сучасних логістичних ланцюгів, багатофакторний вплив зовнішніх та внутрішніх умов, а також динамічні зміни в попиті, вимогах клієнтів і технічних можливостях підприємств, застосування математично обґрунтованих моделей оптимізації стає об'єктивною необхідністю для забезпечення ефективного функціонування логістики. Робота поєднує теоретичний аналіз методів моделювання, їхню класифікацію, оцінку переваг і обмежень, а також глибоке дослідження процесів практичного проектування моделей, орієнтованих на підвищення ефективності розподілу ресурсів у різних галузевих контекстах.

У першому розділі було здійснено огляд сучасних підходів до моделювання логістичних процесів, що включають аналітичні, числові, імітаційні, гібридні та евристичні моделі. Узагальнено, що ефективне моделювання передбачає гнучке поєднання математичних методів з інформаційними технологіями, а також врахування галузевої специфіки та типу логістичної системи. Детально охарактеризовано застосування математичних методів, таких як лінійне програмування, задача комівояжера, теорія графів, моделі черг, а також імітаційне моделювання як інструмент побудови цифрових копій логістичних процесів, що дозволяє тестувати сценарії без ризику втручання в реальні операції. Було систематизовано переваги та обмеження імітаційного моделювання, описано спектр програмних інструментів, які забезпечують візуалізацію, гнучкість і точність аналізу.

У другому розділі було розглянуто прикладне застосування вищезгаданих методів у сфері оптимізації логістики. Зокрема, значну увагу

було приділено ролі імітаційного моделювання в удосконаленні складських, транспортних і дистрибуційних процесів. Проаналізовано інструментальні засоби (AnyLogic, Arena, FlexSim тощо) та практичні приклади ефективного впровадження моделей на підприємствах різних галузей — від фармацевтики до машинобудування й агросектору. Окреслено, що аналітичні й числові методи моделювання спрямовані передусім на побудову об’єктивних функціональних залежностей між логістичними змінними, що дозволяє здійснювати оптимальне планування маршрутів, рівнів запасів, завантаження складів та інших ресурсів.

У третьому розділі безпосередньо розроблено логістичну модель оптимізації розподілу ресурсів у логістичній системі підприємства. Було запропоновано поетапну методику її створення, що включає аналіз логістичної системи, постановку задачі, збір і підготовку вхідних даних, формалізацію процесів, побудову математичної структури моделі, її тестування, симуляцію, валідацію та інтеграцію в реальні бізнес-процеси. На прикладах підприємств торговельної, фармацевтичної, машинобудівної та аграрної галузей показано, як впровадження моделі дозволяє скоротити витрати, зменшити тривалість логістичного циклу, уникнути перевантаження системи в пікові періоди, підвищити точність та надійність операцій. Зокрема, продемонстровано, що правильно структурована модель дозволяє уникати простоїв, забезпечувати точне планування, знижувати обсяги нереалізованих запасів і формувати прозору систему управління ресурсами в режимі реального часу.

Практичні результати дослідження підтверджують, що логістичне моделювання, за умови правильного проектування та адаптації до специфіки підприємства, є потужним засобом управління, який не лише підвищує ефективність поточних операцій, а й створює основу для довгострокового стратегічного розвитку. Модель, що була розроблена у межах цієї роботи, продемонструвала свою здатність працювати в умовах нестабільного попиту, складної мережевої структури та багатофакторного середовища, що робить її універсальною для широкого спектра логістичних систем.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Polusmiak Y., Pavliuk T., Kosach I. Project management in construction: identifying logistics problems and optimization strategies // Management and Entrepreneurship: Trends of Development. – 2024. – Vol. 4, No. 30. – P. 69–78.

2. Бережна Л. В. Моделювання логістики безперервного виробництва : дис. ... д-ра екон. наук / спец. 08.03.02 «Економіко-математичне моделювання». – Київ, 2005. – 244 с.

3. Бич О. П. Управління логістичними бізнес-процесами аграрної компанії. – Дніпро : ДДАЕУ, 2023. – 127 с.

4. Вівчар О. І. Моделювання логістичних процесів в контексті ремонтно-будівельних підприємств. – Львів : НУ «ЛП», 2012. – 107 с.

5. Глущенко М. І., Кічкіна О. І. Моделювання процесів транспортного обслуговування логістичних систем : дис. ... д-ра техн. наук / Східноукр. нац. ун-т ім. В. Даля. – Луганськ, 2015. – 260 с.

6. Жежель В. К., Риженко О. В. Удосконалення логістичних процесів в управлінні підприємством : дис. ... д-ра екон. наук. – Чернігів, 2021. – 231 с.

7. Іванов С. М., Глазков М. В. Моделювання логістичних процесів імпорту морепродуктів в умовах пошкодженої інфраструктури // Економічний вісник Донбасу. – 2024. – № 2. – С. 61–69.

8. Касьяненко В. Є. Моделювання впливу технологічного розвитку на міжнародні логістичні процеси. – Харків : ХНАДУ, 2024. – 139 с.

9. Кігель В. Р. Оптимізація логістичних рішень. – Київ : Університет економіки та права «КРОК», 2007. – 176 с.

10. Мащак Н. М. Оптимізація логістичних процесів підприємства на основі використання цифрових інновацій // Академічні візії. – 2024. – № 34. – С. 42–48.

11. Миколенко Р. О., Жебка В. В., Корецька В. О. Оптимізація математичної моделі логістичних потоків торгівельної мережі // Телекомунікаційні та інформаційні технології. – 2022. – № 2. – С. 23–31.

12.Плекан У. М., Цьонь О. П., Гевко Б. Р., Антонюк О. П. Аналіз логістичних витрат підприємства // Вісник машинобудування та транспорту. – 2023. – Т. 17, № 1. – С. 114–120.

13.Потапова Н., Волонтир Л. Метод моделювання в управлінні запасами ієрархічних логістичних систем // Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences. – 2022. – № 315(6). – P. 87–93.

14.Потапова Н., Волонтир Л. Метод моделювання в управлінні запасами ієрархічних логістичних систем // Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences. – 2023. – № 317(1). – P. 174–180.

15.Псарьов А. М. Використання штучного інтелекту в оптимізації логістичних процесів на підприємствах торгівлі : кваліфікац. магіст. робота. – Суми : СумДУ, 2024. – 91 с.

16.Птиця Н. В., Мельник О. С. Використання штучного інтелекту для оптимізації логістичних процесів. – Київ : НУБіП України, 2024. – 113 с.

17.Рій С. Моделювання логістичної системи торгівельного підприємства. – Одеса : ОНУ, 2023. – 93 с.

18.Савейко А. М. Моделювання логістичних бізнес-процесів : дис. ... д-ра екон. наук. – Київ, 2023. – 248 с.

19.Савенко І. І., Седіков Д. В. Логістичний менеджмент як інструмент оптимізації логістичних витрат // Food Industry Economics. – 2020. – Т. 12, № 3. – С. 112–119.

20.Самодай В., Донський М., Гладун М. Оптимізація управління логістичними витратами в діяльності підприємств // Економіка та суспільство. – 2023. – № 55. – С. 94–101.

21.Саханд А. Імітаційне моделювання логістичної системи. – Київ : КНЕУ, 2023. – 84 с.

22.Скляр Я. В. Оптимізація логістичних бізнес-процесів підприємства. – Дніпро : УАДУ, 2023. – 116 с.

23.Стадник Ю. А. Моделювання логістичних процесів // Збірник тез доповідей. – Харків : НТУ «ХПІ», 2023. – С. 103–105.

24.Таланчук П. М., Забара С. С., Дехтярук М. Т. Автоматизована система оптимізації розподілу автомобілів по об'єктах перевезень // Управляющие системы и машины. – 2013. – № 6. – С. 3–12.

25.Тараненко Ю. В., Федоренко І. К. Імітаційне моделювання логістичних процесів // Вісник Київ. нац. ун-ту імені Тараса Шевченка. Економіка. – 2016. – № 8. – С. 38–44.

26.Харченко М. В. Управління логістичними витратами аеропорту. – Київ : НАУ, 2018. – 128 с.

27.Чушенко О. М. Організація логістичних процесів на виробничому підприємстві. – Одеса : ОНУ, 2024. – 142 с.

28.Шмалій Я. К. Економічна аналітика реалізації логістичних операцій підприємства в умовах воєнного стану. – Львів : ЛНУ ім. Івана Франка, 2024. – 118 с.

29.Шмуйло К. С. Моделювання економічної ефективності логістичних операцій збутової діяльності підприємства. – Чернівці : ЧНУ, 2024. – 95 с.

30.Якушенко О. С. Навчально-методичний комплекс з дисципліни "Математичні методи моделювання та оптимізації транспортних систем і процесів". – Харків : НТУ «ХПІ», 2022. – 95 с.

ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ (ПРЕЗЕНТАЦІЯ)

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ДИПЛОМНА РОБОТА НА ТЕМУ:

“МЕТОДИ МОДЕЛЮВАННЯ ЛОГІСТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ ДЛЯ ЇХ ОПТИМІЗАЦІЇ”

Виконав студент групи
САД-41, Сторчак М.С.
Керівник дипломного проекту
Доц. Ровіл Нафєєв

Вступ

Актуальність:

зумовлена ускладненням логістичних систем, потребою в зниженні витрат, прискоренні доставки та адаптації до змін середовища. В сучасних умовах підприємства впроваджують математичне та імітаційне моделювання для аналізу логістики без ризику для реальних процесів.

Мета дослідження:

Метою роботи є розробка та впровадження методів моделювання логістичних процесів для підвищення ефективності їх функціонування та оптимізації використання ресурсів.

Об’єкт і предмет дослідження:

Об’єкт дослідження: логістичні процеси в системах постачання, транспортування, складування

Предмет дослідження: методи математичного та імітаційного моделювання етапів логістичних процесів з метою подальшої оптимізації.

Завдання дослідження

- аналіз логістичних систем та сучасних методів моделювання
- побудова моделі логістичного процесу
- оцінка ефективності рішень та економічної доцільності впровадження
- розробка практичних рекомендацій

Огляд сучасних підходів для моделювання логістичних процесів

Ключовими викликами логістики є ускладнення ланцюгів постачання, зростаюча потреба в точному прогнозуванні та оптимізації процесів, а також необхідність швидкої адаптації до динамічних змін у зовнішньому середовищі.

Класифікація моделей

- За рівнем формалізації: аналітичні, імітаційні, гібридні
- За способом подання: дискретні / неперервні
- За часом: статичні / динамічні
- За метою: описові, оптимізаційні, прогнозні

Математичні підходи

Транспортні та мережеві моделі	Теорія графів і масового обслуговування	Лінійне та нелінійне програмування

Імітаційне моделювання

Аналіз систем у динаміці з урахуванням випадкових подій	Використання: AnyLogic, Arena, Simul8, FlexSim	Переваги: візуалізація, тестування сценаріїв, висока деталізація

Використання математичних методів аналізу логістичних систем

Математичні методи дозволяють формалізувати логістичні процеси та знаходити оптимальні рішення в умовах складності, динаміки та невизначеності. Вони є основою як для поточних розрахунків, так і для стратегічного планування.

Основні методи

- Лінійне програмування: оптимізація ресурсів, вибір маршрутів, управління запасами.
- Нелінійне програмування: врахування складних взаємозв'язків у системі.
- Теорія масового обслуговування: прогнозування навантаження на склади та термінали.
- Транспортні та мережеві моделі: мінімізація витрат на доставку, оптимальні маршрути.
- Теорія графів: візуалізація та аналіз логістичних мереж.
- Імовірнісні та статистичні методи: прогнозування попиту, аналіз ризиків.

Математичний метод	Сфера застосування в логістиці	Основні переваги	Основні обмеження
Лінійне програмування	Оптимізація розподілу ресурсів, складування, вибір маршрутів доставки	Простота реалізації, чітке математичне рішення, ефективність при великих обсягах	Лише лінійні залежності, складність адаптації до змін у динамічних умовах
Нелінійне програмування	Оптимізація зі змінними витратами, комплексне планування ресурсів	Врахування складних взаємозв'язків, точніші результати	Високі обчислювальні витрати, складність побудови моделей
Теорія масового обслуговування	Прогнозування черг на складах, у логістичних центрах, терміналах	Моделювання стохастичних процесів, аналіз завантаження систем	Висока залежність від точності вхідних імовірнісних даних
Транспортна модель	Побудова маршрутів поставок між кількома пунктами, мінімізація витрат	Прямий алгоритм розв'язання, ефективність у класичних задачах доставки	Не враховує складні маршрути, обмеження на реальні логістичні умови
Мережеві моделі	Оптимізація розподільних мереж, маршрутизація у багаторівневих системах	Моделювання складних структур, використання реальних обмежень	Складність при масштабуванні, потреба в детальній топології
Теорія графів	Візуалізація маршрутів, пошук найкоротших шляхів, побудова логістичних мереж	Універсальність, швидкість пошуку оптимальних рішень	Не враховує стохастичні або економічні показники без додаткових модифікацій
Статистичні методи	Прогнозування попиту, аналіз залежностей, оцінка ефективності операцій	Виявлення закономірностей, робота з великими масивами даних	Залежність від репрезентативності даних, ризик помилкових висновків
Імовірнісні методи (ланцюги Маркова)	Аналіз поведінки систем у часі, моделювання перехідних станів логістичних елементів	Врахування випадковості та переходів, побудова моделей для довгострокового планування	Потреба в точних ймовірностях переходів, обмеження на структуру станів
Комбінаторні методи	Розміщення складів, задачі комплектування замовлень, розв'язання задач маршрутизації	Рішення складних дискретних задач, використання евристичних підходів	Велика кількість варіантів, обчислювальна складність
Оптимізаційні алгоритми (евристики, генетичні)	Задачі комівояжера, багатокритеріальна маршрутизація, адаптивне планування поставок	Гнучкість, можливість адаптації до різних задач	Не завжди гарантують глобально оптимальний результат, потреба в налаштуванні параметрів

Аналіз математичних методів, що застосовуються у моделюванні логістичних систем

Роль імітаційного моделювання у вдосконаленні логістичних процесів

Імітаційне моделювання дозволяє створювати цифрові копії логістичних процесів, тестувати сценарії та приймати рішення без ризиків для реальної системи.

Ключові можливості

Аналіз складних, динамічних і стохастичних логістичних систем

Виявлення вузьких місць і прогноз наслідків управлінських рішень

Візуалізація, експерименти та тестування альтернатив

Сфера застосування	Основні можливості імітаційного моделювання	Очікуваний ефект
Складська логістика	Оптимізація розміщення стелажів, переміщення товарів, завантаження ресурсів	Зменшення затримок, підвищення швидкості обробки замовлень, ефективність простору
Транспортна логістика	Побудова маршрутів, управління чергами, планування графіків перевезень	Скорочення часу доставки, зниження витрат на транспортування, краща маршрутизація
Управління запасами	Урахування коливань попиту, затримок доставки, впливу зовнішніх чинників	Зменшення дефіциту або надлишку, підвищення точності планування
Виробнича логістика	Синхронізація виробництва з логістикою, регулювання обсягів напівфабрикатів	Підвищення продуктивності, зменшення простоїв, оптимізація черговості операцій

Сфери застосування імітаційного моделювання у логістиці

Обмеження / виклик	Суть проблеми	Вплив на ефективність моделювання	Можливі шляхи подолання
Складність побудови моделі	Необхідність ретельного збору даних, налаштування алгоритмів і логіки функціонування системи	Збільшує тривалість проєкту, потребує високої кваліфікації персоналу	Стандартизація процесів, використання готових шаблонів моделей
Високі вимоги до якості вхідних даних	У разі неточностей у даних — отримання некоректних результатів	Може призвести до помилкових управлінських рішень	Використання актуальних даних, валідація і перевірка джерел
Обмежена адаптивність моделей	Деякі моделі створені для вузьких задач і важко адаптуються до нових сценаріїв	Знижує гнучкість при масштабуванні або зміні умов	Створення гібридних моделей, використання універсальних інструментів
Високі фінансові витрати на впровадження	Закупівля ліцензій, навчання персоналу, інтеграція в IT-інфраструктуру	Може стримувати рішення про використання моделювання у малому та середньому бізнесі	Застосування хмарних рішень, відкритого ПЗ, поступове впровадження поетапно
Необхідність міждисциплінарних знань	Потреба у володінні знаннями з логістики, IT, математичного моделювання	Обмежує коло фахівців, здатних повноцінно працювати з інструментами моделювання	Командна робота спеціалістів, розробка освітніх курсів для логістичних аналітиків
Повільна окупність	Економічна ефективність виявляється не відразу, а після кількох циклів впровадження	Зниження мотивації до використання в короткостроковій перспективі	Формування KPI для довгострокового аналізу вигоди від моделювання

Обмеження та виклики впровадження імітаційного моделювання у логістиці

Використання аналітичних і числових методів для оптимізації логістичних маршрутів та розподілу ресурсів

Ціль

Раціоналізація маршрутів і розподілу ресурсів для зниження витрат, підвищення швидкості доставки та ефективності логістичних операцій.

Ключові методи

Комбіновані: задача комівояжера, багатокритеріальна оптимізація

Числові: генетичні алгоритми, мурашині алгоритми, Монте-Карло

Аналітичні: лінійне/нелінійне програмування, теорія графів, EOQ-моделі

Метод	Тип методу	Сфера застосування	Основна мета
Лінійне програмування	Аналітичний	Розподіл ресурсів, вибір оптимального плану	Мінімізація витрат, врахування обмежень
Нелінійне програмування	Аналітичний	Складні логістичні задачі з нелінійною залежністю	Оптимізація витрат із врахуванням нелінійностей
Теорія графів	Аналітичний	Побудова маршрутів, оптимізація мереж	Пошук найкоротших або найефективніших шляхів
Задача комівояжера	Комбінований	Планування маршрутів доставки	Мінімізація загальної довжини маршруту
Генетичні алгоритми	Числовий	Мережеве планування, багатокритеріальні задачі	Пошук наближеного глобального оптимуму
Мурашині алгоритми	Числовий	Транспортна логістика, маршрутизація	Самоорганізація і пошук ефективних шляхів
Метод Монте-Карло	Числовий	Оцінка ризиків, сценарний аналіз	Імітація варіантів при невизначених умовах
Багатокритеріальна оптимізація	Аналітичний / числовий	Вибір між витратами, швидкістю, сервісом	Баланс між конфліктними цілями
Моделі управління запасами (EOQ)	Аналітичний	Управління обсягами замовлень	Зниження витрат на зберігання та поповнення
Алгоритм Дейкстри	Аналітичний	Пошук оптимального шляху в мережі	Визначення найкоротшого шляху між точками мережі

Класифікація аналітичних і числових методів в оптимізації логістики

Метод	Критерій оптимізації	Швидкість обчислень	Масштабованість	Приклад використання
Алгоритм Дейкстри	Найкоротший шлях	Висока	Висока	Побудова оптимального шляху між складами
Алгоритм Беллмана–Форда	Найкоротший шлях із від'ємними дугами	Середня	Висока	Аналіз маршруту з обмеженням часу та витрат
Задача комівояжера (жадібна евристика)	Мінімальна загальна довжина шляху	Середня	Обмежена при N>20	Оптимізація доставки у сфері e-commerce
Генетичний алгоритм	Багатокритеріальна оптимізація	Залежить від налаштувань	Висока	Складне планування в національних логістичних мережах
Мурашиний алгоритм	Найефективніша траєкторія	Помірна	Висока	Самоорганізація маршрутів доставки палива

Порівняльний аналіз методів побудови логістичних маршрутів

Модель	Об'єкт управління	Основний параметр оптимізації	Результат використання
EOQ (Economic Order Quantity)	Обсяг замовлення	Мінімізація сумарних витрат на замовлення і зберігання	Визначення оптимального розміру партії постачання
Модель з фіксованим інтервалом	Частота замовлень	Забезпечення регулярного поповнення запасів	Формування графіка поставок із фіксованим періодом
Модель з фіксованим рівнем поповнення	Мінімальний запас	Поповнення запасу до певного рівня	Забезпечення стабільного рівня обслуговування
Багаторівнева модель постачання	Запаси в розподільчій мережі	Баланс між рівнем запасів і витратами на логістику	Раціоналізація ресурсного забезпечення в багатоскладських мережах
Модель розподілу потужностей	Транспорт / складські ресурси	Максимізація використання доступної інфраструктури	Зменшення простоїв, оптимізація графіка навантаження

Аналітичні моделі розподілу ресурсів у логістиці

Основні етапи впровадження розробленої логістичної моделі

Мета розробленої логістичної моделі
для зниження витрат, покращення сервісу та забезпечення гнучкості

Ключові етапи

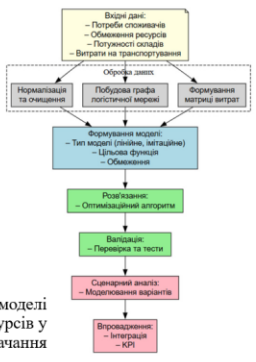
Аналіз логістичної системи: виявлення проблем у постачанні, запасах, витратах і ресурсах.

Збір і підготовка даних: нормалізація інформації з ERP, облікових систем, звітів.

Побудова математичної моделі: визначення змінних, обмежень і цільової функції.

Симуляція та тестування: віртуальне моделювання сценаріїв - сезонні піки, затримки, аварійні ситуації.

Інтеграція в систему управління: зв'язок із ERP, TMS, WMS. Впровадження через внутрішні регламенти



Структурна схема побудови логістичноїмоделі оптимізації розподілу ресурсів у системіпостачання

Алгоритм побудови і реалізації логістичної моделі методом імітаційного моделювання

Приклади практичного застосування моделі у реальних умовах

Торговельна мережа

Оптимізація транспортних маршрутів понад 80 об'єктів

Врахування місткості, графіків, обсягів і попиту

Результати

-16% довжини маршрутів

+11% економія витрат

+92% заповненість транспорту

Фармацевтична компанія

Раціоналізація складування на базі ABC/XYZ-аналізу

Динамічне розміщення товару, міжскладський перерозподіл

Результати

-13% витрат на утримання складів

-3х зменшення втрат від прострочення

+99,2% точності формування замовлень

Машинобудівне підприємство

Впровадження моделі внутрішньозаводської логістики

Урахування маршрутів, черговості, навантаження

Результати

-21% часу переміщення

-30% збоїв у логістиці

Інтеграція з MES для реального часу

Висновки

У дипломній роботі всебічно досліджено процес створення та впровадження логістичних моделей оптимізації розподілу ресурсів, що враховують складність сучасних логістичних систем, динамічність середовища та галузеву специфіку.

Практичні результати впровадження моделі засвідчили її ефективність як інструменту підвищення операційної продуктивності, зниження витрат і стратегічного планування в логістиці підприємств різних галузей.

Дякую за увагу!