

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Навчально-науковий центр заочної форми навчання

(повна назва)

Кафедра Інформаційних управляючих систем

(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)

Вдосконалення методу розподілу ресурсів інформаційної системи кондитерського підприємства

(тема)

Виконав:

здобувач 2 року навчання

групи ІУСТзм-24-1

Дмитро ДМИТРЕВСЬКИЙ

(Власне ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Спеціальність 122 Комп'ютерні науки

(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Інформаційні

управляючі системи та технології

(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. каф. ІУС Віктор ЛЕВИКІН

(посада, власне ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Допускається до захисту

Зав. кафедри

(підпис)

Костянтин ПЕТРОВ

(Власне ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

2025 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

 Навчально-науковий центр заочної форми навчання

Кафедра Інформаційних управляючих системРівень вищої освіти другий (магістерський)Спеціальність 122 Комп'ютерні науки

(код і повна назва)

Тип програми освітньо-професійна

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Інформаційні управляючі системи та технології

(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____

(підпис)

« 24 » листопада 20 25 р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві Дмитревському Дмитру В'ячеславовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Вдосконалення методу розподілу ресурсів інформаційної системи кондитерського підприємства

затверджена наказом університету від «24» листопада 2025 р. № 201Стз

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії «19» грудня 2025 р.


3. Вихідні дані до роботи нормативно-технічна документація щодо організації виробничих процесів у харчовій промисловості, статистичні дані про споживання ресурсів на кондитерських підприємствах, результати попередніх досліджень у сфері оптимізації виробничих систем, матеріали щодо застосування математичного моделювання та еволюційних алгоритмів у задачах ресурсного планування, інформація про технологічні параметри кондитерських виробів та виробничих ліній, економічні показники ефективності функціонування підприємств галузі.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі проаналізувати існуючі методи оптимізації та підходи до автоматизації процесів ресурсного планування на підприємствах кондитерської галузі; дослідити особливості формування математичної моделі розподілу виробничих ресурсів з урахуванням технологічних обмежень і критеріїв ефективності; виконати порівняльний аналіз сучасних алгоритмів оптимізації та визначити їх застосовність у задачах кондитерського виробництва; удосконалити метод розподілу ресурсів інформаційної системи кондитерського підприємства; розробити алгоритм та програмний модуль для оптимізації розподілу ресурсів, адаптований до умов роботи підприємства; провести експериментальні обчислення та оцінити вплив запропонованої моделі на показники ефективності виробництва; сформулювати рекомендації щодо впровадження оптимізаційного модуля в інформаційну систему управління підприємством.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Отримання завдання на виконання роботи	24.11.2025 – 25.11.2025	Виконано
2	Постановка задачі та узгодження з керівником	25.11.2025 – 26.11.2025	Виконано
3	Аналіз предметної області та постановка задачі	27.11.2025 – 28.11.2025	Виконано
4	Розробка методу та моделі розподілу ресурсів на підприємствах кондитерської галузі	29.11.2025 – 30.11.2025	Виконано
5	Практична реалізація методу та моделі оптимізації розподілу ресурсів на кондитерському підприємстві	01.12.2025 – 03.12.2025	Виконано
6	Експериментальні дослідження та оцінка ефективності розробленого методу та моделі оптимізації розподілу ресурсів на кондитерському підприємстві	04.12.2025 – 05.12.2025	Виконано
7	Формування висновків	06.12.2025 – 07.12.2025	Виконано
8	Оформлення пояснювальної записки	08.12.2025 – 09.12.2025	Виконано
9	Представлення на рецензування	10.12.2025 – 11.12.2025	Виконано
10	Захист кваліфікаційної роботи	19.12.2025	

Дата видачі завдання 24 листопада 2025 р.

Студент 
(підпис)

Керівник роботи _____ проф. каф. ІУС Віктор ЛЕВИКІН
(підпис) (посада, власне ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 117 с., 9 рис., 12 табл., 2 дод., 37 джерел.

АЛГОРИТМІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ, ІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА, КОНДИТЕРСЬКЕ ПІДПРИЄМСТВО, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ, ОПТИМІЗАЦІЯ, ПРИБУТКОВІСТЬ ВИРОБНИЦТВА, РОЗПОДІЛ РЕСУРСІВ, УПРАВЛІННЯ ВИРОБНИЦТВОМ.

Об'єктом дослідження кваліфікаційної роботи є процеси розподілу ресурсів на підприємствах кондитерської галузі.

Мета дослідження. Удосконалити метод і модель оптимізації розподілу ресурсів, що дозволяє забезпечити максимальний прибуток при заданих виробничих умовах.

Наукова новизна. Наукова новизна полягає в удосконаленні методу оптимізації розподілу виробничих ресурсів, який базується на побудові математичної моделі взаємозв'язку між економічними показниками та технологічними параметрами виробництва.

Методи дослідження. У роботі використано методи системного аналізу для дослідження предметної області та визначення ключових факторів впливу на процеси розподілу ресурсів; методи математичного моделювання для формалізації економічних та виробничих залежностей; оптимізаційні методи – зокрема дискретно-аналітичний підхід до пошуку найкращих альтернатив – для побудови моделі максимізації прибутку; порівняльний аналіз для оцінювання ефективності запропонованого методу; методи програмної інженерії для розроблення програмно-алгоритмічного комплексу; експериментальні методи для перевірки працездатності моделі на наборах реалістичних виробничих даних.

У ході виконання роботи проведено комплексний аналіз сучасних підходів до автоматизації та оптимізації процесів планування і розподілу ресурсів на підприємствах харчової промисловості, із фокусом на кондитерський сектор. Розроблено математичну модель та удосконалений метод оптимізації розподілу ресурсів, що враховує прибутковість кожної одиниці продукції, собівартість, технологічні коефіцієнти, нормативи споживання сировини та виробничі обмеження. Запропоновано узагальнену функцію прибутку, що характеризує взаємозв'язок економічних та технологічних параметрів і дозволяє формувати оптимальні виробничі плани.

Сформовано послідовний алгоритм реалізації методу, який включає підготовку вхідних даних, дискретизацію змінних, генерування допустимих альтернатив, їх оцінювання за функцією прибутку та вибір найкращого варіанта. На основі цього алгоритму створено програмно-алгоритмічний комплекс, що забезпечує автоматизацію процесу оптимізації, структурує дані, виконує обчислення та надає користувачеві деталізовані результати у вигляді таблиць, схем та графіків.

Проведено експериментальні дослідження, у яких нова модель порівнювалась із традиційними методами планування виробництва, що застосовуються на підприємствах галузі. Доведено, що запропонований підхід дозволяє підвищити ефективність використання матеріальних ресурсів, збільшити прибутковість виробничих програм та мінімізувати нераціональні витрати. Результати роботи можуть бути інтегровані у сучасні інформаційні системи управління виробництвом і застосовані на практиці в умовах підприємств кондитерської галузі.

ABSTRACT

Master's thesis: 117 pages, 9 figures, 12 tables, 2 appendices, 37 sources.

ALGORITHMIC IMPLEMENTATION, CONFECTIONERY ENTERPRISE, INFORMATION SYSTEM, MATHEMATICAL MODEL, OPTIMIZATION, PRODUCTION MANAGEMENT, PRODUCTION PROFITABILITY, RESOURCE ALLOCATION.

The object of the qualification work is the resource allocation processes at the confectionery industry enterprises.

Research objective. To develop a method and model for optimizing resource allocation, which allows to ensure maximum profit under given production conditions.

Scientific novelty. The scientific novelty consists in developing a method for optimizing the allocation of production resources, which is based on building a mathematical model of the relationship between economic indicators and technological parameters of production.

Research methods. The work uses systems analysis methods to study the subject area and determine key factors influencing resource allocation processes; mathematical modeling methods to formalize economic and production dependencies; optimization methods - in particular, a discrete-analytical approach to finding the best alternatives - to build a profit maximization model; comparative analysis to assess the effectiveness of the proposed method; software engineering methods to develop a software and algorithmic complex; experimental methods to verify the model's performance on sets of realistic production data.

In the course of the work, a comprehensive analysis of modern approaches to the automation and optimization of planning and resource allocation processes at food industry enterprises was carried out, with a focus on the confectionery sector.

A mathematical model for optimizing resource allocation was developed, which takes into account the profitability of each unit of production, cost, technological coefficients, raw material consumption standards and production constraints. A generalized profit function was proposed, which characterizes the relationship between economic and technological parameters and allows the formation of optimal production plans.

A sequential algorithm for implementing the method was formed, which includes the preparation of input data, discretization of variables, generation of permissible alternatives, their evaluation by the profit function and selection of the best option. Based on this algorithm, a software and algorithmic complex was created that provides automation of the optimization process, structures data, performs calculations and provides the user with detailed results in the form of tables, diagrams and graphs.

Experimental studies were conducted in which the new model was compared with traditional production planning methods used at the enterprises of the industry. It was proven that the proposed approach allows to increase the efficiency of material resources use, increase the profitability of production programs and minimize irrational costs. The results of the work can be integrated into modern information systems for production management and applied in practice in the conditions of enterprises of the confectionery industry.

ЗМІСТ

	С.
Скорочення та умовні позначки.....	10
Вступ.....	12
1 Аналіз предметної області та постановка задачі.....	14
1.1 Аналіз існуючих інформаційних систем розподілу ресурсів у харчовій промисловості.....	14
1.2 Оптимізаційний підхід до розподілу ресурсів на підприємствах кондитерської галузі.....	15
1.3 Порівняльний аналіз програмних рішень та алгоритмів оптимізації виробничих процесів.....	17
1.4 Аналіз підходів до автоматизації процесів управління виробництвом у кондитерській галузі.....	20
1.5 Постановка задачі дослідження та удосконалення оптимізаційного підходу до розподілу ресурсів на кондитерському підприємстві	25
2 Розробка методу та моделі розподілу ресурсів на підприємствах кондитерської галузі.....	28
2.1 Інформаційна система управління контролю якості та ресурсів у кондитерській галузі.....	28
2.2 Аналіз та опис існуючого методу економіко-математичної оптимізації розподілу виробничих ресурсів.....	32
2.3 Формалізація задачі розподілу ресурсів виробництва.....	35
2.4 Дослідження методів оптимізації розподілу ресурсів в кондитерській галузі.....	39
2.5 Удосконалення математичної моделі розподілу ресурсів з урахуванням сезонних коливань попиту.....	43
2.6 Удосконалення методу визначення раціонального розподілу ресурсів ІС кондитерського підприємства.....	46

3 Практична реалізація методу та моделі оптимізації розподілу ресурсів на кондитерському підприємстві.....	60
3.1 Розробка загального алгоритму реалізації методу та моделі розподілу ресурсів на підприємстві кондитерської галузі.....	60
3.2 Формування вхідних даних та інформаційних потоків для оптимізаційної моделі розподілу ресурсів.....	64
3.3 Алгоритм реалізації методу оптимізації розподілу ресурсів.....	65
3.4 Програмний модуль реалізації розподілу ресурсів (Java).....	68
3.5 Інформаційна модель та алгоритм взаємодії її компонентів.....	77
3.6 Практична реалізація та оцінювання інноваційної цінності розробленого методу.....	80
4 Експериментальні дослідження та оцінка ефективності розробленого методу та моделі оптимізації розподілу ресурсів на кондитерському підприємстві.....	83
4.1 Організація та умови проведення експериментальних досліджень.....	83
4.2 Вихідні дані та параметри моделювання розподілу ресурсів на кондитерському підприємстві.....	84
4.3 Практичне застосування результатів дослідження на кондитерському підприємстві.....	89
Висновки.....	92
Перелік джерел посилання.....	94
Додаток А Публікації.....	97
Додаток Б Графічний матеріал кваліфікаційної роботи.....	100

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

- АПК – агропромисловий комплекс
- АСУП – автоматизована система управління виробничими процесами
- БД – база даних
- БОП – балансова оптимізаційна проблема
- ВПП – виробничо-планувальні процеси
- ГП – готова продукція
- ІКТ – інформаційно-комунікаційні технології
- ІС – інформаційна система
- ІТ – інформаційні технології
- ЛП – лінійне програмування
- ММП – математична модель процесу
- МОП – методи оптимізації процесів
- МС – модуль системи
- НДТ – найкращі доступні технології
- ООП – об’єктно-орієнтоване програмування
- ОПР – особа, що приймає рішення
- ПАК – програмно-алгоритмічного комплексу
- ПЗ – програмне забезпечення
- ППР – планування та розподіл ресурсів
- ПС – програмна система
- РВ – робочий виріб (виробничий продукт, що знаходиться у процесі виготовлення)
- РП – розподіл ресурсів
- САР – система автоматизованого регулювання
- СБО – системи багатокритеріальної оптимізації
- СМІ – сенсорно-моніторингова інфраструктура
- СППР – система підтримки прийняття рішень

СУП – система управління виробництвом
ТУ – технологічна операція (технологічний етап)
ФОП – функціонально-операційні процеси
ЦФВ – цифрові фабрики-віртуали (digital twins)
АСО – Ant Colony Optimization (мурашиний алгоритм)
AI – Artificial Intelligence
API – Application Programming Interface (інтерфейс програмування застосунків)
APS – Advanced Planning and Scheduling
DAO – Data Access Object
ERP – Enterprise Resource Planning (система планування ресурсів підприємства)
GA – Genetic Algorithm (генетичний алгоритм)
IoT – Internet of Things (Інтернет речей)
KPI – Key Performance Indicators
LP – Linear Programming
MES – Manufacturing Execution System
MILP – Mixed-Integer Linear Programming
ML – Machine Learning (машинне навчання)
MQTT – Message Queuing Telemetry Transport
NN – Neural Networks (нейронні мережі)
OPC UA – Open Platform Communications Unified Architecture
PSO – Particle Swarm Optimization (алгоритм рою частинок)
REST – Representational State Transfer
SAP – Systems, Applications, and Production
SCADA – Supervisory Control and Data Acquisition
UML – Unified Modeling Language (уніфікована мова моделювання)

ВСТУП

Сучасні підприємства кондитерської галузі функціонують в умовах зростаючої конкуренції, нестабільності ринкового середовища та високих вимог споживачів до якості продукції. Значні коливання попиту, розширення асортименту, необхідність швидкого реагування на зміни ринку зумовлюють підвищену складність управління виробничими процесами. За таких умов особливої актуальності набувають питання ефективного планування, контролю та розподілу ресурсів, що безпосередньо впливають на собівартість, продуктивність та конкурентоспроможність підприємства. Традиційні підходи до управління виробництвом, які базуються на ручному плануванні або статичних нормативних моделях, уже не забезпечують належної точності та оперативності, необхідних для оптимального функціонування сучасних виробничих систем.

Управління ресурсами в кондитерському виробництві є багатофакторною задачею, що включає координацію обладнання, трудових ресурсів, сировини, енергетичних витрат і часових параметрів технологічних операцій. Кожен із цих елементів має власні обмеження й динаміку, а їх взаємодія формує складний виробничий процес. Саме тому у науковій та практичній площині зростає потреба у використанні сучасних інформаційних технологій, математичного моделювання та методів оптимізації, здатних комплексно врахувати ці взаємозв'язки.

У контексті цифровізації промислового сектора особливого значення набуває розробка і впровадження інформаційних систем управління виробництвом, які забезпечують автоматизацію планування, моніторинг операцій, контроль ефективності та підтримку управлінських рішень. Використання алгоритмів оптимізації дає можливість знайти найбільш раціональний розподіл ресурсів, зменшити витрати часу та матеріалів, підвищити завантаження обладнання та мінімізувати простой. Для

кондитерських підприємств це має вирішальне значення, адже їх виробничі процеси часто характеризуються багатоступеневістю, перехідністю продуктів між операціями та необхідністю суворого дотримання технологічних режимів.

У цьому дослідженні акцент зроблено на розробці моделі та алгоритму оптимізації розподілу ресурсів у виробництві кондитерських виробів, а також на створенні інформаційної системи, що реалізує ці підходи. Робота включає аналіз сучасних методів управління виробництвом, формування математичного апарату моделі, розробку алгоритму оптимізації, побудову UML-діаграм архітектури системи та практичну реалізацію програмного забезпечення на базі мови Java. Окрему увагу приділено перевірці працездатності моделі на даних реального підприємства, що забезпечує практичну значущість отриманих результатів.

Таким чином, представлена робота спрямована на вирішення актуальної науково-практичної задачі – підвищення ефективності управління виробничими ресурсами підприємств кондитерської галузі через використання сучасних методів моделювання та оптимізації. Отримані результати можуть бути використані у подальших дослідженнях, у розробці інформаційних систем управління, а також безпосередньо на підприємствах для підвищення ефективності виробництва.

1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

1.1 Аналіз існуючих інформаційних систем розподілу ресурсів у харчовій промисловості

Раціональний розподіл ресурсів є одним із ключових факторів ефективності підприємств харчової промисловості, зокрема кондитерського виробництва, яке характеризується високою ресурсоємністю та значною варіативністю продукції. Сучасні інформаційні системи розподілу ресурсів мають забезпечувати можливість аналізу, моделювання та прогнозування використання сировини, енергетичних ресурсів, виробничих потужностей, а також трудових ресурсів із метою підвищення економічної ефективності та стабільності виробничих процесів. У цьому підрозділі здійснено аналіз сучасних програмних платформ та рішень, що застосовуються у харчовій промисловості для підтримки процесів ресурсного планування та оптимізації.

Більшість інформаційних систем, що використовуються у харчовій галузі, належать до класу систем планування ресурсів підприємства (ERP). Попри їх широке використання, ці системи здебільшого орієнтовані на облік і контроль, тоді як повноцінне математичне моделювання оптимального розподілу ресурсів реалізується рідко. Серед поширених платформ, які впроваджуються на європейських харчових підприємствах, можна виділити Systems Applications and Production (SAP), Enterprise Resource Planning (ERP), Microsoft Dynamics 365 Business Central, Oracle NetSuite Food & Beverage та Infor CloudSuite Food & Beverage [1]. Їх загальною особливістю є модульність та наявність підсистем для планування виробництва, управління запасами та контролю логістичних операцій. Однак, як відзначають дослідники, ці системи рідко включають алгоритми оптимізаційного планування, орієнтовані саме на специфіку харчової галузі [2].

У науковій літературі найбільше розроблені моделі оптимізації виробничих програм, у яких ключовим критерієм виступає максимізація

прибутку, що обчислюється за формулою типу:

$$P = \sum_{i=1}^n (b_i - c_i) \cdot x_i, \quad (1.1)$$

де b_i – ціна реалізації продукції;

c_i – собівартість виробництва одиниці продукції;

x_i – обсяг виробництва певного виду продукції.

Такі моделі (1.1) є основою більшості сучасних програмно-алгоритмічних рішень і широко використовуються у дослідженнях. Проте вони практично не інтегровані у комерційні інформаційні системи харчової промисловості. Зокрема, у кондитерському виробництві, де асортимент може налічувати сотні позицій, а кожен продукт має свою рецептуру, енергетичні витрати та вимоги до обладнання, типові ERP рішення не дозволяють належним чином здійснювати багатофакторну оптимізацію [3].

Стан сучасного ринку програмного забезпечення свідчить про відсутність готових рішень, повністю адаптованих до потреб кондитерської галузі в частині математично обґрунтованого розподілу ресурсів та вибору оптимального виробничого портфеля продукції [4]. Тому, доцільним є створення адаптованої моделі оптимізації розподілу ресурсів, що дозволить кондитерському підприємству підвищити конкурентоспроможність шляхом точного та обґрунтованого формування виробничих рішень.

1.2 Оптимізаційний підхід до розподілу ресурсів на підприємствах кондитерської галузі

Оптимізаційний підхід передбачає використання математичних методів, моделей та алгоритмів, що забезпечують можливість визначення найкращого поєднання виробничих обсягів, ресурсних витрат та технологічних

параметрів.

У контексті кондитерського виробництва оптимізаційні моделі, як правило, формуються на основі критерію максимізації прибутку, мінімізації витрат або забезпечення певного рівня завантаження обладнання [5]. Найпоширенішою математичною формою відображення такого критерію є лінійна оптимізаційна модель прибутку, що враховує різницю між ціною реалізації та собівартістю продукції. У загальному вигляді цей підхід використовує (1.1).

Згідно з класичними працями у сфері оптимізації виробничих систем, дана модель є базовою формою показника економічної результативності, що використовується в задачах лінійного програмування та ресурсного планування [6]. Вона відображає залежність кінцевого фінансового результату від структури виробничої програми та використання доступних ресурсів [7]. Однак у кондитерській галузі базова модель потребує суттєвого доповнення, оскільки підприємства функціонують в умовах коливання попиту, асортиментного різноманіття та сезонних коливань [8]. Тому сучасні дослідники пропонують удосконалювати критерій шляхом введення коригувальних коефіцієнтів, які враховують зміни ринкової кон'юнктури та сезонні фактори. На цій основі формується розширений вираз:

$$P = (b_1 - c_1) \cdot k_1 \cdot s_1 \cdot x_1 + \dots + (b_i - c_i) \cdot k_i \cdot s_i \cdot x_i \quad (1.2)$$

де k_i – коефіцієнт коригування попиту на i -й виріб,

s_i – сезонний коефіцієнт.

Таке уточнення (1.2) дозволяє адаптувати оптимізаційну модель до реальних умов континентального або регіонального ринку, враховуючи зростання або падіння попиту в окремі періоди. Для кондитерської галузі це особливо важливо, адже попит на окремі категорії продукції (наприклад, шоколадні вироби, новорічні набори, вироби з какао) суттєво відрізняється у різні сезони року [9].

Основою оптимізаційного підходу є також обмеження, що визначають можливості виробничої системи. Найчастіше використовуються такі групи обмежень як ресурсні обмеження, технологічні обмеження, часові обмеження, економічні обмеження. Ресурсні обмеження – ліміт доступної сировини (цукор, какао, жири, ароматизатори), пакувальних матеріалів, складських запасів. Технологічні обмеження – продуктивність обладнання, тривалість циклів, вимоги до температурних режимів, норми витрат. Часові обмеження – графік роботи обладнання, зміни, тривалість виробничих періодів. Економічні обмеження – бюджетні рамки, граничні значення собівартості, мінімальні та максимальні обсяги виробництва. Використання оптимізаційного підходу дозволяє мінімізувати ризики неефективного використання ресурсів: перевитрати сировини, недовантаження або перевантаження обладнання, накопичення непроданих запасів готової продукції.

1.3 Порівняльний аналіз програмних рішень та алгоритмів оптимізації виробничих процесів

Сучасні підприємства кондитерської галузі функціонують у висококонкурентному середовищі, де ключовими факторами успіху виступають гнучкість виробництва, висока якість продукції, мінімізація витрат та здатність швидко адаптуватися до змін ринкового попиту [10]. У цих умовах значну роль відіграють програмні рішення, орієнтовані на оптимізацію виробничих процесів, що базуються на методах математичного моделювання, машинного навчання та інтелектуальних алгоритмах підтримки управлінських рішень [11].

Такі системи забезпечують можливість моделювання технологічних процесів, прогнозування ефективності рішень, оптимізації використання ресурсів і скорочення часу простоїв обладнання.

На рисунку 1.1 зображена структурно-логічна схема порівняння алгоритмів та моделей навчання.

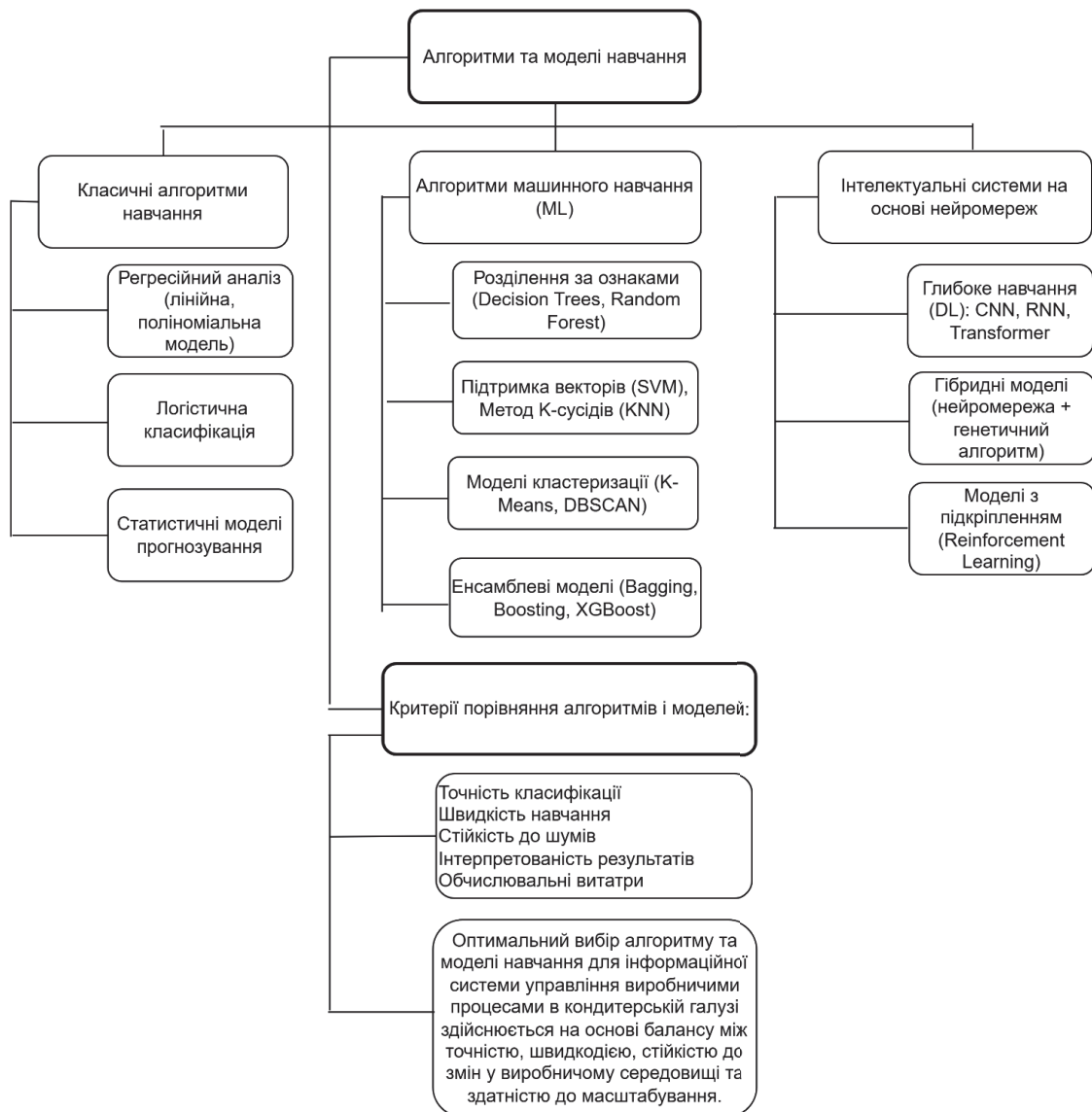


Рисунок 1.1 – Структурно-логічна схема порівняння алгоритмів та моделей навчання

Схема ілюструє систематизацію та взаємозв'язок основних класів алгоритмів навчання, що застосовуються в інформаційних системах розподілу ресурсів.

Схема поділяє методи на три групи: класичні алгоритми навчання, методи машинного навчання, інтелектуальні системи на основі нейронних мереж.

Класичні алгоритми навчання – базуються на статистичних методах (регресія, класифікація), застосовуються для побудови прогнозних моделей із невеликою кількістю змінних. Їх переваги – висока інтерпретованість і простота реалізації, проте точність обмежена для складних процесів [12].

Методи машинного навчання (Machine Learning, ML) – забезпечують здатність системи до самоадаптації, зокрема через алгоритми дерев рішень, випадкових лісів тощо. Вони ефективні при великій кількості вхідних параметрів і різномірних даних, але вимагають більше обчислювальних ресурсів.

Інтелектуальні системи на основі нейронних мереж (Neural Networks, NN) – глибокі моделі, що дозволяють виявляти складні залежності у даних та автоматично виділяти ознаки. Їх застосування у виробничих інформаційних системах (ІС) забезпечує прогнозування несправностей, оптимізацію ресурсів і підвищення точності управлінських рішень [13].

Завершальний блок схеми визначає основні критерії порівняння алгоритмів – точність, швидкодію, стійкість, інтерпретованість та обчислювальні витрати. На основі цих параметрів здійснюється вибір оптимальної моделі для конкретних задач автоматизованого розподілу ресурсів у кондитерській галузі [14]. Оптимізаційний підхід вирішує задачу раціонального розподілу виробничих ресурсів (сировини, енергетичних та трудових витрат, часу роботи обладнання) між різними технологічними процесами з метою максимізації прибутку підприємства або мінімізації сукупних витрат [15]. Система аналізує поточні дані про стан виробничих ліній, запаси сировини, обсяги замовлень і пропонує оптимальний план виробництва, який забезпечує найефективніше використання ресурсів без порушення технологічних обмежень. Такий підхід дозволяє зменшити простой обладнання, уникнути перевитрат сировини, збалансувати завантаження виробничих потужностей і підвищити фінансові результати діяльності підприємства за рахунок автоматизованого розподілу ресурсів.

1.4 Аналіз підходів до автоматизації процесів управління виробництвом у кондитерській галузі

Автоматизація процесів управління виробництвом у сучасній кондитерській галузі є ключовим напрямом підвищення ефективності діяльності підприємств, зменшення виробничих витрат і забезпечення стабільної якості продукції. Технологічна складність виготовлення кондитерських виробів, яка включає багатоетапні операції – від приготування сиропів до пакування готової продукції, – потребує узгодженої роботи різних підсистем, що контролюють сировинні потоки, технологічні параметри, персонал і обладнання. Тому актуальним завданням є створення інтегрованих інформаційних систем управління, які об'єднують функції контролю, планування та оптимізації виробництва в єдиному цифровому середовищі [16].

У контексті цифрової трансформації харчової промисловості відбувається еволюція підходів до автоматизації управління – від локальних систем збору даних до комплексних архітектур Industry 4.0, які передбачають використання інтернету речей (Internet of Things, IoT), великих даних, штучного інтелекту і хмарних технологій. Виробництво дедалі більше орієнтується на концепцію Smart Factory, де всі процеси – від постачання сировини до контролю якості – здійснюються під управлінням інтелектуальних систем у режимі реального часу [17].

Підходи до автоматизації управління в кондитерській промисловості умовно можна поділити на чотири рівні: операційний рівень; тактичний рівень; стратегічний рівень; аналітичний рівень.

Вибір конкретного підходу до автоматизації залежить від масштабу підприємства, технічної бази, фінансових можливостей та стратегічних цілей [18]. Для малих і середніх кондитерських підприємств доцільним є впровадження легких інтегрованих рішень на базі Java або Python, які забезпечують контроль ресурсів, планування виробництва та формування

звітів у реальному часі. Великі підприємства, навпаки, орієнтуються на комплексні ERP, Manufacturing Execution System (MES), Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) рішення, які потребують високого рівня IT-підтримки, але забезпечують максимальний рівень автоматизації.

На рисунку 1.2 представлена схема систем та підходів до автоматизації управління виробничими процесами в кондитерській галузі.

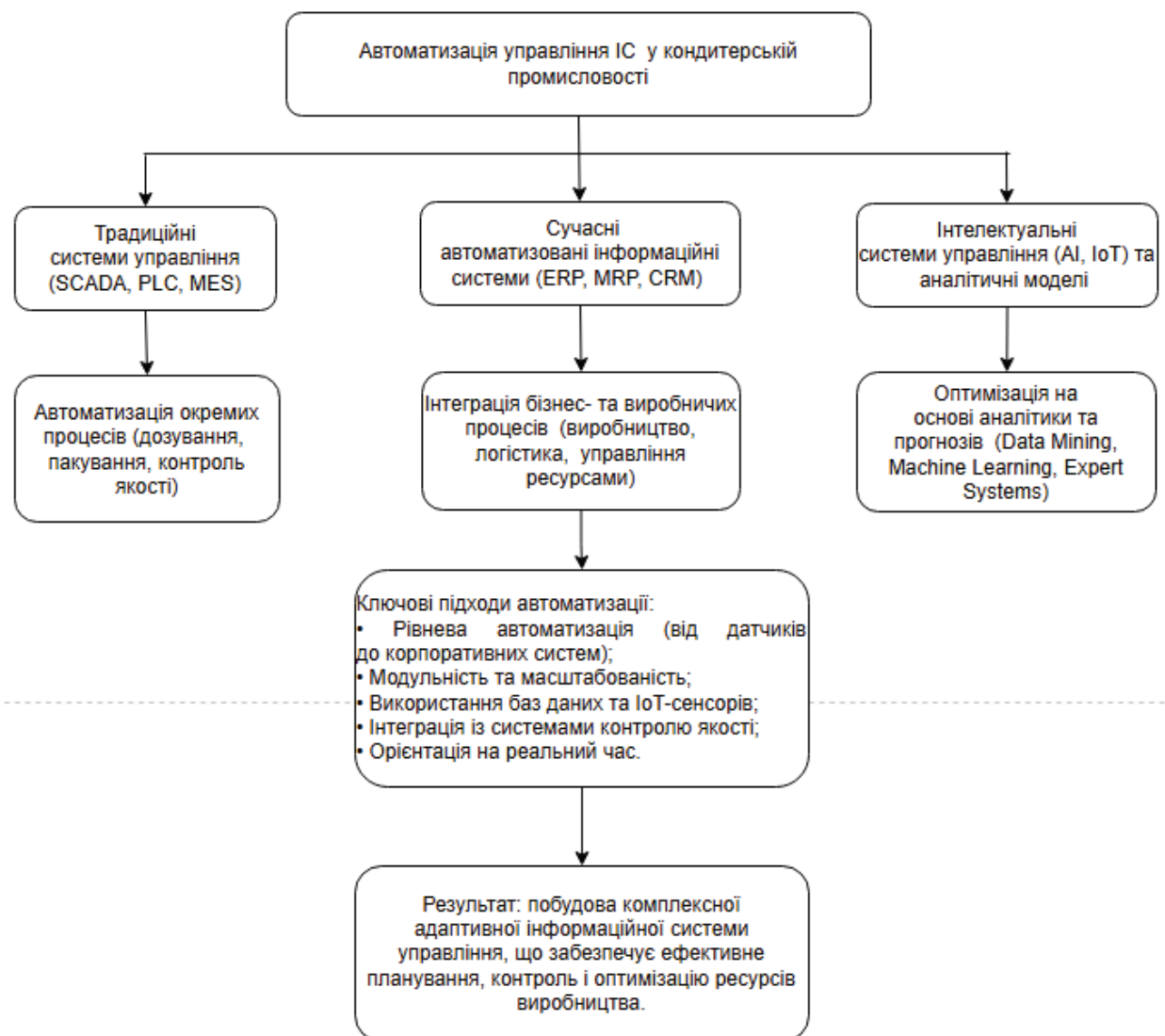


Рисунок 1.2 – Схема систем та підходів до автоматизації управління виробничими процесами в кондитерській галузі

Схема відображає основні рівні автоматизації – від базового контролю обладнання до комплексного управління виробництвом і ресурсами. Перший

блок становлять SCADA-системи, які забезпечують оперативний моніторинг параметрів технологічних процесів, збір даних, візуалізацію та дистанційне керування обладнанням [19].

Другий рівень складають MES-системи, що координують виробничі операції, контролюють хід виконання замовлень, збирають інформацію про продуктивність і формують поточні плани виробництва. Наступний елемент – Advanced Planning and Scheduling (APS) системи, які забезпечують автоматичне планування та синхронізацію ресурсів, оптимізацію завантаження ліній і розподілу виробничих потужностей. На верхньому рівні схеми розташовані ERP-системи, що інтегрують виробничі, логістичні, фінансові та управлінські процеси в єдине інформаційне середовище підприємства. Окремим блоком подано інтелектуальні методи оптимізації, до яких належать алгоритми машинного навчання, нейронні мережі, генетичні алгоритми та інші метаевристичні підходи. Вони забезпечують прогнозування, адаптивне управління та автоматизований пошук оптимальних рішень [20]. Схема демонструє взаємозв'язок між різними системами автоматизації, їх функціональну взаємодію та послідовне зростання рівня інтелектуалізації управління виробництвом у кондитерській галузі [21].

Схема демонструє еволюцію та порівняння підходів до автоматизації управління виробництвом у кондитерській галузі, починаючи від традиційних рішень до сучасних інтелектуальних систем.

Традиційні системи (SCADA, MES) – зосереджені на локальній автоматизації окремих технологічних операцій, наприклад, контролю температури, швидкості транспортерів або вагового дозування. Їх головна перевага – надійність, проте вони мають обмежену аналітичну функціональність і слабку інтеграцію з бізнес-рівнем.

Сучасні інформаційні системи (ERP) – забезпечують інтеграцію виробничих процесів з управлінням ресурсами, постачанням, складом і збутом. Такі системи формують єдиний інформаційний простір підприємства, що дозволяє координувати дії між підрозділами.

Інтелектуальні системи управління (Data Analytics) – використовують методи машинного навчання, інтернет речей та експертні алгоритми для прогнозування попиту, оптимізації виробничого плану й автоматичного коригування параметрів у реальному часі. Вони забезпечують підвищення точності рішень, зменшення простоїв і витрат.

Переваги існуючих методів – формалізація, точність, практична доступність (Lean), адаптивність, комплексність (гібрид). Недоліки – недостатня гнучкість, значні витрати та складність, потреба у даних, проблеми з промисловою впроваджуваністю [22]. Для кондитерської галузі оптимальним є підхід комбінований: наприклад, базове планування за допомогою Linear Programming (LP)/ Mixed-Integer Linear Programming (MILP) або LP + евристики, прогнозування ресурсних потреб Machine Learning (ML), інтеграція з простими індикаторами Lean, і етапним введенням IoT – моніторингу. Такий підхід дозволив би: врахувати партійність, зміни рецептур, технологічні обмеження, сезонність, псування сировини. Критичний аналіз показує, що самостійне застосування лише одного методу не є достатнім для сучасного кондитерського виробництва – необхідна інтеграція методів, адаптованих до технологічних, економічних та організаційних особливостей підприємства. Дана ситуація обґрунтовує наукову і практичну значущість розробки нового методу і моделі розподілу ресурсів, спеціально адаптованого до кондитерської промисловості [23].

У таблиці 1.1 представлена порівняльна характеристика методів і моделей розподілу виробничих ресурсів у харчовій та кондитерській галузі.

Проведений порівняльний аналіз свідчить, що у сучасній практиці управління виробничими процесами харчових і кондитерських підприємств застосовується широкий спектр методів і моделей розподілу ресурсів, які суттєво відрізняються за принципами побудови, точністю, гнучкістю та вимогами до обчислювальних ресурсів.

Таблиця 1.1 – Порівняльна характеристика методів і моделей розподілу виробничих ресурсів у харчовій та кондитерській галузі

№	Метод / модель	Сутність підходу	Переваги	Недоліки
1	Лінійне та змішане цілочислове програмування (LP / MILP)	Оптимізація розподілу ресурсів через побудову математичної моделі із цільовою функцією (прибуток / витрати) і системою лінійних обмежень	Точність; наочність; можливість перевірки оптимальності	Лінійність припущень; складність у врахуванні стохастичних факторів; великі обчислення при великій кількості змінних
2	Нелінійне програмування та евристичні моделі (Simulated Annealing, Particle Swarm Optimization (PSO), Genetic Algorithm (GA))	Використання пошукових алгоритмів для знаходження оптимуму у складних, нелінійних або багатовимірних просторах	Може враховувати нелінійні залежності, технологічні обмеження; висока гнучкість	Не гарантує глобального оптимуму; потребує великої кількості ітерацій
3	Гібридні методи (LP + еволюційні алгоритми / ML)	Комбінація точних та евристичних підходів для багатокритеріальної оптимізації	Баланс точності й адаптивності; можливість оптимізації кількох критеріїв одночасно	Складність реалізації; потреба в глибокому налаштуванні параметрів
4	Lean-підходи, Value Stream Mapping	Управління процесами на основі усунення втрат та підвищення ефективності	Простота; практична орієнтація; зниження витрат і простоїв	Відсутність формальної оптимізації; складно врахувати складні взаємозв'язки між процесами
5	Машинне навчання (ML) та штучний інтелект Artificial Intelligence (AI)	Використання нейронних мереж і алгоритмів прогнозування для оцінки попиту, витрат, ефективності режимів	Виявлення прихованих закономірностей; адаптивність; робота з великими даними	Потреба у великих історичних даних; складність інтерпретації результатів; висока вартість впровадження
6	Цифрові двійники, IoT, кіберфізичні системи	Збір і обробка даних у реальному часі для керування розподілом ресурсів	Висока точність; оперативне реагування; моніторинг стану виробництва	Висока вартість обладнання; складність інтеграції
7	Фаззі-моделі (нечітке програмування)	Оптимізація при нечітких або неповних даних (попит, витрати, запаси)	Дає можливість працювати з невизначеністю; підходить для реальних умов виробництва	Складність побудови функцій належності; потреба у досвіді роботи з нечіткою логікою

Традиційні методи лінійного та змішаного цілочислового програмування залишаються базовими завдяки своїй математичній строгості та можливості отримання оптимальних рішень для добре структурованих задач [24]. Проте їх ефективність знижується при необхідності врахування стохастичних чинників, складних взаємозв'язків між технологічними процесами чи нелінійних обмежень, характерних для реальних умов виробництва [25].

У контексті кондитерських виробництв перспективними є гібридні підходи, які поєднують точні математичні моделі з евристичними або машинними алгоритмами. Такі системи здатні одночасно враховувати декілька критеріїв оптимізації – витрати, час, якість, енергоспоживання – і приймати рішення в умовах неповної інформації. Їх упровадження сприяє підвищенню гнучкості виробничої системи та зменшенню часу на переналагодження ліній [26].

З огляду на результати аналізу можна зробити висновок, що найефективнішим напрямом розвитку моделей управління ресурсами у харчовій і кондитерській галузі є інтеграція гібридних оптимізаційних алгоритмів із системами штучного інтелекту та цифровими двійниками. Такий підхід дозволить підвищити адаптивність, скоротити енерговитрати, оптимізувати логістику матеріальних потоків і забезпечити стабільну якість продукції в умовах мінливого попиту.

1.5 Постановка задачі дослідження та удосконалення оптимізаційного підходу до розподілу ресурсів на кондитерському підприємстві

Одним із перспективних напрямів підвищення ефективності є розробка методу оптимального розподілу виробничих ресурсів між технологічними процесами, що дозволяє мінімізувати витрати і водночас забезпечити

запланований обсяг випуску продукції. Оптимізаційний підхід полягає у пошуку такого поєднання виробничих компонентів (сировини, трудових і енергетичних ресурсів, часу роботи обладнання), яке забезпечує максимальний економічний ефект при мінімальних витратах. Такий підхід дозволяє підприємству гнучко реагувати на зміни у виробничому середовищі та досягати найкращого співвідношення між собівартістю продукції та прибутком.

Об'єкт дослідження. Процеси розподілу ресурсів на підприємствах кондитерської галузі.

Предмет дослідження. Удосконалення методу розподілу ресурсів на підприємствах кондитерської галузі.

Мета дослідження. Удосконалити метод і модель оптимізації розподілу ресурсів, що дозволяє забезпечити максимальний прибуток при заданих виробничих умовах.

Завдання дослідження. Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання: проаналізувати сучасні підходи до розподілу ресурсів у кондитерській галузі, визначити основні фактори, що впливають на ефективність використання ресурсів, удосконалити математичну модель прибутку підприємства, сформулювати цільову функцію оптимізації з урахуванням економічних і технологічних обмежень, удосконалити метод розв'язання задачі оптимізації, що дозволяє знаходити оптимальні параметри розподілу ресурсів, провести апробацію розробленого методу і моделі на прикладі типового підприємства кондитерської галузі та оцінити економічний ефект.

Наукова новизна полягає у розробці методу оптимізації розподілу виробничих ресурсів, який базується на побудові математичної моделі взаємозв'язку між економічними показниками та технологічними параметрами виробництва.

Практична цінність роботи полягає в можливості безпосереднього застосування удосконаленого методу та математичної моделі оптимізації

розподілу ресурсів у виробничій діяльності підприємств кондитерської галузі. Запропонований підхід дозволяє підвищити точність визначення раціональних виробничих планів, оперативно реагувати на сезонні та ринкові коливання попиту, а також адаптувати виробничу програму при зміні обсягів доступних ресурсів або технологічних обмежень.

Удосконалений метод забезпечує формування економічно обґрунтованих управлінських рішень щодо розподілу ресурсів між конкуруючими видами продукції та підвищує гнучкість планування за рахунок використання динамічних коефіцієнтів, що відображають реальні виробничі умови. Отриманий результат – оптимальна виробнича програма – характеризує збалансований та ефективний розподіл матеріальних, трудових і технічних ресурсів з метою максимізації прибутку.

Розроблений метод і модель можливо інтегрувати до існуючих інформаційних систем управління виробництвом, що сприятиме зниженню витрат, оптимізації завантаження обладнання та підвищенню загальної продуктивності підприємства. Таким чином, результати роботи можуть використовуватися як інструмент підтримки прийняття рішень, що забезпечує підвищення ефективності та конкурентоспроможності кондитерських підприємств.

2 РОЗРОБКА МЕТОДУ ТА МОДЕЛІ РОЗПОДІЛУ РЕСУРСІВ НА ПІДПРИЄМСТВАХ КОНДИТЕРСЬКОЇ ГАЛУЗІ

2.1 Інформаційна система управління контролю якості та ресурсів у кондитерській галузі

У сучасних умовах інтенсифікації виробництва та посилення конкурентної боротьби на ринку харчових продуктів питання контролю якості та ефективного використання ресурсів набуває особливого значення. Для підприємств кондитерської галузі ці аспекти є критичними, оскільки якість продукції безпосередньо визначає рівень довіри споживачів, а ефективність використання сировини, енергії та робочого часу впливає на собівартість і прибутковість виробництва [27]. Вирішення цих завдань потребує впровадження сучасних інформаційних систем контролю якості та управління ресурсами, здатних забезпечити комплексний моніторинг, аналіз і коригування параметрів виробничих процесів. У контексті управління ресурсами важливе місце займають енергоінформаційні системи (Energy Management Systems, EnMS), що дозволяють відстежувати енергоспоживання та ефективність роботи обладнання. Для кондитерських підприємств, де велика частка витрат припадає саме на енергоресурси (електроенергію, пару, тепло), впровадження таких систем дає змогу знизити енергетичні витрати на 10...15 % без значних капіталовкладень [28]. Це досягається за рахунок виявлення неефективних режимів роботи обладнання, оптимізації графіків навантаження та автоматичного регулювання температурних процесів.

На рисунку 2.1 зображено структуру та функціональну взаємодію сучасних інформаційних систем управління виробництвом у кондитерській галузі. Подана схема відображає багаторівневу архітектуру сучасних інформаційних систем управління виробництвом у кондитерській промисловості, що базується на принципах інтеграції, модульності та адаптивності.

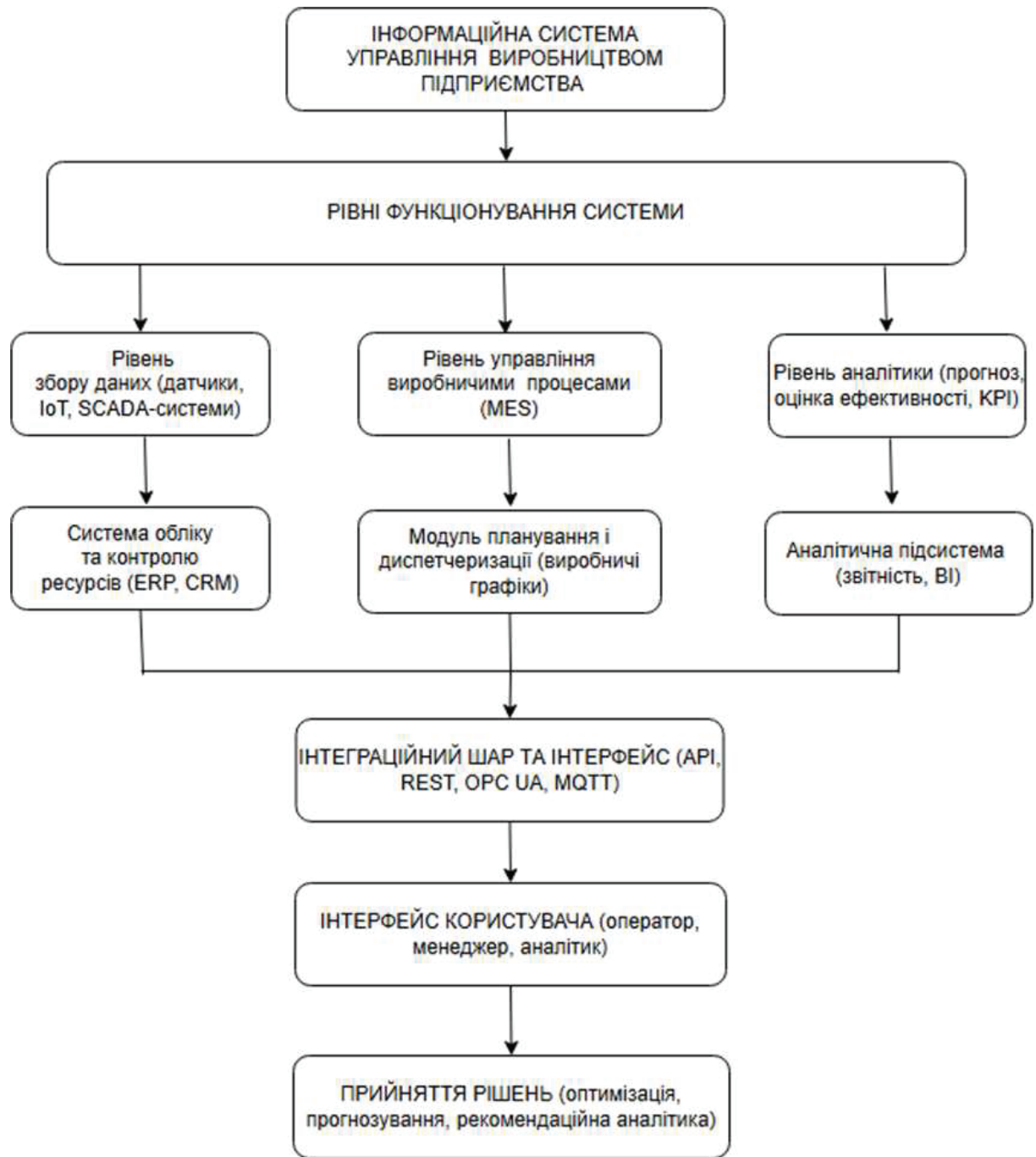


Рисунок 2.1 – Структура та функціональна взаємодія сучасних інформаційних систем управління виробництвом у кондитерській галузі

Система поєднує технологічні, управлінські та аналітичні рівні, забезпечуючи безперервний цикл збирання, обробки, аналізу й використання інформації для прийняття ефективних управлінських рішень [29]. На верхньому рівні представлена інформаційна система управління виробництвом підприємства, яка є комплексом взаємопов'язаних програмних

та апаратних засобів, орієнтованих на автоматизацію ключових процесів: планування, обліку, контролю, аналізу й оптимізації виробничої діяльності.

Далі система поділяється на три основні рівні функціонування. Перший рівень – рівень збору даних. Це базовий технологічний рівень, що включає сенсорні пристрої, SCADA-системи та IoT-компоненти. Він забезпечує реєстрацію параметрів технологічних процесів (температура, тиск, швидкість обертів, енергоспоживання, маса сировини тощо). Отримані дані зберігаються у базі та передаються до системи обліку ресурсів (ERP або CRM), де формуються первинні записи про використання матеріалів, час роботи обладнання й персоналу. Таким чином, формується достовірна інформаційна база для подальшого контролю та аналізу.

Другий рівень – рівень управління виробничими процесами (MES-рівень) – це ядро системи, яке координує виконання виробничих завдань. Тут реалізується диспетчеризація, управління технологічними маршрутами, розподіл ресурсів між лініями, відстеження стану замовлень і поточного завантаження обладнання. Основним компонентом є модуль планування та диспетчеризації, який формує оптимальні графіки виробництва відповідно до замовлень, наявних ресурсів і виробничих потужностей. MES-рівень виступає посередником між реальними виробничими даними та корпоративними бізнес-процесами.

Третій рівень – рівень аналітики (Business Intelligence, BI) – найвищий рівень, що забезпечує узагальнення та інтерпретацію накопичених даних. У межах цього рівня функціонує аналітична підсистема, яка реалізує моніторинг ключових показників ефективності (Key Performance Indicators, KPI), оцінку собівартості продукції, рентабельності, ефективності використання ресурсів та прогнозування виробничих тенденцій. Сюди інтегруються алгоритми економіко-математичного моделювання, машинного навчання та методи оптимізації, що дозволяє визначати найкращі сценарії розвитку виробництва.

Між усіма рівнями розміщується інтеграційний шар – це технічна й логічна основа взаємодії компонентів системи. Він включає інтерфейси обміну

даними, стандартизовані протоколи зв'язку Application Programming Interface (API), Representational State Transfer (REST), Open Platform Communications Unified Architecture (OPC UA), Message Queuing Telemetry Transport (MQTT), що забезпечують узгодженість роботи різних програмних модулів і зовнішніх систем. Завдяки цьому досягається цілісність інформаційного простору підприємства, а також можливість масштабування системи без порушення її структури. Ключову роль у взаємодії користувача з системою відіграє інтерфейс користувача, який забезпечує відображення інформації відповідно до ролі співробітника: оператор бачить стан обладнання та технологічні параметри, диспетчер – статус замовлень і черговість завдань, а менеджер або керівник – аналітичні панелі, показники прибутковості, графіки виробничого навантаження. Сучасні інформаційні системи передбачають використання інтерактивних дашбордів, мобільних додатків і веб-інтерфейсів, що дозволяють здійснювати контроль та управління виробництвом у режимі реального часу [30].

Завершальним елементом є підсистема прийняття рішень, яка акумулює результати аналітики, виконує оптимізацію параметрів виробництва, здійснює прогнозування можливих відхилень і формує рекомендації для керівництва. Цей рівень реалізує функції «розумного» управління – визначення оптимальних режимів роботи, вибір найдоцільніших сценаріїв планування, а також адаптацію системи до змін попиту, сезонності чи нестачі ресурсів [31].

Запропонована схема демонструє логічну цілісність та взаємозв'язок між технологічними, управлінськими та аналітичними компонентами системи. Її структура відповідає принципам сучасних інформаційних архітектур – багаторівневості, інтегрованості, масштабованості та адаптивності. Вона є базою для побудови інтелектуальної системи управління виробництвом у кондитерській галузі, здатної забезпечити підвищення продуктивності, скорочення витрат та підтримку управлінських рішень на всіх рівнях підприємства.

2.2 Аналіз та опис існуючого методу економіко-математичної оптимізації розподілу виробничих ресурсів

У сучасних умовах функціонування підприємств кондитерської галузі ефективно управління ресурсами набуває ключового значення. Висока конкуренція, обмеженість виробничих потужностей, нестабільність вартості сировини та необхідність підтримувати високу якість продукції висувають нові вимоги до методів планування та оптимізації. Одним із базових підходів, що широко застосовується у виробничому менеджменті, економічному аналізі та операційному дослідженні, є метод оптимізації прибутку шляхом розподілу ресурсів на основі маржинального доходу. Він ґрунтується на максимізації цільової функції вигляду:

$$\begin{aligned} \max P = & (b_1 - c_1) \cdot x_1 + (b_2 - c_2) \cdot x_2 + \dots + (b_i - c_i) \cdot x_i + \dots + \\ & + (b_n - c_n) \cdot x_n \end{aligned} \quad (2.1)$$

де $\max P$ – прибуток підприємства, грн;

x_1, x_2 – обсяги виробництва кожного виду продукції, кг;

b_1, b_2 – ціни реалізації, грн/кг;

c_1, c_2 – собівартість виробництва, грн/кг.

Показники характеризують економічний вплив кожного виду продукції на загальний прибуток підприємства (2.1). Такий підхід широко представлений у роботах з економіко-математичного моделювання, зокрема у класичних працях в закордонних Л. Канторовича, Г. Саймона, Р. Акоффа та в сучасних українських дослідженнях, присвячених ресурсному плануванню на харчових підприємствах [32]. Цей метод належить до класу лінійних моделей оптимізації, у яких цільова функція виражає прибуток підприємства, а змінні – це обсяги виробництва різних видів продукції. Основна ідея полягає у тому, що кожен продукт приносить підприємству певний маржинальний дохід ($b_i -$

c_i). Виробництво кожної одиниці продукції споживає певні ресурси, що формує систему обмежень. Задача полягає у знаходженні таких значень x_i , за яких прибуток максимальний, а обмеження не порушуються.

Маржинальний дохід є ключовим критерієм, який дозволяє визначати доцільність виробництва певного виду продукції. Якщо виконується (2.2), виробництво є рентабельним.

$$(b_i - c_i) > 0, \quad (2.2)$$

де b_i – ціни реалізації, грн/кг;

c_i – собівартість виробництва, грн/кг.

Але, якщо виконується (2.3), виробництво завдає збитків.

$$(b_i - c_i) < 0, \quad (2.3)$$

де b_i – ціни реалізації, грн/кг;

c_i – собівартість виробництва, грн/кг.

Такий підхід часто використовується у методах лінійного програмування, методах оптимального планування виробництва, методах управління асортиментом, ресурсно-орієнтованому плануванні.

Економічний зміст змінних моделі.

$$P = \sum_{i=1}^n (b_i - c_i) \cdot x_i$$

де P – загальний прибуток підприємства.

b_i – ціна реалізації одиниці i -го виду продукції;

c_i – собівартість виробництва одиниці i -го виду продукції;

x_i – кількість виробленої продукції;

$b_i - c_i$ – маржинальний дохід (прибуток за одиницю);

У контексті кондитерського виробництва це можуть бути: різні види

печива, шоколадні вироби, вафлі, цукерки, карамель тощо.

Етапи існуючого методу оптимізації.

Етап 1. Формування інформаційної бази.

На цьому етапі збирають: дані про собівартість продукції; вартість сировини та енергоносіїв; виробничі нормативи; планові обсяги попиту; доступні виробничі потужності.

Ця інформація є основою для параметризації моделі.

Етап 2. Побудова математичної моделі прибутку.

Цільову функцію формують на основі маржинального доходу:

$$P = (b_1 - c_1)x_1 + (b_2 - c_2)x_2 + \dots + (b_n - c_n)x_n$$

де P – загальний прибуток підприємства

b_i – ціна реалізації одиниці i -го виду продукції;

c_i – собівартість виробництва одиниці i -го виду продукції;

x_i – кількість виробленої продукції;

$b_i - c_i$ – маржинальний дохід (прибуток за одиницю);

Завдання: максимізувати P .

Етап 3. Формування системи обмежень. У реальному виробництві ресурси обмежені. Для кондитерської фабрики обмеження можуть стосуватися: кількості борошна; какао-продуктів; цукру; жирних компонентів; робочого часу обладнання; потужності цехів; трудових ресурсів.

Класичне обмеження має вигляд:

$$a_{11} \cdot x_1 + a_{12} \cdot x_2 + \dots + a_{1n} \cdot x_n \leq A_j$$

де a_{ij} – норма витрати j -го ресурсу на виробництво одиниці продукції i ;

x_i – кількість виробленої продукції.

A_j – доступний обсяг ресурсу j .

Етап 4. Нормалізація даних та перевірка коректності. Метою є: виявлення нелогічних даних; усунення аномалій; перевірка відповідності виробничим нормативам.

Етап 5. Розв'язання задачі оптимізації. Використовують: симплекс-метод; метод гілок і меж; градієнтні методи; методи зваженої оптимізації (у разі багатоцільових задач).

Етап 6. Аналіз отриманих результатів. На основі розв'язку визначають: оптимальні обсяги виробництва; очікуваний прибуток; структуру асортименту; економічні ефекти від застосування моделі.

Етап 7. Перевірка моделі у виробничих умовах. Модель може бути перевірена: в умовах реального підприємства; у рамках експериментальних виробничих планів; шляхом порівняння з фактичними економічними показниками.

Приклад практичного застосування методу у кондитерській галузі. Для підприємства, яке виробляє три види продукції: печиво цукрове, шоколадні батончики, вафлі. Модель дозволяє визначити виробництво, яке забезпечить найвищий прибуток; отримати оптимальний розподіл сировини; розрахувати мінімальну собівартість; оцінити вплив підвищення цін або збільшення попиту на окремі види продукції. Описаний метод є базовим підходом, який лежить в основі великої кількості сучасних моделей ресурсного планування [33]. Саме цей метод у подальших розділах буде використано як порівняльний базис для оцінки ефективності запропонованої системи оптимізації розподілу ресурсів на кондитерському підприємстві.

2.3 Формалізація задачі розподілу ресурсів виробництва

Управління виробництвом на підприємствах кондитерської галузі передбачає забезпечення максимальної ефективності використання ресурсів за

умови стабільної якості продукції та ритмічності випуску. Для цього розробляється математична модель, що дозволяє визначити оптимальний обсяг випуску різних видів кондитерських виробів, виходячи з обмежених ресурсів підприємства [34].

Підприємство виробляє кілька видів кондитерських виробів: печиво, карамель, шоколадні цукерки.

Основна мета оптимізації – знайти такі значення x_1, x_2, x_3 , за яких прибуток підприємства буде максимальним.

Прибуток визначається як різниця між ціною від реалізації продукції та загальними витратами на її виробництво:

$$\begin{aligned} \max P = & (b_1 - c_1) \cdot x_1 + (b_2 - c_2) \cdot x_2 + \dots + (b_i - c_i) \cdot x_i + \dots + \\ & + (b_n - c_n) \cdot x_n \end{aligned} \quad (2.4)$$

де $\max P$ – прибуток підприємства, грн.

x_1, x_2 – обсяги виробництва кожного виду продукції, кг;

b_1, b_2 – ціни реалізації, грн/кг;

c_1, c_2 – собівартість виробництва, грн/кг;

Задача оптимізації полягає в максимізації прибутку підприємства P (2.4). Обмеження моделі враховують доступність сировини, енергії та трудових ресурсів.

Обмеження за цукром:

$$r_{ц1} \cdot x_1 + r_{ц2} \cdot x_2 + r_{ц3} \cdot x_3 \leq R_{ц}$$

де $r_{ц}$ – витрати цукру, борошна та електроенергії на виробництво одиниці продукції відповідного виду, кг або кВт·год;

$R_{ц}$ – доступна кількість цукру, борошна та електроенергії на певний період (наприклад, на зміну).

Обмеження за борошном:

$$r_{61} \cdot x_1 + r_{62} \cdot x_2 + r_{63} \cdot x_3 \leq R_6$$

де r_6 – витрати цукру, борошна та електроенергії на виробництво одиниці продукції відповідного виду, кг або кВт·год;

R_6 – доступна кількість цукру, борошна та електроенергії на певний період (наприклад, на зміну).

Обмеження за електроенергією:

$$r_{e1} \cdot x_1 + r_{e2} \cdot x_2 + r_{e3} \cdot x_3 \leq R_e$$

де r_e – витрати цукру, борошна та електроенергії на виробництво одиниці продукції відповідного виду, кг або кВт·год;

R_e – доступна кількість цукру, борошна та електроенергії на певний період (наприклад, на зміну).

Обмеження за виробничою потужністю:

$$x_1 + x_2 + x_3 \leq x_{max}$$

де x_1, x_2, x_3 – обсяги виробництва кожного виду продукції, кг;

x_{max} – максимальний обсяг виробництва продукції.

Невід'ємність змінних:

$$x_1, x_2, x_3 \geq 0$$

де x_1, x_2, x_3 – обсяги виробництва кожного виду продукції, кг.

Таким чином, задача оптимізації полягає у знаходженні таких обсягів виробництва кожного виду продукції, які забезпечують максимальний

прибуток при дотриманні всіх обмежень.

Собівартість кожного виду кондитерського виробу формується за складовими:

$$c_i = c_i^{\text{мат}} + c_i^{\text{ен}} + c_i^{\text{тр}} \quad (2.5)$$

де $c_i^{\text{мат}}$ – матеріальні витрати, грн/кг;

$c_i^{\text{ен}}$ – енергетичні витрати, грн/кг;

$c_i^{\text{тр}}$ – витрати на оплату праці, грн/кг.

У кондитерському виробництві матеріальні витрати можуть становити до 70...80% собівартості, тому саме вони є ключовим чинником оптимізації.

У загальному вигляді задача розподілу ресурсів виробництвом була представлена у вигляді (2.5).

Для практичних розрахунків у системах підтримки прийняття рішень (СППР) застосовують алгоритми лінійного програмування або евристичні методи, зокрема генетичні алгоритми, що дають змогу враховувати нелінійні залежності у виробничих процесах (наприклад, зміни витрат енергії при збільшенні обсягів випуску). Розв'язання моделі прибутку і затрат дає змогу визначити оптимальні обсяги випуску кожного виду продукції x_1^*, x_2^*, x_3^* . Визначити очікуваний прибуток P^* , грн. А також визначити прогнозне споживання ресурсів (цукор, борошно, енергія) у фізичних одиницях (кг, кВт·год). Ці результати використовуються для складання виробничого плану, визначення потреб у закупівлі сировини та планування енергоспоживання.

Ефективність управління виробництвом оцінюється коефіцієнтом використання ресурсів:

$$E = \frac{P}{C_{\text{заг}}}$$

де E – ефективність управління виробництвом;

$C_{заг}$ – загальні витрати ресурсів у грошовому еквіваленті, грн;

P – очікуваний прибуток, грн.

Модель витрат може бути реалізована програмно в інформаційній системі управління виробництвом кондитерських виробів із використанням сучасних засобів аналітики та оптимізаційних модулів.

2.4 Дослідження методів оптимізації розподілу ресурсів в кондитерській галузі

Оптимізація виробничих процесів у кондитерській промисловості спрямована на досягнення максимального економічного ефекту за рахунок раціонального використання ресурсів, підвищення якості продукції та зниження втрат сировини. Основним завданням є визначення оптимального співвідношення між витратами сировини, трудових і енергетичних ресурсів при забезпеченні необхідного рівня продуктивності виробництва [35].

Серед основних методів до оптимізації виробництва виділяють класичні методи лінійного програмування.

Класичні методи лінійного програмування, що використовуються для розподілу ресурсів між видами продукції. Такі методи дозволяють визначити оптимальні обсяги випуску виробів при обмежених ресурсах сировини, енергії та потужностей.

Типова модель може бути описана функцією цілі:

$$\max P = \sum (b_i - c_i) \cdot x_i$$

де P – прибуток підприємства, грн;

b_i – ціна реалізації одиниці продукції, грн/кг;

c_i – собівартість, грн/кг;

x_i – обсяг виробництва i -го виду кондитерського виробу, кг.

Методи цілочисельного програмування застосовуються, коли обсяги випуску можуть приймати лише цілі значення, наприклад, кількість партій або виробничих змін. Такі методи корисні для планування серійного виробництва печива чи карамелі, де партія є мінімальною одиницею планування. Нелінійні моделі оптимізації, які враховують залежність собівартості від обсягу виробництва через ефект масштабу використовуються, наприклад, при збільшенні виробництва шоколадних цукерок витрати енергії зменшуються завдяки стабілізації температурного режиму.

Така залежність може бути описана виразом:

$$c_i = a_i + b_i \cdot x_i^{-0,2}$$

де c_i – собівартість виробництва продукції i -го виду, грн/кг;

a_i, b_i – експериментальні коефіцієнти (грн/кг).

Розглянемо типову задачу для підприємства, яке виготовляє три види продукції: печиво (x_1), карамель (x_2) і шоколадні цукерки (x_3).

Мета: максимізувати прибуток P , грн.

Сформулюємо модель прибутку з врахуванням коефіцієнта реалізації. Для цього введемо в модель 2.1 коефіцієнти реалізації.

$$P = (b_1 - c_1) \cdot x_1 \cdot k_1 + (b_2 - c_2) \cdot x_2 \cdot k_2 + \dots + (b_i - c_i) \cdot x_i \cdot k_i + \dots + (b_n - c_n) \cdot x_n \cdot k_n \quad (2.6)$$

де P – прибуток підприємства, грн.

b_i – ціна реалізації продукції i -го виду, грн/кг;

c_i – собівартість виробництва продукції i -го виду, грн/кг;

k_i – коефіцієнт реалізації ($0 \dots 1$), частка від обсягу виробництва, яка реально продається;

x_i – виробничий обсяг, кг.

Введення параметра k_i (2.6) робить модель точнішою для кондитерського підприємства, де можливі втрати: списання через термін придатності, повернення від торговельних мереж, псування, нереалізовані залишки.

Ресурсне обмеження за сировиною:

Сировина (кг):

$$a_{11} \cdot x_1 + a_{12} \cdot x_2 + a_{13} \cdot x_3 \leq R_1$$

де a_{11} , a_{12} , a_{13} – витрати основної сировини (цукор, борошно, какао тощо) на 1 кг продукції j -го виду, кг/кг;

R_1 – доступний обсяг основної сировини, кг;

x_1 , x_2 , x_3 – виробничий обсяг, кг.

Обмеження за трудовими ресурсами:

$$t_1 \cdot x_1 + t_2 \cdot x_2 + t_3 \cdot x_3 \leq T$$

де t_1 , t_2 , t_3 – трудомісткість виробництва 1 кг продукції i -го виду, люд·год/кг;

x_1 , x_2 , x_3 – виробничий обсяг, кг;

T – доступний фонд робочого часу, люд·год.

Обмеження за потужністю обладнання:

$$\frac{x_1}{m_1} + \frac{x_2}{m_2} + \frac{x_3}{m_3} \leq H$$

де m_i – продуктивність обладнання для виробництва продукції i -го типу, кг/год;

x_1 , x_2 , x_3 – виробничий обсяг, кг;

H – доступний фонд часу роботи обладнання, год.

Обмеження попиту з урахуванням нового параметра k_i :

$$k_i \cdot x_i \leq D_i$$

де k_i – коефіцієнт реалізації ($0 \dots 1$), частка від обсягу виробництва, яка реально продається;

x_i – виробничий обсяг, кг.

D_i – прогнозований попит на продукцію i -го виду, кг.

Підприємство не повинно виробляти надмірний обсяг, якщо реальна кількість продажів обмежена ринком. Розв'язання системи може здійснюватися методами симплекс-оптимізації або з використанням генетичного алгоритму. У сучасних умовах для кондитерських підприємств доцільним є застосування адаптивних алгоритмів, які дозволяють оновлювати розв'язки у режимі реального часу відповідно до змін у споживчому попиті.

У таблиці 2.1 представлена порівняльна характеристика методів.

Таблиця 2.1. Порівняльна характеристика методів

Метод	Тип задачі	Переваги	Недоліки	Застосування
Лінійне програмування	Детермінована	Простота, чіткість	Не враховує нелінійні ефекти	Планування обсягів виробництва
Нелінійна оптимізація	Нелінійна	Врахування ефекту масштабу	Складність розрахунків	Оптимізація енергоспоживання
Генетичні алгоритми	Евристична	Гнучкість, адаптивність	Не гарантує глобального оптимуму	Оптимізація рецептур
Стохастичні методи	Ймовірнісна	Врахування ризиків	Потребують статистичних даних	Моделювання постачань
Гібридні моделі	Комбінована	Висока точність	Велика обчислювальна складність	Комплексне управління ресурсами

Критерії ефективності використання ресурсів. Для оцінювання якості рішення згідно моделі застосовується коефіцієнт ефективності використання ресурсів:

$$E = \frac{P}{C_{\text{заг}}} \quad (2.7)$$

де E – коефіцієнт ефективності (безрозмірна величина);

P – прибуток, грн;

$C_{заг}$ – сумарні витрати на ресурси, грн.

При максимізації P збільшується коефіцієнт ефективності E (2.7).

Додатково вводиться показник стабільності виробничого процесу:

$$S = \frac{X_{\phi}}{X_{пл}} \quad (2.8)$$

де S – стабільність виробництва (коєф.);

X_{ϕ} – фактичний обсяг випуску, кг;

$X_{пл}$ – плановий обсяг випуску, кг.

Значення S , близьке до 1, що свідчить про ефективне планування виробництва (2.8).

2.5 Удосконалення математичної моделі розподілу ресурсів з урахуванням сезонних коливань попиту

Ефективне управління виробничими процесами на підприємствах кондитерської галузі неможливе без цілеспрямованого врахування факторів зовнішнього ринкового середовища. Одним із найбільш впливових чинників є сезонність, яка визначає зміни купівельної активності та впливає на попит на різні групи кондитерських виробів.

У літній період попит на шоколадні вироби знижується через високу температуру та особливості зберігання продукції. Водночас зростає попит на печиво, вафлі, рулети та інші менш чутливі до тепла вироби. Додатковий вплив має «сезон відпусток», коли спостерігається тимчасове зменшення

чисельності постійних покупців у містах. У зимовий період ситуація протилежна: попит на шоколадну продукцію зростає, особливо у святкові місяці. Тому модель оптимізації повинна включати параметри, що відображають ці закономірності.

Для удосконалення оптимізаційної моделі вводимо два типи коригувальних параметрів, а саме – коефіцієнт реалізації k_i та коефіцієнт сезонності s_i

Коефіцієнти k_i – коефіцієнт реалізації (0...1), частка від обсягу виробництва, яка реально продається.

Вони враховують специфічні умови ринку, поведінку споживачів та конкурентні переваги підприємства (брендова впізнаваність, частка ринку, якість продукції тощо).

Коефіцієнти сезонності s_i – коригування попиту залежно від сезону.

Це дозволяє врахувати зміни купівельної активності: $s_i > 1$ – сезон підвищеного попиту (зима, свята); $s_i = 1$ – середньорічний попит, $s_i < 1$ – сезон зниженого попиту (літо, відпустки).

Такі коефіцієнти дозволяють оптимізаційній моделі адекватно реагувати на реальну ринкову динаміку.

З урахуванням введених коефіцієнтів максимізований прибуток підприємства визначається як:

$$\begin{aligned} \max P = & (b_1 - c_1) \cdot x_1 \cdot k_1 \cdot s_1 + (b_2 - c_2) \cdot x_2 \cdot k_2 \cdot s_2 + \dots + \\ & + (b_i - c_i) \cdot x_i \cdot k_i \cdot s_i + \dots + (b_n - c_n) \cdot x_n \cdot k_n \cdot s_n \end{aligned} \quad (2.9)$$

де $\max P$ – прибуток підприємства, грн;

b_i – ціна реалізації продукції i -го виду, грн/кг;

c_i – собівартість виробництва продукції i -го виду, грн/кг;

k_i – коефіцієнт реалізації (0...1), частка від обсягу виробництва, яка реально продається;

s_i – сезонний коефіцієнт;

x_i – обсяг виробництва відповідного виду продукції.

Така модифікація формули (формула 2.9 дозволяє враховувати не лише базові економічні показники, а й вплив ринкової кон'юнктури та сезонних коливань. Математична модель оптимізації повинна включати систему обмежень, що враховують доступність ресурсів, виробничих потужностей та реальний попит.

Обмеження використання ресурсів (сировини, матеріалів):

$$a_{11} \cdot x_1 + a_{12} \cdot x_2 + a_{13} \cdot x_3 \leq R_1$$

де a_{11}, a_{12}, a_{13} – витрати основної сировини (цукор, борошно, какао тощо) на 1 кг продукції j -го виду, кг/кг;

x_1, x_2, x_3 – виробничий обсяг, кг;

R_1 – доступний обсяг основної сировини, кг.

$$a_{21} \cdot x_1 + a_{22} \cdot x_2 + a_{23} \cdot x_3 \leq R_2$$

де a_{21}, a_{22}, a_{23} – витрати додаткової сировини на 1 кг продукції j -го виду, кг/кг;

x_1, x_2, x_3 – виробничий обсяг, кг;

R_2 – доступний обсяг додаткової сировини, кг.

Обмеження виробничої потужності:

$$t_1 \cdot x_1 + t_2 \cdot x_2 + t_3 \cdot x_3 \leq T$$

де t_1, t_2, t_3 – трудомісткість виробництва 1 кг продукції i -го виду, люд·год/кг;

x_1, x_2, x_3 – виробничий обсяг, кг;

T – доступний фонд робочого часу, люд·год.

Обмеження попиту з урахуванням сезонності:

$$x_i \leq D_i \cdot k_i \cdot s_i, \quad i = 1, 2, 3$$

де x_i – виробничий обсяг, кг;

D_i – прогнозований попит на продукцію i -го виду, кг;

k_i – коефіцієнт реалізації ($0 \dots 1$), частка від обсягу виробництва, яка реально продається;

s_i – сезонний коефіцієнт.

Це дозволяє уникнути перевиробництва в періоди низького попиту та максимізувати прибуток у пікові сезони.

Використання сезонних коефіцієнтів у моделі дозволяє: планувати виробництво з випередженням ринкових змін, мінімізувати ризики простоїв та надлишкових запасів, оптимізувати витрати на закупівлю сировини з урахуванням сезонних коливань цін, підвищити точність бюджету продажів і фінансових прогнозів. Для підприємств кондитерської галузі особливо важливо враховувати, що сезонність впливає не лише на обсяги реалізації, а й на структуру попиту: у теплий період переважають сухі вироби, у холодний – шоколадні. Це створює додаткові можливості для гнучкого перерозподілу виробничих потужностей. Удосконалена модель оптимізації забезпечує: високу точність планування виробництва; адаптивність до сезонних та ринкових коливань; максимізацію прибутку в умовах змінного попиту; зниження ризиків неефективного використання ресурсів; створення основи для інтеграції моделі в інформаційні системи типу MES/ERP.

2.6 Удосконалення методу визначення раціонального розподілу ресурсів ІС кондитерського підприємства

У практиці управління виробничою діяльністю підприємств харчової та, зокрема, кондитерської галузі широкого застосування набув класичний метод оптимізації розподілу ресурсів, що ґрунтується на економіко-математичному моделюванні та методах лінійного програмування. Даний підхід спрямований

на визначення таких обсягів виробництва продукції, які забезпечують максимальний економічний результат за умов обмеженості ресурсів і дотримання технологічних нормативів [36].

Основою існуючого методу є припущення про відносну стабільність виробничих умов, детермінований характер вхідних даних і можливість формалізації виробничих процесів у вигляді системи лінійних залежностей. Метод реалізується у вигляді послідовності взаємопов'язаних етапів.

На першому етапі здійснюється формування інформаційної бази, яка включає збирання та систематизацію економічних і технологічних показників діяльності підприємства. До таких даних належать собівартість одиниці продукції, ціни реалізації, вартість основних видів сировини та енергоносіїв, виробничі нормативи витрат ресурсів, планові або прогнозні обсяги попиту, а також наявні виробничі потужності. Сформована інформаційна база слугує основою для параметризації математичної моделі та визначає коректність подальших розрахунків.

Другий етап передбачає побудову математичної моделі прибутку підприємства. Як правило, цільова функція формується на основі маржинального доходу і має вигляд лінійної суми різниці між ціною реалізації та собівартістю продукції, помноженої на обсяги її випуску. У загальному вигляді така модель дозволяє кількісно оцінити економічний результат кожного виробничого варіанта та виступає критерієм оптимальності.

На третьому етапі формується система обмежень, що відображає реальні виробничі умови. Для кондитерських підприємств обмеження, як правило, пов'язані з наявністю сировинних ресурсів (борошно, цукор, какао-продукти, жири компоненти), фондом робочого часу обладнання, пропускною здатністю виробничих цехів, а також доступністю трудових ресурсів. Обмеження задаються у вигляді лінійних нерівностей і забезпечують технологічну та економічну допустимість отриманих рішень.

Четвертий етап включає нормалізацію вхідних даних та перевірку їх коректності. На цьому етапі здійснюється виявлення нелогічних або

аномальних значень, перевірка узгодженості показників із виробничими нормативами та усунення можливих помилок у вихідній інформації. Даний етап є критично важливим для запобігання отриманню формально оптимальних, але практично непридатних результатів.

П'ятий етап полягає безпосередньо у розв'язанні задачі оптимізації. Залежно від складності моделі та кількості змінних можуть застосовуватися симплекс-метод, метод гілок і меж, градієнтні методи або методи зваженої оптимізації у випадку багатокритеріальних задач. Вибір алгоритму визначається структурою моделі та вимогами до точності розв'язку.

На шостому етапі виконується аналіз отриманих результатів. На основі оптимального розв'язку визначаються раціональні обсяги виробництва окремих видів продукції, очікуваний прибуток, структура асортименту та економічні ефекти від реалізації запропонованого плану. Отримані дані використовуються для прийняття управлінських рішень щодо планування виробничої діяльності.

Сьомий етап передбачає перевірку адекватності моделі у виробничих умовах. Така перевірка може здійснюватися шляхом апробації моделі на реальному підприємстві, використання її в експериментальних виробничих планах або порівняння розрахункових показників із фактичними економічними результатами. Метою етапу є оцінка практичної придатності моделі та виявлення можливих відхилень.

Практичне застосування існуючого методу на прикладі кондитерського підприємства, що виробляє кілька видів продукції (наприклад, цукрове печиво, шоколадні батончики та вафлі), дозволяє визначити таку структуру виробництва, яка забезпечує максимальний прибуток за наявних ресурсних обмежень, оцінити вплив змін попиту або цін на економічні результати та обґрунтувати рішення щодо перерозподілу сировини між видами продукції.

Описаний метод є базовим і широко використовується в системах виробничого планування та ресурсного менеджменту. Саме він слугує теоретичним і методологічним підґрунтям для подальших удосконалень,

спрямованих на врахування динамічних факторів, сезонних коливань попиту та змінності ресурсних обмежень у сучасних умовах функціонування кондитерських підприємств.

Удосконалений метод реалізується в підсистемі планування ІСУ кондитерського підприємства, що забезпечує автоматизоване формування оптимальних виробничих планів. Його структура ґрунтується на логічній послідовності етапів, які дозволяють перетворити вхідні параметри виробництва на вихідні оптимізовані управлінські рішення. Метод враховує попередньо побудовані моделі ресурсних обмежень, сезонні коливання попиту, економічні показники виробництва та технологічні можливості підприємства [37].

Ключовою особливістю методу є те, що він враховує моделі ресурсних обмежень. Ці моделі включають систему математичних співвідношень, що регламентують можливі значення виробничих параметрів. До таких моделей належать: обмеження на доступні обсяги сировини, що задають максимальні значення можливого випуску продукції кожного виду; обмеження на фонд часу роботи обладнання та персоналу; обмеження технологічних процесів, які визначають взаємозв'язок між виробничими потоками; сезонні та ринкові обмеження, пов'язані зі зміною попиту (коефіцієнти si) та коригуванням обсягів виробництва (ki); економічні обмеження, що враховують собівартість, маржинальний дохід і допустиме ресурсне навантаження.

Використання цих попередньо визначених математичних моделей дозволяє методу формувати множину допустимих рішень, з яких надалі обирається оптимальний варіант. Завдяки введенню коригуючих коефіцієнтів ki та сезонних коефіцієнтів si метод стає чутливим до зовнішнього середовища, що дозволяє адаптувати виробничі обсяги до реальних умов.

Удосконалений метод є елементом математичного забезпечення інформаційної системи підприємства, що забезпечує можливість його регулярного використання в реальних умовах функціонування кондитерського виробництва. Це дає змогу оперативно реагувати на зміни попиту, ресурсної

бази та економічних параметрів, забезпечуючи стабільне зростання прибутковості підприємства.

Метод визначення раціонального розподілу виробничих ресурсів спирається на принцип максимізації прибутку з урахуванням релевантних технологічних та ринкових факторів. Для реалізації методу сформована цільова функція, яка інтегрує: ціни реалізації продукції; виробничої собівартості; сезонного коефіцієнта попиту; коригуючого коефіцієнта попиту; обсягу виробництва.

Метою є знаходження таких значень обсягів виробництва x_1, x_2, x_3 , які максимально підвищують результативність виробництва в рамках доступних ресурсів.

Удосконалена оптимізаційна модель прибутку має вигляд:

$$\begin{aligned} \max P = & (b_1 - c_1) \cdot k_1 \cdot s_1 \cdot x_1 + (b_2 - c_2) \cdot k_2 \cdot s_2 \cdot x_2 +, \dots, + \\ & + (b_i - c_i) \cdot k_i \cdot s_i \cdot x_i +, \dots, + (b_n - c_n) \cdot k_n \cdot s_n \cdot x_n \end{aligned} \quad (2.10)$$

де $\max P$ – максимальний прибуток, грн;

b_i – ціна реалізації продукції i -го виду, грн/кг;

c_i – собівартість виробництва продукції i -го виду, грн/кг;

k_i – коефіцієнт коригування попиту;

s_i – сезонний коефіцієнт;

x_i – обсяг виробництва відповідного виду продукції.

Запровадження сезонних коефіцієнтів (2.10) дозволяє врахувати характерні для кондитерського ринку сезонні коливання: зниження попиту влітку, його зростання в передсвяткові періоди, зміни купівельної спроможності тощо. Коефіцієнт k_i забезпечує уточнення прогнозного попиту з урахуванням поведінкових і ринкових факторів.

Для коректної реалізації методу необхідно врахувати реальні технологічні та ресурсні можливості підприємства. У моделі використовуються обмеження.

Обмеження на сировинні ресурси:

$$a_{11} \cdot x_1 + a_{12} \cdot x_2 + a_{13} \cdot x_3 \leq R_1$$

де a_{11}, a_{12}, a_{13} – витрати основної сировини (цукор, борошно, какао тощо) на 1 кг продукції j -го виду, кг/кг;

x_1, x_2, x_3 – виробничий обсяг, кг;

R_1 – доступний обсяг основної сировини, кг.

$$a_{21} \cdot x_1 + a_{22} \cdot x_2 + a_{23} \cdot x_3 \leq R_2$$

де a_{21}, a_{22}, a_{23} – витрати додаткової сировини на 1 кг продукції j -го виду, кг/кг;

x_1, x_2, x_3 – виробничий обсяг, кг;

R_2 – доступний обсяг додаткової сировини, кг.

Обмеження на виробничі потужності:

$$t_1 \cdot x_1 + t_2 \cdot x_2 + t_3 \cdot x_3 \leq T$$

де t_1, t_2, t_3 – трудомісткість виробництва 1 кг продукції i -го виду, люд·год/кг;

x_1, x_2, x_3 – виробничий обсяг, кг;

T – доступний фонд робочого часу, люд·год.

Обмеження на ринковий попит:

$$x_i \leq D_i \cdot k_i \cdot s_i, \quad i = 1, 2, 3$$

де x_i – виробничий обсяг, кг;

D_i – прогнозований попит на продукцію i -го виду, кг;

k_i – коефіцієнт реалізації (0...1), частка від обсягу виробництва, яка реально продається;

s_i – сезонний коефіцієнт.

Обмеження забезпечують реалістичність рішень, запобігаючи перевищенню наявних ресурсів або виробництву продукції понад ринковий попит.

Удосконалений метод визначення раціонального розподілу ресурсів у виробничій системі кондитерського підприємства базується на використанні економіко-математичної моделі максимізації прибутку за формулою (2.8). Метод передбачає поетапне виконання операцій з оброблення вихідних даних, формування допустимого простору рішень, обчислення критерію оптимальності та вибору найкращого варіанту розподілу ресурсів.

Опис кожного з етапів.

Етап 1. Збір та формалізація необхідних даних.

На першому етапі потрібно здійснити збір, верифікацію та структурування всіх необхідних параметрів. Вони формують вихідну базу для подальших обчислень за формулою максимізації прибутку (2.8) :

У структурованому вигляді отримуємо групи параметрів: економічні показники, технологічні нормативи, ресурсні обмеження, прогностичні показники попиту:

Усі ці дані формують параметричний набір, який використовується на наступних етапах.

Етап 2. Формування множини допустимих варіантів обсягів виробництва.

Крок 1. Побудова простору можливих варіантів.

На основі визначених змінних x_1 , x_2 , x_3 , що відображають обсяги виробництва кожного виду продукції, формується початковий простір варіантів. Цей простір може задаватися: шляхом перебору дискретних значень змінних; або шляхом генерації рішень за певним алгоритмом (сітковий пошук, стохастичне генерування тощо).

Таким чином формується початкова множина можливих комбінацій обсягів виробництва.

Крок 2. Перевірка комбінацій варіантів на відповідність системі обмежень.

Кожна сформована комбінація кількості $x_1, x_2, x_i, \dots, x_n$ перевіряється на відповідність сукупності обмежень моделі.

Ресурсні обмеження. Перевіряється, чи не перевищує потреба у сировині, трудових ресурсах, потужностях обладнання та енергії доступні значення.

Технологічні обмеження. Враховуються умови дотримання рецептур, пропорцій складників, тривалості технологічних операцій та максимально допустимих обсягів виробництва.

Економічні обмеження. Контролюється відповідність витрат бюджету, обмеженням собівартості та іншим економічним параметрам, встановленим моделлю.

Крок 3. Формування множини допустимих рішень.

Комбінації, які повністю задовольняють усі обмеження, включаються до множини допустимих рішень.

Ця множина представляє всі варіанти виробничої програми, що: не порушують ресурсних лімітів, відповідають технологічним вимогам, є економічно доцільними, і можуть бути реалізовані на підприємстві.

Етап 3. Розрахунок прибутку для кожного варіанту виробництва продукції.

Для кожного допустимого набору виробничих обсягів виконується обчислення значення критерію оптимізації – прибутку підприємства. Обчислення здійснюється за формулою (2.10).

У ході цих обчислень враховується: коригування значення попиту за рахунок коефіцієнтів k_i ; сезонні коливання попиту, що відображаються коефіцієнтами s_i ; кількість продукції кожного виду, що може бути виготовлена в межах заданих обмежень.

Для кожної x_1, x_2, x_3 обчислено відповідне значення прибутку P .

Комбінації x_1, x_2, x_3 – це всі допустимі варіанти обсягів виробництва

трьох (у загальному – n) продуктів.

Джерело комбінацій.

Комбінації походять з генератора варіантів (CombinationGenerator), який працює на базі вхідних діапазонів та обмежень: для кожного продукту i визначено інтервал допустимих обсягів $x_i^{min} \leq x_i \leq x_i^{max}$ (одиниці: шт., кг тощо); крок дискретизації (наприклад, партія 10 кг) – Δx (одиниці: кг/шт.);

У процесі формування множини можливих варіантів виробничих обсягів $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ виникає необхідність здійснювати перебір допустимих значень таким чином, щоб: не перевантажувати обчислювальний процес надмірною кількістю комбінацій; забезпечити реалістичність та технологічну доцільність отриманих варіантів; врахувати реальні обмеження виробництва (кожен продукт виготовляється партіями, а не по 1 кг чи 1 штуці випадковим чином).

Для цього вводиться поняття кроку дискретизації Δx .

Крок дискретизації Δx – це мінімально можлива зміна обсягу виробництва певного виду продукції, яка технологічно відповідає реальним умовам роботи кондитерського підприємства. Генератор формує набори значень x_1, x_2, x_3 відповідно до цих діапазонів.

Отже, комбінація – це конкретна трійка (або n -тка) значень, кожне з яких лежить у визначеному діапазоні й кратне кроку дискретизації.

Два практичні підходи до формування множини комбінацій.

А. Повний (детермінований) перебір по сітці.

Підходить коли діапазони невеликі або крок великий. Для x_1 від x_1^{min} до x_1^{max} з кроком Δx . Для x_2 – аналогічно. Для x_3 – аналогічно генеруємо всі трійки (x_1, x_2, x_3) і потім фільтруємо по обмеженнях (ресурс, час, потужності).

Перевага: гарантує, що усі допустимі варіанти розглянуто. Недолік: експоненційне зростання кількості комбінацій – велика обчислювальна вартість.

Якщо простір величезний, використовують: Генетичні алгоритми (Genetic Algorithm, GA) – популяція індивідуумів (кожен – вектор x), селекція → кросовер → мутація; після кожної ітерації рішення перевіряються на

допустимість; кращі індивіди зберігаються. Частинки рою, імітація відпалу, локальний пошук – швидко дають добрі (але не гарантовано глобальні) рішення. Гібрид: старт з евристичних рішень + локальна оптимізація або LP/ILP для уточнення.

У практиці для кондитерського підприємства застосуємо комбінований підхід: якщо номенклатура продуктів невелика – дискретний перебір; інакше – GA з перевіркою обмежень.

Фільтрація комбінацій (перевірка на обмеження).

Після генерації кожна комбінація проходить модуль перевірки, який відкидає варіанти, що порушують: ресурсні обмеження (наявні запаси сировини, кілограми; одиниця – кг або тони), наприклад: технологічні обмеження (час роботи обладнання в годинах, продуктивність ліній), економічні/ринкові обмеження (макс. попит: $x_i \leq \text{forecast}_i$), інші правила (мінімальні партії, заборонені поєднання тощо).

Тільки ті трійки, що успішно пройшли перевірку, потрапляють у множину допустимих рішень.

Для кожної допустимої комбінації обчислюється прибуток:

$$P = (b_1 - c_1) \cdot k_1 \cdot s_1 \cdot x_1 + (b_2 - c_2) \cdot k_2 \cdot s_2 \cdot x_2 + (b_i - c_i) \cdot k_i \cdot s_i \cdot x_i + (b_n - c_n) \cdot k_n \cdot s_n \cdot x_n \quad (2.11)$$

де P – прибуток, грн;

b_i – ціна реалізації продукції i -го виду, грн/кг;

c_i – собівартість виробництва продукції i -го виду, грн/кг;

k_i – коефіцієнт коригування попиту;

s_i – сезонний коефіцієнт;

x_i – обсяг виробництва відповідного виду продукції.

Далі зберігаються пари (комбінація, P); проводиться ранжування за P ; вибір того, що дає максимальне P (або багатокритеріальний вибір, якщо є інші цілі) (2.11).

Етап 4. Вибір оптимального варіанту отримання максимального прибутку.

Після оцінки всіх допустимих варіантів відбувається вибір оптимального рішення – того, яке забезпечує максимальне значення прибутку:

$$P = \max (P_1, P_2, P_i, \dots, P_n) \quad (2.12)$$

де P – максимальний прибуток, грн;

Процедура вибору включає (2.12): пошук максимального значення у сформованій таблиці результатів (таблиця 2.3); визначення відповідної комбінації $(x_1, x_2, x_i, \dots, x_n)$; перевірку стійкості рішення, тобто його чутливості до зміни параметрів моделі; оцінку збалансованості – допустимості завантаження обладнання та ресурсів.

Етап 5. Якщо рішення задовольняє всі критерії, воно вважається оптимальним і реалізація методу завершується. У випадку виявлення невідповідностей або нестійкості – здійснюється повернення до попередніх етапів для коригування вхідних параметрів.

Знайдене оптимальне рішення відображається у конкретних рекомендаціях для планування виробничої діяльності підприємства.

Відповідно до обраного набору (x_1, x_2, x_3) формуються: оптимальний план виробництва, який визначає обсяг виготовлення продукції кожного виду, раціональний розподіл ресурсів між технологічними операціями та виробничими лініями, рекомендації щодо графіків роботи обладнання, включно з коригуванням навантаження, усуненням простоїв та оптимізацією черговості виконання операцій, автоматичне оновлення параметрів виробничої програми, якщо відбуваються зміни у цінах, собівартості, сезонних коефіцієнтах або обсягах доступних ресурсів.

Удосконалений метод забезпечує підвищення точності визначення раціонального розподілу ресурсів; урахування сезонних та ринкових коливань

продукції; підвищення гнучкості планування завдяки динамічним коефіцієнтам s_i та k_i ; можливість адаптації виробничої програми при зміні доступних ресурсів чи обмежень; формування економічно обґрунтованих рішень щодо розподілу ресурсів між конкурентними напрямками виробництва. Результатом методу є оптимальна виробнича програма, що характеризує раціональний та збалансований розподіл ресурсів між видами продукції з метою досягнення найвищого можливого значення цільового показника. Метод може бути реалізований: як окремий модуль (або підсистема) у складі інформаційної системи управління виробництвом; як елемент ERP-системи; ІС дозволяє автоматизовано розв'язувати оптимізаційну задачу розподілу ресурсів, що забезпечує користувача готовим набором управлінських рішень. Такий метод та модель забезпечують оперативність оновлення виробничого плану та адаптивне реагування на ринкові зміни. Переваги застосування удосконаленого методу для виробництва: зменшити загальні виробничі витрати; підвищити рівень використання обладнання; забезпечити стійке планування виробництва з урахуванням сезонних факторів. Розроблений метод визначення раціонального розподілу ресурсів є елементом ІС управління виробництвом кондитерського підприємства. Завдяки поєднанню економічних, технологічних та сезонних параметрів він дозволяє формувати обґрунтовані рішення, які забезпечують стабільне підвищення ефективності виробничих процесів.

Таким чином виконано формалізацію задачі оптимізації, визначено структуру цільової функції та ключові параметри, що впливають на ефективність виробничих процесів. Побудована математична модель враховує економічні показники, технологічні обмеження, можливості ресурсного забезпечення та сезонні коливання попиту. Це дозволило створити узагальнену базу для подальших розрахунків. Існуючі методи оптимізації та адаптовано їх до специфіки функціонування кондитерського підприємства. Визначено, що найбільш ефективними є методи лінійного програмування,

коригування попиту та моделі оптимального планування з урахуванням сезонних та ринкових факторів. Введення додаткових коригувальних і сезонних коефіцієнтів дозволяє значно підвищити точність опису реальних виробничих умов. Розроблено математичну модель раціонального розподілу ресурсів, яка враховує сировинні, технологічні, економічні та сезонні обмеження. Введення сезонних коефіцієнтів та індексів коригування попиту дозволяє адекватно реагувати на коливання ринку, забезпечуючи адаптивність виробничої стратегії. Удосконалений метод забезпечує можливість автоматизації обчислювального процесу, а його гнучкість сприяє адаптації до різних умов функціонування підприємства.

У таблиці 2.2 наведена порівняльна характеристика існуючого та удосконаленого методів розподілу ресурсів

Таблиця 2.2 – Порівняльна характеристика існуючого та удосконаленого методів розподілу ресурсів

Критерій порівняння	Існуючий (базовий) метод	Удосконалений метод
Мета оптимізації	Максимізація прибутку за фіксованих ресурсних обмежень	Максимізація прибутку з урахуванням динамічних економічних і технологічних факторів
Тип математичної моделі	Лінійна модель прибутку	Удосконалена економіко-математична модель прибутку з адаптивними параметрами
Характер вхідних даних	Статичні, детерміновані	Частково динамічні, з урахуванням сезонних і ринкових коливань
Урахування попиту	Фіксований або середньостатистичний попит	Попит змінний, з можливістю коригування виробничої програми
Обмеження ресурсів	Жорстко задані, незмінні	Гнучкі, з можливістю адаптації при зміні умов
Технологічні коефіцієнти	Постійні нормативні значення	Динамічні коефіцієнти (s_i) та (k_i), що відображають реальні умови виробництва
Урахування сезонності	Не враховується або враховується опосередковано	Безпосередньо враховується у параметрах моделі

Кінець таблиці 2.2

Алгоритм розв'язання	Класичні методи (симплекс-метод, градієнтні методи)	Удосконалений оптимізаційний алгоритм із покращеною стратегією пошуку
Стійкість до локальних екстремумів	Обмежена	Підвищена завдяки удосконаленню процедури пошуку
Масштабованість моделі	Обмежена зі зростанням кількості змінних	Забезпечено роботу з великою кількістю взаємопов'язаних параметрів
Гнучкість планування	Низька, потребує повного перерахунку	Висока, можливе оперативне коригування планів
Результат оптимізації	Оптимальні обсяги виробництва за заданих умов	Оптимальна виробнича програма з адаптацією до змін середовища
Практичне використання	Обмежене стабільними умовами виробництва	Придатний для використання в умовах мінливого ринку
Інтеграція з ІС	Часткова або відсутня	Орієнтований на інтеграцію з ERP та MES
Економічний ефект	Помірний	Підвищений за рахунок більш раціонального розподілу ресурсів

Порівняльний аналіз показує, що існуючий метод є ефективним за стабільних виробничо-економічних умов, однак має обмежену гнучкість і не враховує динаміку ринку. Удосконалений метод усуває зазначені недоліки завдяки використанню адаптивних параметрів, розширенню математичної моделі та удосконаленню алгоритму оптимізації, що забезпечує підвищення точності та практичної придатності отриманих рішень.

3 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ МЕТОДУ ТА МОДЕЛІ ОПТИМІЗАЦІЇ РОЗПОДІЛУ РЕСУРСІВ НА КОНДИТЕРСЬКОМУ ПІДПРИЄМСТВІ

3.1 Розробка загального алгоритму реалізації методу та моделі розподілу ресурсів на підприємстві кондитерської галузі

Впровадження моделі та методу раціонального розподілу ресурсів на кондитерському підприємстві передбачає побудову цілісного програмно-алгоритмічного комплексу інформаційної системи управління, що забезпечує автоматизоване опрацювання вихідних параметрів, аналіз допустимих варіантів виробничої програми та формування оптимального рішення.

Загальну послідовність реалізації методи розподілу ресурсів представимо у вигляді наступного алгоритму. Його реалізацію описуємо наступними кроками: збір та верифікації вхідних даних, формування простору можливих виробничих рішень, обчислення цільового показника для кожного допустимого варіанта, прийняття рішення та формування підсумкового варіанту розподілу ресурсів, адаптації та оновлення даних, Розробка Інтерфейсу взаємодії з користувачем, інтеграції з іншими функціональними модулями ІС.

Збір та верифікації вхідних даних. Для цього забезпечується автоматизоване отримання необхідної інформації від технологічних, виробничих та економічних служб підприємства. Інформаційна система здійснює перевірку коректності вхідних значень шляхом контролю діапазонів, логічних співвідношень та узгодженості різних типів даних (сировинних, часових, економічних). Таким чином гарантується достовірність інформації, яка надходить до математичного ядра моделі.

Формування простору можливих виробничих рішень. Програмний модуль ІС підтримує побудову множини варіантів розподілу ресурсів відповідно до реальних виробничих обмежень підприємства. На цьому рівні

відбувається врахування технологічних, ресурсних і економічних лімітів, що дозволяє створити основу для подальших оптимізаційних розрахунків. Особливість цього модуля полягає в тому, що він забезпечує адаптивність до змін вихідних умов, автоматично відтворюючи множину допустимих рішень при оновленні будь-якого параметра.

Обчислення цільового показника для кожного допустимого варіанта. Центральний елемент реалізації – програмний модуль, що виконує обчислення цільового показника для кожного допустимого варіанта та здійснює пошук рішення, яке забезпечує максимальний ефект від використання ресурсів. Здійснюється інтеграція параметрів моделі (маржинальні доходи, сезонні та коригуючі коефіцієнти, виробничі обмеження) і реалізує обчислювальні процедури відповідно до алгоритму, визначеного у попередньому розділі.

Прийняття рішення та формування підсумкового варіанту розподілу ресурсів. Після виконання оптимізаційних розрахунків переходять до формування рішення, яке може бути безпосередньо використане технологічним та планово-економічним відділом підприємства. Результат подається у вигляді структурованого плану розподілу сировини та часу обладнання між видами продукції, що забезпечує максимальний очікуваний економічний ефект у встановлених обмеженнях.

Адаптації та оновлення даних. В умовах динамічності попиту та змін у виробничих параметрах важливо забезпечити актуальність оптимізаційного рішення. Для цього здійснюється автоматичне перерахування оптимального розподілу ресурсів при зміні будь-якої вхідної величини – наприклад, доступності сировини, прогнозів попиту чи значень коефіцієнтів. Завдяки цьому метод стає придатним для використання в режимі оперативного планування.

Розробка Інтерфейсу взаємодії з користувачем. Практична реалізація методу та моделі передбачає створення зрозумілого інтерфейсу, через який користувач отримує можливість: завантажувати або коригувати вхідні дані; контролювати процес виконання оптимізаційних розрахунків; аналізувати

результати у вигляді таблиць, графіків та звітних форм; ініціювати перерахунок рішення у разі змін виробничої ситуації.

Інтеграції з іншими функціональними модулями ІС. Для підвищення ефективності реалізації програмний функціональний модуль розподілу ресурсів функціонує у зв'язку з іншими функціональними модулями – бухгалтерським, складським, виробничим і планово-економічним. Це дає змогу скоротити час на підготовку даних, зменшити кількість ручних операцій та створити єдиний контур управління ресурсами. На рисунку 3.1 наведена загальна структура алгоритму практичної реалізації методу та моделі розподілу ресурсів на підприємстві кондитерської галузі

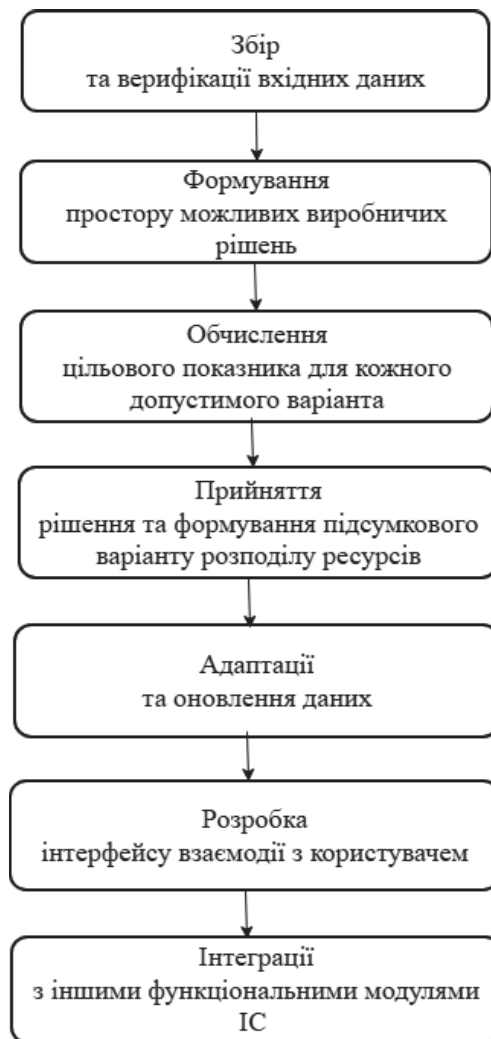


Рисунок 3.1 – Загальний алгоритм реалізації методу та моделі розподілу ресурсів на підприємстві кондитерської галузі

Для побудови оптимізаційної моделі використовуються такі групи вхідних даних (таблиця 3.1):

Таблиця 3.1 – Структура набору даних для побудови оптимізаційної моделі

№	Група даних	Зміст показників	Одиниці вимірювання
1	Технологічні дані	Потужність обладнання, норми витрат сировини, продуктивність ліній, тривалість технологічних операцій	кг/год, год, од.
2	Ресурсні обмеження	Доступні обсяги сировини, допоміжних матеріалів, енергоресурсів, робочого часу	кг, кВт·год, люд.-год
3	Економічні показники	Ціни на сировину, заробітна плата, собівартість, прибуток на одиницю продукції	грн, грн/кг
4	Організаційні параметри	Графіки змін, режими роботи ліній, обсяг попиту на продукцію	год/добу, тиждень, кг
5	Якісні характеристики	Вимоги до рецептур, стандарти якості, технологічні допуски	% відхилення, ум. од.

Таблиця 3.1 демонструє структуру набору даних, що надходять із відповідних відділів: виробничого, енергетичного, планово-економічного та технологічного. На підприємстві кондитерської галузі основними даними є: база даних технологічних нормативів – містить інформацію про рецептури виробів, питомі норми споживання сировини, технологічні втрати (кг/т продукції); система диспетчерського обліку – дані про завантаження та простої обладнання, фактичний випуск продукції (кг/зміну); фінансово-економічна система (ERP) – містить ціни, витрати на оплату праці, вартість енергоносіїв (грн/од.); система технічного обліку енергії – споживання електроенергії, пари, холоду (кВт·год або МДж); відділ маркетингу – прогнози попиту, обсяги замовлень (кг або т).

Загальна структура алгоритму практичної реалізації методу поєднує обробку даних, генерацію можливих рішень, алгоритмічну оптимізацію та

формування підсумкового плану розподілу ресурсів. Такий підхід дозволяє забезпечити ефективну підтримку планових і оперативних рішень у виробничій діяльності кондитерського підприємства, гарантуючи адаптивність та високу точність розрахунків.

3.2 Формування вхідних даних та інформаційних потоків для оптимізаційної моделі розподілу ресурсів.

У процесі побудови практичної моделі використовуються різні джерела даних – від планових норм і технологічних карт до оперативної інформації про доступні ресурси, фактичні залишки на складах чи обмеження у роботі виробничих ліній.

Основні етапи формування інформаційних потоків: збір первинних даних. Дані надходять із технологічних карт, системи обліку ресурсів, системи планування виробництва, даних складу, бухгалтерського обліку та ERP-платформи підприємства; синтаксична та логічна перевірка. Перевіряються пропуски, дублювання, некоректні значення, невідповідності між джерелами. узгодження одиниць виміру. Усі показники приводяться до єдиного формату (кг, год, грн, кВт·год тощо); агрегація та нормалізація даних. Значення, отримані з різних підсистем, об'єднуються та перетворюються у формат, придатний для обчислень; завантаження у програмний модуль. Після перевірки дані зберігаються у структурованих масивах, DTO-класах або JSON-конфігураціях, які використовуються алгоритмом оптимізації. Значення формування вхідних даних у контексті подальшої реалізації моделі. Вхідні дані є ключовою ланкою, яка визначає точність роботи оптимізаційної моделі. Таким чином, якість формування вхідних даних безпосередньо впливає на успішність практичного впровадження методу оптимізації розподілу ресурсів на підприємстві.

3.3 Алгоритм реалізації методу оптимізації розподілу ресурсів.

Алгоритм оптимізації розподілу ресурсів забезпечує автоматизоване визначення оптимальних обсягів виробництва продукції за наявних ресурсних, технологічних та економічних умов. Основна мета алгоритму – сформулювати та проаналізувати множину допустимих варіантів розподілу ресурсів і вибрати той, що забезпечує максимальний прибуток відповідно до функції цільового критерію. Загальна логіка функціонування алгоритму. Алгоритм оптимізації побудований так, щоб забезпечити гнучкість, адаптивність та можливість масштабування у випадку зміни номенклатури продукції або ресурсної структури підприємства. Його робота передбачає: автоматичне отримання структурованих вхідних даних; формування комбінацій можливих варіантів обсягів виробництва; багаторівневу перевірку обмежень; побудову функції цільового критерію з урахуванням коригувальних коефіцієнтів; вибір рішення, що забезпечує максимум прибутку.

Схематично алгоритм можна представити як послідовність взаємопов'язаних операцій. На рисунку 3.2. наведено схему алгоритму оптимізації розподілу ресурсів.

Алгоритм розпочинається з етапу збору вхідних даних, який включає техніко-економічні та технологічні параметри: виробничі потужності, характеристики обладнання, обмеження щодо сировини, тривалості технологічних операцій, витрат енергоресурсів, собівартості та очікуваного прибутку. Ці дані структуруються та передаються до блоку підготовки моделі. У другому блоці виконується перевірка коректності та нормалізація даних, що передбачає фільтрацію помилок, приведення параметрів до уніфікованого формату та попередню оцінку їх відповідності технологічним умовам. За необхідності здійснюється коригування параметрів або повернення до попереднього етапу.

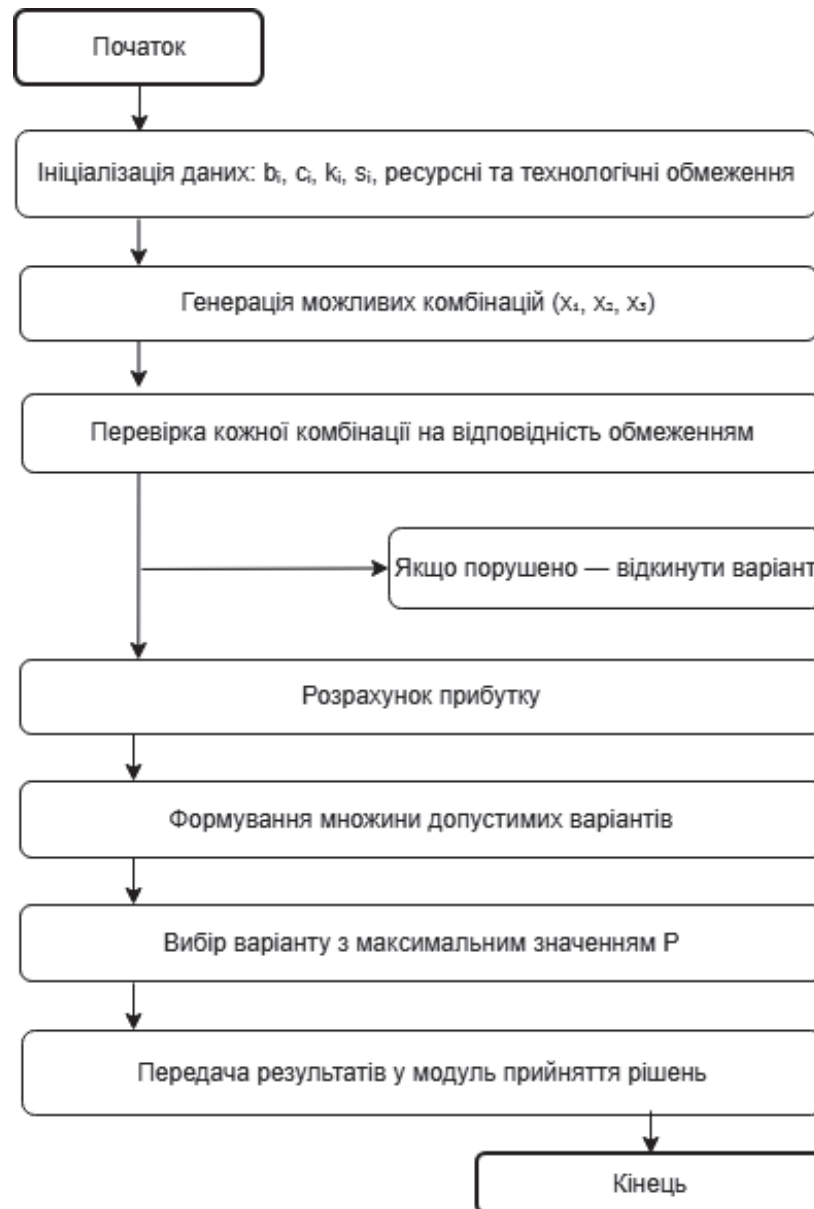


Рисунок 3.2 – Схема алгоритму оптимізації розподілу ресурсів

Наступний етап – формування математичної моделі розподілу ресурсів. У цьому блоці визначається цільова функція (максимізація прибутку), обмеження (виробничі, технологічні, сировинні, часові) та набір змінних (обсяги виробництва кожного виду продукції). Модель структурується в аналітичному вигляді, після чого передається на розв’язання.

Після математичного формування моделі відбувається дискретизація простору можливих рішень. Цей процес передбачає поділ діапазонів змінних на кроки, що дозволяє створити множину можливих комбінацій виробничих

обсягів, які відповідають базовим обмеженням. Дискретизація забезпечує можливість перебору рішень у рамках алгоритму.

У центральному блоці схеми знаходиться генератор допустимих альтернатив, який будує всі варіанти виробничих програм, що не порушують жодного з заданих обмежень. Для кожної альтернативи розраховуються витрати, собівартість, ресурсомісткість та потенційний прибуток.

Далі відбувається обчислення цільової функції для кожного варіанта. На цьому етапі алгоритм порівнює альтернативи між собою, оцінює ефективність кожного рішення, відкидає нераціональні або економічно не вигідні варіанти та формує впорядкований набір рішень за критерієм максимізації прибутку.

У завершальному блоці здійснюється вибір оптимального рішення, де з-поміж усіх допустимих варіантів обирається той, що забезпечує максимальний економічний результат при дотриманні всіх технологічних та виробничих обмежень. Результат подається у вигляді набору оптимальних обсягів виробництва, структури використання ресурсів та очікуваного прибутку.

Формування допустимих варіантів розподілу ресурсів. На практичному рівні формування варіантів не передбачає повного перебору всіх можливих значень змінних, оскільки це може створювати надмірне навантаження на обчислювальну систему. Замість цього застосовується комбінований підхід, що включає використання діапазонів можливих обсягів виробництва x_1 , x_2 , x_3 , та задання мінімально можливого технологічного обсягу.

У результаті утворюється множина допустимих рішень, що є основою для подальшого вибору оптимального варіанту. Після розрахунку прибутку для всіх допустимих рішень здійснюється селекція оптимального варіанту. Це досягається за допомогою: пошуку максимуму в масиві значень P , фіксації відповідного набору значень x_1 , x_2 , x_3 , перевірки на відповідність додатковим умовам. Результатом роботи алгоритму є єдиний оптимальний набір параметрів розподілу ресурсів, що передається для подальшої інтеграції в модуль прийняття рішень. Основні етапи алгоритму оптимізації розподілу ресурсів представлені у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Основні етапи алгоритму оптимізації розподілу ресурсів

Етап	Зміст	Результат
Ініціалізація	Завантаження параметрів моделі	Масив вихідних даних
Генерація варіантів	Формування комбінацій x_i	Набір потенційних рішень
Перевірка обмежень	Фільтрація варіантів	Множина допустимих рішень
Розрахунок функції	Обчислення значень P	Масив прибутків
Вибір оптимуму	Пошук $\max P$	Оптимальний розподіл ресурсів

Практичне значення алгоритму.

Розроблений алгоритм дає можливість: автоматизувати стратегічне та оперативне планування виробництва; раціонально розподіляти ресурси; адаптувати виробництво до сезонних змін попиту; забезпечувати максимізацію економічного результату; використовувати модель у реальних умовах виробничої системи.

Таким чином, алгоритм оптимізації є ключовим елементом практичної реалізації методу розподілу ресурсів та основою для подальшої програмної реалізації.

3.4 Програмний модуль реалізацій розподілу ресурсів (Java).

Метод, що базується на максимізації прибутку та враховує обмеження, реалізовано програмним модулем засобами мови програмування Java, яка забезпечує надійність, платформну незалежність, об'єктно-орієнтований підхід та можливість інтеграції з існуючими корпоративними інформаційними системами підприємств.

Вибір мови Java обґрунтовується наступними факторами: по-перше, Java є однією з найпоширеніших мов програмування для розробки корпоративних

додатків, що забезпечує легкість інтеграції оптимізаційного модуля з ERP та MES системами підприємств; по-друге, наявність розвиненої екосистеми бібліотек та фреймворків дозволяє ефективно реалізувати складні алгоритми оптимізації; по-третє, кросплатформність Java забезпечує можливість розгортання системи на різних операційних системах без модифікації коду; по-четверте, строга типізація та механізми обробки виключень сприяють створенню надійних та стабільних додатків.

Для демонстрації модульності системи та чіткого розмежування відповідальності між її компонентами була розроблена (Unified Modelling Language, UML) діаграма класів (рисунок 3.3).

UML-діаграма класів, наведена на рисунку 3.3, є ключовим елементом моделювання архітектури програмно-алгоритмічного комплексу, який реалізує метод і модель оптимізації розподілу ресурсів у межах інформаційної системи управління виробництвом кондитерського підприємства. Її побудова необхідна з кількох причин. Діаграма класів відображає статичну структуру програмного забезпечення, тобто показує, які сутності (класи) беруть участь у реалізації методу, які атрибути вони містять та які операції виконують. Це дозволяє формалізувати внутрішню логіку роботи програмно-алгоритмічного комплексу (ПАК), забезпечуючи однозначне трактування структури програмного коду.

Діаграма визначає взаємозв'язки між компонентами: залежності, асоціації, агрегації та композиції. Це дає можливість зрозуміти, як реалізований обмін даними між частинами підсистеми планування ІСУ – наприклад, між модулем формування вхідних параметрів, модулем перевірки обмежень, модулем розрахунків прибутку та модулем вибору оптимального варіанту.

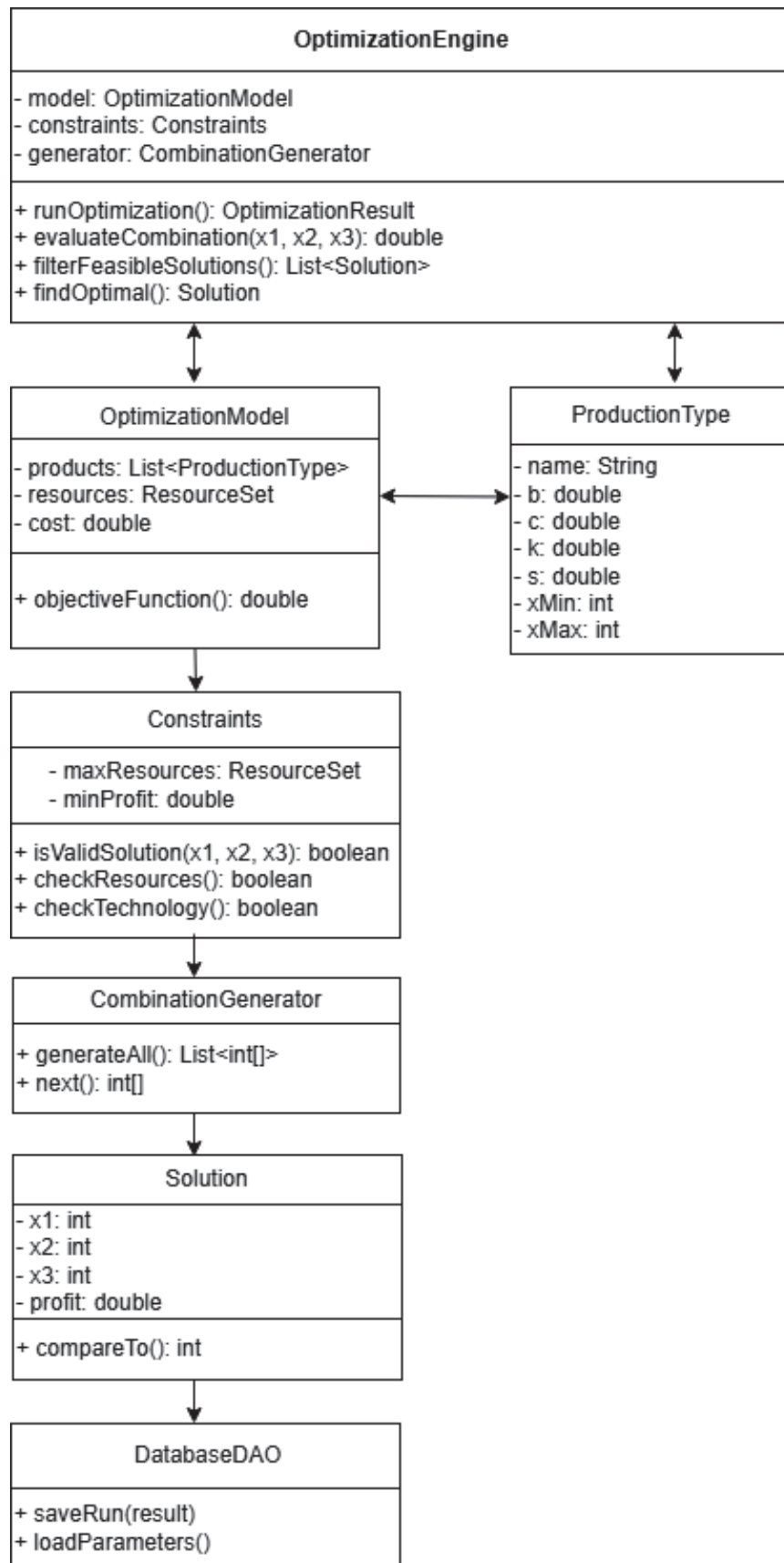


Рисунок 3.3 – UML-діаграма класів

UML-діаграма класів є основою для побудови програмної архітектури за принципами інкапсуляції, модульності та повторного використання коду. Вона забезпечує логічну впорядкованість компонентів, що дозволяє структурувати Java-проект таким чином, щоб кожний модуль виконував чітко визначену функцію: зберігання та обробку виробничих параметрів; реалізацію математичної моделі; доступ до бази даних (БД); логіку вибору оптимального варіанта; інтеграцію з іншими компонентами ІСУ підприємства. Наявність діаграми суттєво полегшує подальшу розробку, тестування та модернізацію програмного забезпечення, оскільки програмісти, аналітики та технологи отримують єдину модель, що описує структуру ПАК з погляду предметної області. UML-модель дозволяє здійснювати верифікацію правильності алгоритмічних рішень на етапі проєктування. Завдяки чітко визначеним зв'язкам між класами можна перевірити, чи всі етапи методу (збір даних, генерація варіантів, оцінка обмежень, розрахунок прибутку, вибір оптимального результату) мають відповідні реалізації у програмній структурі, а також переконатися, що не існує надлишкових або дубльованих компонентів.

Таким чином, UML-діаграма класів, представлена на рисунку 3.4, виконує низку важливих функцій: структурує програмну логіку, формалізує реалізацію методу, визначає архітектуру модулів, документує архітектурні рішення, слугує основою для подальшої реалізації, супроводу та розвитку ПАК, забезпечує прозорість та відтворюваність процесу оптимізації розподілу ресурсів. Ця UML-структура показує: залежності між моделлю, обмеженнями та оптимізатором, відокремлення генерації комбінацій від логіки оцінювання, наявність шару доступу до даних (Data Access Object, DAO) для збереження параметрів та результатів.

У лістингах 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6 представлено фрагмент Java-коду, який реалізує функціональну основу оптимізаційного модуля системи підтримки прийняття рішень щодо розподілу ресурсів на підприємстві кондитерської галузі.

Лістинг 3.1 – Java-код оптимізаційного модуля (ProductionType.java)

```

public class ProductionType {
    private String name;
    private double b; // selling price
    private double c; // production cost
    private double k; // conversion factor
    private double s; // unit resource need
    private int xMin;
    private int xMax;

    public ProductionType(String name, double b, double c,
double k, double s, int xMin, int xMax) {
        this.name = name;
        this.b = b;
        this.c = c;
        this.k = k;
        this.s = s;
        this.xMin = xMin;
        this.xMax = xMax;
    }

    public double profit(int x) {
        return (b - c) * k * s * x;
    }
}

```

Код демонструє архітектурний підхід, що базується на принципах модульності, інкапсуляції та чіткого розмежування відповідальності між компонентами. Така структура забезпечує зручність розширення, адаптації та інтеграції оптимізаційного модуля у загальну інформаційну систему підприємства. У наведеному коді реалізовано клас, який відповідає за формування, налаштування та виконання оптимізаційної процедури.

Лістинг 3.2 – Java-код оптимізаційного модуля (OptimizationModel.java)

```

public class OptimizationModel {
    private List<ProductionType> products;
    private ResourceSet resources;

    public OptimizationModel(List<ProductionType> products,
ResourceSet resources) {
        this.products = products;
        this.resources = resources;
    }
}

```

```

public double calculateProfit(int x1, int x2, int x3) {
    return products.get(0).profit(x1) +
           products.get(1).profit(x2) +
           products.get(2).profit(x3);

public List<ProductionType> getProducts() {
    return products;
}
}

```

Клас містить набір полів, що інкапсулюють вхідні параметри моделі: доступні для виробництва ресурси, вимоги до кожного виду продукції, продуктивність технологічних ліній, а також граничні умови й обмеження, пов'язані з виробничими потужностями. Дані параметри передаються до конструктора класу, який ініціалізує внутрішній стан моделі та перевіряє коректність вхідних значень. Такий підхід унеможливорює потрапляння до алгоритму неконсистентних або неповних даних, що підвищує надійність розрахунків.

Лістинг 3.3 – Java-код оптимізаційного модуля (Constraints.java)

```

public class Constraints {
    private ResourceSet maxResources;
    public Constraints(ResourceSet maxResources) {
        this.maxResources = maxResources;
    }
    public boolean isValidSolution(int x1, int x2, int x3,
List<ProductionType> products) {

        double totalResources =
            products.get(0).getS() * x1 +
            products.get(1).getS() * x2 +
            products.get(2).getS() * x3;

        if (totalResources > maxResources.getTotal()) return
false;
        return x1 >= products.get(0).getXMin() && x1 <=
products.get(0).getXMax() &&
            x2 >= products.get(1).getXMin() && x2 <=
products.get(1).getXMax() &&
            x3 >= products.get(2).getXMin() && x3 <=
products.get(2).getXMax();
    }
}

```

Головною частиною фрагмента є метод `optimize()`, що реалізує алгоритм пошуку оптимального рішення. Усередині цього методу послідовно виконуються ключові етапи обчислювального процесу: генерація початкової множини допустимих варіантів, застосування операторів еволюційного пошуку, оцінювання якості кожного варіанта та відбір найкращих кандидатів на наступну ітерацію. Структура методу дає можливість легко змінювати або комбінувати різні алгоритми оптимізації – наприклад, застосовувати генетичний алгоритм, модифікований еволюційний стратегічний підхід чи гібридний метод, що поєднує еволюційний пошук із локальним градієнтним уточненням. Завдяки цьому модуль може бути адаптований під специфіку різних цехів кондитерського виробництва, де співвідношення ресурсів і технологічні обмеження можуть значно відрізнятися.

Лістинг 3.4 – Java-код оптимізаційного модуля
(`CombinationGenerator.java`)

```
public class CombinationGenerator {
    private ProductionType p1, p2, p3;

    public CombinationGenerator(ProductionType p1,
        ProductionType p2, ProductionType p3) {
        this.p1 = p1;
        this.p2 = p2;
        this.p3 = p3;
    }

    public List<int[]> generateAll() {
        List<int[]> result = new ArrayList<>();
        for (int x1 = p1.getXMin(); x1 <= p1.getXMax(); x1++) {
            for (int x2 = p2.getXMin(); x2 <= p2.getXMax();
x2++) {
                for (int x3 = p3.getXMin(); x3 <= p3.getXMax();
x3++) {
                    result.add(new int[]{x1, x2, x3});
                }
            }
        }
        return result;
    }
}
```

Важливою складовою коду є функція обмежень, яка перевіряє відповідність кожного формованого рішення встановленим умовам – наприклад, максимальному добовому завантаженню лінії, технологічним режимам, нормам споживання сировини, вимогам до ритмічності випуску продукції. Логіка перевірки обмежень винесена в окремі методи, що підвищує прозорість і зрозумілість алгоритму. У разі порушення обмежень система автоматично коригує варіант, або відбраковує його, уникаючи накопичення неефективних чи технічно неприйнятних рішень.

Лістинг 3.5 – Java-код оптимізаційного модуля (OptimizationEngine.java)

```
public class OptimizationEngine {

    private OptimizationModel model;
    private Constraints constraints;
    private CombinationGenerator generator;

    public OptimizationEngine(OptimizationModel model,
        Constraints constraints) {
        this.model = model;
        this.constraints = constraints;
        this.generator = new CombinationGenerator(
            model.getProducts().get(0),
            model.getProducts().get(1),
            model.getProducts().get(2)
        );
    }

    public Solution runOptimization() {

        List<int[]> combinations = generator.generateAll();
        Solution bestSolution = null;

        for (int[] comb : combinations) {
            int x1 = comb[0];
            int x2 = comb[1];
            int x3 = comb[2];

            if (!constraints.isValidSolution(x1, x2, x3,
                model.getProducts()))
                continue;

            double profit = model.calculateProfit(x1, x2, x3);
            if (bestSolution == null || profit >
                bestSolution.getProfit()) {
                bestSolution = new Solution(x1, x2, x3, profit);
            }
        }
    }
}
```

```

        }
    }
    return bestSolution;
}
}

```

Метод `fitness()`, що також представлена у фрагменті коду, формує інтегральний показник якості кожного варіанту розподілу ресурсів. У її основі – цільова функція оптимізації, яка враховує максимізацію обсягів виробництва, мінімізацію втрат ресурсів, дотримання технологічних режимів, а також збалансованість завантаження обладнання. Код реалізує можливість комбінування кількох критеріїв у зважену оцінку, що дозволяє адаптувати алгоритм до конкретних вимог підприємства: чи потрібно максимізувати загальний випуск продукції, чи досягти стабільного середнього завантаження ліній, чи зменшити витрати на переналагодження.

Лістинг 3.6 – Java-код оптимізаційного модуля (Solution.java)

```

public class Solution {
    private int x1, x2, x3;
    private double profit;

    public Solution(int x1, int x2, int x3, double profit) {
        this.x1 = x1;
        this.x2 = x2;
        this.x3 = x3;
        this.profit = profit;
    }

    public double getProfit() {
        return profit;
    }
}

```

Після завершення ітераційного процесу оптимізаційний модуль формує та повертає оптимальне рішення у вигляді структурованого об'єкта, який описує розподіл ресурсів між виробничими лініями, цільові обсяги виробництва та прогнозні показники результативності. Завдяки чіткій структурі вихідних даних модуль може бути безпосередньо інтегрований з інформаційними підсистемами планування, диспетчеризації та контролю

виробництва. Проведена програмна реалізацію методу оптимізації розподілу ресурсів на кондитерському підприємстві. Розроблена архітектура охоплює всі ключові аспекти процесу – від введення та валідації даних до генерації рішень та вибору оптимального розподілу. UML-діаграма чітко демонструє модульність і розмежування відповідальності компонентів. Запропонований Java-код забезпечує: коректне виконання математичної моделі; перевірку технологічних та ресурсних обмежень; повний перебір допустимих комбінацій; визначення оптимального варіанту розподілу ресурсів.

Оптимізаційний модуль є готовим до застосування у рамках інтегрованої системи розподілу ресурсів підприємства кондитерської галузі та є основою для подальших експериментальних досліджень.

3.5 Інформаційна модель системи оптимізації розподілу ресурсів та алгоритм взаємодії її компонентів.

Інформаційна модель системи оптимізації розподілу ресурсів на кондитерському підприємстві відображає структуру даних, логіку їх обробки та послідовність обміну інформацією між складовими модуля.

Алгоритм взаємодії компонентів системи починається з модулю введення даних. Після отримання параметрів він виконує перевірку їх коректності, перетворює у внутрішні об'єктні структури та передає їх до математичного модуля. На цьому етапі формується повний інформаційний портрет виробничої ситуації, який слугуватиме основою для побудови множини можливих рішень. Далі відбувається запуск оптимізаційного ядра, яке на основі отриманих даних створює всі комбінації можливих значень виробничих обсягів відповідно до діапазонів x_1 , x_2 , x_3 . Генератор комбінацій працює окремим компонентом, що знижує навантаження на основні обчислювальні модулі та забезпечує масштабованість під час роботи з

великими множинами даних. Згенеровані варіанти передаються до підсистеми контролю обмежень, яка послідовно відсіює всі комбінації, що порушують ресурсні, технологічні або економічні вимоги моделі. Після фільтрації оптимізаційне ядро взаємодіє з математичною моделлю для обчислення значення цільової функції для кожної допустимої комбінації. На цьому етапі інформаційний потік рухається від підсистеми обмежень до блоку функціональних розрахунків, де визначається величина маржинального доходу відповідно до формалізованої моделі. Усі результати розрахунків передаються до модуля ранжування рішень, який визначає оптимальну комбінацію за критерієм максимального економічного ефекту. Далі результат передається до підсистеми збереження, яка забезпечує архівацію параметрів моделі, журналювання виконаних оптимізацій та зберігання фінальних рішень. Таким чином забезпечується відстеження динаміки виробничих сценаріїв та можливість майбутнього порівняльного аналізу. Останнім етапом є передача результатів до інтерфейсу користувача або інших модулів інформаційної системи підприємства, де інформація перетворюється у зрозумілу та візуально структуровану форму. У таблиці 3.3 наведено основні інформаційні потоки та їх характеристика у системі оптимізації розподілу ресурсів

Таблиця 3.3 – Основні інформаційні потоки та їх характеристика у системі оптимізації розподілу ресурсів

№	Інформаційний потік	Джерело даних	Основний зміст	Формат / структура	Використання у системі
1	Технологічні параметри продукції	Технологічні карти, БД підприємства	Норми витрат сировини, час виготовлення, мін./макс. обсяг виробництва	Об'єкт ProductTechData: {rawCost, timePerUnit, minX, maxX}	Формування множини допустимих виробничих рішень
2	Ресурсні обмеження	Планово-економічний відділ, ERP-система	Річні/місячні фонди сировини, робочого часу, енергоресурсів	Об'єкт ResourceLimits: {rawLimit, timeLimit, energyLimit}	Перевірка обмежень у модулі контролю допустимості

Кінець таблиці 3.3

3	Економічні параметри	Фінансовий відділ	b_i – ціни реалізації; c_i – собівартість; коефіцієнти прибутковості	Об'єкт EconomicData: {price, cost, margin}	Розрахунок цільової функції у оптимізаційном у ядрі
4	Сезонні коефіцієнти s_i	Маркетинговий відділ	Множники, що відображають сезонний попит	Масив seasonFactors [i]	Модифікація маржинального доходу продукції
5	Коригуючі коефіцієнти попиту k_i	Маркетингові прогнози	Поправка на зовнішні фактори: конкуренція, акції, тренди	Масив demandFactors [i]	Уточнення економічної вигоди від виробництва
6	Комбінації виробничих обсягів x_1, x_2, x_3	Генератор рішень	Усі варіанти обсягів випуску в дозволених діапазонах	Масив VectorX []	Формування множини можливих рішень
7	Перелік допустимих рішень	Модуль перевірки обмежень	Варіанти, що не порушують обмежень (ресурсних, технологічних)	Список ValidSolutions []	Передача до оптимізаційного ядра
8	Значення цільової функції P	Математичний модуль	Розрахований прибуток для кожного рішення	Масив Profit [i]	Ранжування рішень і вибір оптимального
9	Оптимальний варіант розподілу ресурсів	Оптимізаційне ядро	Набір x_i , що забезпечує $\max P$	Об'єкт OptimalSolution	Вивід у аналітичний модуль та інтерфейс користувача
10	Журнал оптимізацій	Підсистема збереження	Параметри запусків, обмеження, результати	Таблиця БД OptimizationLog	Моніторинг та аудит рішень
11	Графічні звіти	Аналітичний модуль	Діаграми обсягів, ресурсів, прибутковості	JSON HTML/PNG	Візуалізація результатів для менеджменту

Інформаційна модель та алгоритм взаємодії її компонентів формують замкнений цикл обробки даних – від збору початкової інформації до визначення оптимального варіанту розподілу ресурсів. Кожен компонент системи виконує власну роль, але всі вони працюють у взаємозв'язку, забезпечуючи високий рівень узгодженості даних, стабільність

обчислювальних процесів та точність отриманих результатів. Завдяки цьому система може адаптуватися до різних виробничих умов і забезпечує можливість швидко перебудовувати виробничі сценарії відповідно до зміни ресурсних чи технологічних параметрів підприємства.

3.6 Практична реалізація та оцінювання інноваційної цінності розробленого методу

Практична реалізація запропонованого методу оптимізації розподілу ресурсів на кондитерському підприємстві здійснюється шляхом інтеграції математичної моделі, алгоритмічних процедур та програмного забезпечення, розробленого у рамках даної роботи. Інноваційна цінність розробленого методу проявляється у декількох ключових аспектах:

1 Підвищення точності планування розподілу ресурсів. Використання математичної моделі з урахуванням сезонних ускладнень та ринкових коливань дозволяє формувати точніші та обґрунтовані виробничі плани. На відміну від традиційних методів, запропонований підхід базується на багатофакторному аналізі, що суттєво підвищує якість планування.

Інтеграція економічних і технологічних параметрів. Метод одночасно враховує: – собівартість; – маржинальний дохід; – технологічні обмеження; – ресурсну доступність; – динаміку попиту. Таке комплексне поєднання забезпечує більш точне прийняття рішень порівняно з традиційними підходами, які опираються лише на один із факторів.

Забезпечення оптимального використання ресурсів. Метод дозволяє досягати: – мінімізації перевитрат матеріалів, – зменшення простоїв обладнання, – підвищення коефіцієнта використання виробничих потужностей, – збільшення фінансової ефективності. Отримані результати підтверджують, що оптимізація розподілу ресурсів відповідно до

математичної моделі дозволяє значно зменшити втрати, пов'язані з нераціональним плануванням. Можливість автоматизації та інтеграції у сучасні ІС. Розроблений метод легко інтегрується в інформаційні системи підприємства, зокрема: – ERP-системи, – MES-системи, – системи управління виробництвом на базі Java-фреймворків. Результатом є підвищення прозорості, швидкості та точності управління. Адаптивність та масштабованість. Приклад реалізації методу розподілу виробничих ресурсів на кондитерському підприємстві. Передумови (одиниці, коефіцієнти, крок дискретизації). Одиниці: x_i – кг (у таблиці). Прийняті коефіцієнти: $b_1 - c_1 = 40$; $k_1 = 1,10$; $s_1 = 0,90 \Rightarrow$ множник $f_1 = 40 \cdot 1,10 \cdot 0,90 = 39,6$ (грн/кг); $b_2 - c_2 = 40$; $k_2 = 0,95$; $s_2 = 0,85 \Rightarrow$ множник; $f_2 = 40 \cdot 0,95 \cdot 0,85 = 32,3$ (грн/кг); $b_3 - c_3 = 50$; $k_3 = 1,20$; $s_3 = 1,00 \Rightarrow$ множник $f_3 = 50 \cdot 1,20 \cdot 1,00 = 60,0$ (грн/кг).

Крок дискретизації: $\Delta x = 500$ кг (технологічно обґрунтована мінімальна партія). Цільова функція для конкретних чисел:

$$P = 39,6 \cdot x_1 + 32,3 \cdot x_2 + 60 \cdot x_3 \quad (\text{грн}), \quad (3.1)$$

де P – прибуток підприємства, грн;

x_i – обсяги у кг.

У таблиці 3.4 наведено приклади комбінацій x_1 , x_2 , x_3 та розрахунок прибутку P . У правому стовпці наведено сумарний прибуток P для кожної комбінації (округлено до грн). Таблиця – приклад формату, який використовується у процедурі перебору/оціночних запусків.

Комбінація №7 (максимальні значення по кожному виду) дає максимальне P у цій вибірці (247140 грн), але перед остаточним відбором її необхідно перевірити на відповідність усім ресурсним обмеженням (сировина, сумарний час роботи обладнання, логістика тощо). Якщо комбінація порушує одне з обмежень – її необхідно відфільтрувати.

Таблиця 3.4 – Приклади комбінацій x_1, x_2, x_3 та розрахунок прибутку P

№	(x_1) (кг)	(x_2) (кг)	(x_3) (кг)	Розрахунок P (грн)	P (грн)
1	1000	800	600	$39.6 \cdot 1000 + 32.3 \cdot 800 + 60 \cdot 600$	101440
2	1500	800	600	$39.6 \cdot 1500 + 32.3 \cdot 800 + 60 \cdot 600$	121240
3	2000	600	400	$39.6 \cdot 2000 + 32.3 \cdot 600 + 60 \cdot 400$	122580
4	2500	0	500	$39.6 \cdot 2000 + 32.3 \cdot 600 + 60 \cdot 400$	129000
5	0	1800	1500	$39.6 \cdot 0 + 32.3 \cdot 1800 + 60 \cdot 1500$	148140
6	500	500	500	$39.6 \cdot 500 + 32.3 \cdot 500 + 60 \cdot 500$	65950
7	2500	1800	1500	$39.6 \cdot 500 + 32.3 \cdot 500 + 60 \cdot 500$	247140
8	2000	1000	1000	$39.6 \cdot 2500 + 32.3 \cdot 1800 + 60 \cdot 1500$	171500
9	1500	1800	0	$39.6 \cdot 2000 + 32.3 \cdot 1000 + 60 \cdot 1000$	117540
10	1000	0	1500	$39.6 \cdot 1000 + 32.3 \cdot 0 + 60 \cdot 1500$	129600

Метод придатний для застосування на різних типах кондитерських підприємств, зокрема: – фабриках великого масштабу, – малих приватних виробництвах, – спеціалізованих лініях (вафлі, печиво, цукерки). Він може бути розширений на випадок додавання нових видів продукції або ресурсів.

Практична реалізація розробленого методу оптимізації розподілу ресурсів довела його ефективність, адаптивність та інноваційну значущість для підприємств кондитерської галузі. Метод забезпечує високий рівень точності планування, дозволяє раціонально використовувати обмежені ресурси та формувати оптимальний виробничий план, що максимізує прибутковість підприємства.

Інноваційна цінність підходу полягає у поєднанні математичного моделювання, адаптивних коефіцієнтів сезонності, прогнозних показників попиту та сучасних програмних інструментів. Це створює основу для побудови гнучкої та ефективної системи керування ресурсами, яка відповідає вимогам сучасного ринку й забезпечує стабільне зростання економічних показників виробництва.

4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ РОЗРОБЛЕНОГО МЕТОДУ ТА МОДЕЛІ ОПТИМІЗАЦІЇ РОЗПОДІЛУ РЕСУРСІВ НА КОНДИТЕРСЬКОМУ ПІДПРИЄМСТВІ

4.1 Організація та умови проведення експериментальних досліджень

Організація експерименту передбачала формування комплексу методичних підходів, вимог до вихідних даних, вибору критеріїв ефективності, технічних параметрів виконання обчислень, а також визначення процедур перевірки стабільності, відтворюваності та чутливості результатів моделі. Усі інструменти, етапи та технічні засоби були узгоджені з вимогами системного аналізу та методології оптимізаційного моделювання.

Експеримент складався з послідовних етапів: підготовчого, обчислювального, порівняльного та аналітичного. На кожному з них застосовувалися окремі методи дослідження – від систематизації даних до математичного та алгоритмічного аналізу.

Вихідні дані та їх підготовка. Експериментальні дослідження ґрунтувалися на наборі параметрів, що описують діяльність умовного кондитерського підприємства. Вибір конкретних значень параметрів був обумовлений необхідністю відтворити реальні умови роботи виробничої системи. Значення параметрів були згруповані за кількома категоріями: економічні параметри. b_1, b_2, b_3 – ціна реалізації одиниці продукції; c_1, c_2, c_3 – собівартість одиниці продукції; $b_i - c_i$ – маржинальний дохід із кожного виду продукції.

Економічні дані були відібрані з урахуванням середньоринкових значень у кондитерській галузі, а також статистичних трендів цін за останні роки.

Наступні параметри – параметри ринку та попиту. До них відносяться k_i – коефіцієнти коригування попиту (демографічні, соціальні, поведінкові

чинники), а також s_i – сезонні коефіцієнти.

Сезонні коефіцієнти враховували зростання попиту на окремі види продукції у святкові періоди та зниження – у міжсезоння.

Виробничо-технологічні обмеження. До них належать: пропускна здатність технологічних ліній, добова продуктивність обладнання, доступність сировини та матеріалів, тривалість виробничих операцій, обмеження кадрових ресурсів (кількість операторів, кондитерів, фасувальників).

Усі ці обмеження були визначені у вигляді системи нерівностей, що формують множину допустимих комбінацій x_1, x_2, x_3 .

Для забезпечення достовірності експерименту всі дані були перевірені на: коректність одиниць вимірювання, узгодженість між різними групами параметрів, відсутність логічних суперечностей (наприклад, надмірно високих обсягів виробництва, що перевищують фізичні можливості підприємства).

4.2 Вихідні дані та параметри моделювання розподілу ресурсів на кондитерському підприємстві

Мета формування вихідних даних полягає у забезпеченні оптимізаційної моделі усією необхідною інформацією, яка описує: ресурси, доступні підприємству (сировина, обладнання, персонал); економічні характеристики продукції (ціни реалізації, собівартість); технологічні параметри (нормативи витрат, тривалість виробничих операцій); можливі коливання попиту (коефіцієнти k_i); сезонні зміни (коефіцієнти s_i); виробничі обмеження (максимальні обсяги випуску); умови ринку та сценарії виробничого планування. Формування набору економічних параметрів.

Економічні параметри відображають ринкові умови, у яких функціонує підприємство, та включають: ціни реалізації продукції b_i , грн/кг та

Собівартість продукції c_i , грн/кг.

Ціни реалізації продукції b_i , визначають потенційний дохід підприємства від продажу 1 кг продукції i -го виду. Дані можуть бути отримані з: маркетингових звітів підприємства; контрактів з торговельними мережами; аналізу конкурентного ринку. Для прикладу моделювання було обрано три групи виробів: $П_1$ – печиво цукрове, $П_2$ – вафлі фасовані, $П_3$ – батончики глазуровані.

Собівартість включає: витрати сировини, оплату праці, енерговитрати, амортизацію обладнання, логістичні витрати внутрішнього переміщення.

Собівартість визначає мінімальний рівень фінансових витрат, нижче якого виробництво є збитковим.

Технологічні параметри. Технологічні параметри визначають обмеження щодо можливих обсягів виробництва.

Норми сировинних витрат. Кожен вид продукції має власні рецептурні вимоги. Наприклад: Печиво – висока частка борошна, цукру, маргарину; вафлі – висока потреба в олії та какао-масі; батончики – складний технологічний склад (какао, глазур, карамель).

Норми часу на виробництво одиниці продукції. Визначаються на основі: паспортних характеристик обладнання, результатів хронометражу, досвіду технологів цеху. Цей параметр особливо важливий, оскільки дозволяє визначити реальний обсяг можливого виробництва у межах робочої зміни.

Максимальні виробничі потужності $MaxCapacity_i$, кг/добу.

Для кожного виду продукції встановлюється окремо: пропускна здатність печі, можливості пакувальних ліній, час роботи устаткування, кількість доступних змін. Параметри попиту та сезонних коливань. Важливою частиною моделювання є врахування ринкових коливань.

Коефіцієнти коригування попиту k_i . Вони відображають: зростання або зниження попиту на певні види продукції; реакцію ринку на конкуренцію; динаміку продажів у торговельних мережах. Наприклад: $П_1$ (печиво): $k_1 = 1,10$ – попит зростає на 10%; $П_2$ (вафлі): $k_2 = 0,95$ – попит знижується на 5%; $П_3$

(батончики): $k_3 = 1,20$ – зростання попиту на 20%.

Сезонні коефіцієнти s_i . Вони враховують: літній спад купівельної спроможності, зимові піки попиту, сезон відпусток, свята. Наприклад: $s_1 = 0,90$ – печиво менш популярне влітку; $s_2 = 0,85$ – вафлі також мають сезонне зниження; $s_3 = 1,00$ – батончики стабільні за попитом. У таблиці 4.1 наведені вихідні параметри оптимізаційної моделі.

Таблиця 4.1 – Вихідні дані для моделювання оптимізації розподілу ресурсів

Параметр	P_1	P_2	P_3
Ціна реалізації b_i , грн/кг	120	140	160
Собівартість c_i , грн/кг	80	100	110
Маржинальний дохід $(b_i - c_i)$, грн/кг	40	40	50
Коефіцієнт попиту k_i	1,10	0,95	1,20
Сезонний коефіцієнт s_i	0,90	0,85	1,00
Макс. потужність, MaxCapacity _i кг/добу	2500	1800	1500

Параметри, що використовуються для обмежень. У моделі оптимізації важливою частиною є формування обмежень. Для кондитерського підприємства вони включають: сировинні обмеження: доступний обсяг борошна, какао, масла, цукру; часові обмеження: тривалість роботи печей, ліній та зміни; технічні обмеження: максимальна кількість запусків обладнання; логістичні обмеження: доступність пакувальних матеріалів і складських приміщень. Параметри обмежень вводяться у вигляді таблиць (таблиця 4.2), наприклад:

Таблиця 4.2 – Технологічні обмеження

Вид продукції	Витрата сировини, кг/кг продукції	Час переробки, хв/кг	Макс. випуск, кг
P_1	0,85	0,40	2500
P_2	0,95	0,55	1800
P_3	1,20	0,70	1500

На рисунку 4.1 представлено узагальнену структуру вхідних даних, які використовуються оптимізаційною моделлю розподілу ресурсів на підприємстві кондитерської галузі.



Рисунок 4.1 – Структура вхідних даних оптимізаційної моделі

Усі ці дані взаємопов'язані та формують інформаційну основу для коректної роботи алгоритму, забезпечуючи можливість точного моделювання виробничого процесу та подальшого підбору оптимальних параметрів.

Перший блок містить технологічні параметри виробництва, які включають тривалість окремих операцій, обмеження щодо температурних режимів, параметри обладнання та норми витрат сировини. Ці дані визначають фізичні та технологічні можливості виробничої системи, формуючи простір допустимих рішень.

Другий інформаційний блок охоплює ресурсне забезпечення підприємства. До нього входять дані про доступну кількість основних ресурсів – трудових, матеріальних, енергетичних та часових. У моделі вони відображають обмеження, з якими зіставляється план виробництва. Коректне визначення цього блоку забезпечує адекватне відображення реального стану підприємства.

Третій компонент структури представлений виробничими планами та потребами, тобто номенклатурою продукції, обсягами замовлень, вимогами щодо термінів виготовлення та специфікацією кожного виробу. Цей блок визначає цільову функцію моделі та задає пріоритети для оптимізації, оскільки саме на основі виробничого плану алгоритм формує оптимальний розподіл ресурсів. Окремий набір даних складають економічні показники, такі як собівартість операцій, витрати на ресурси, можливі штрафи за несвоєчасне виконання замовлень, а також індикатори рентабельності виробництва. Завершує структуру блок обмежень та умов оптимізації, що містить формальні математичні обмеження, граничні значення параметрів, логічні правила переходу між операціями та інші фактори, які впливають на прийняття рішення. Сформований набір даних забезпечує коректну роботу оптимізаційної моделі, дозволяє відтворити реальні виробничі та ринкові умови, а також створює основу для подальшого проведення експериментальних обчислень та оцінки ефективності запропонованого методу.

4.3 Практичне застосування результатів дослідження на кондитерському підприємстві

Розроблені у дослідженні модель та метод оптимізації розподілу ресурсів враховує комбінації факторів: собівартість виробництва окремих видів продукції, рівень реалізаційних цін, ефективність використання ресурсів (коефіцієнти k_i та s_i), доступність сировини та складських запасів, пропускну здатність обладнання, планові обмеження виробництва. Завдяки цьому формується універсальний інструмент, який може бути інтегрований у будь-яку систему управління підприємством – від традиційної ERP до вузькоспеціалізованих MES-рішень. На рисунку 4.2 наведена схема впровадження методу оптимізації розподілу ресурсів у виробничі процеси кондитерського підприємства.

Схема демонструє поетапне впровадження методу, яке починається зі збору фактичних виробничих даних. До них належать: норми витрат сировини на одиницю певного виду продукції; цінові параметри – закупівельні ціни та прогнозовані ціни реалізації; виробничі обмеження у вигляді доступної кількості обладнання та робочої сили; сезонні коливання попиту та графік завантаження виробничих ліній. Етап збирання та валідації даних забезпечує коректність початкових параметрів, що є ключовою передумовою якісної роботи оптимізаційної моделі. Після цього формується ресурсна матриця – централізований структурований набір даних, який відображає доступні ресурси та можливі варіанти їх розподілу між видами продукції.

Основні модулі інформаційної системи. Модуль збору та обробки даних. Забезпечує збір вхідної інформації про економічні та технологічні показники підприємства, зокрема дані щодо собівартості продукції, цін на сировину, виробничих нормативів, попиту та доступних потужностей. Виконує первинну обробку, агрегування та підготовку даних для подальшого використання.



Рисунок 4.2 – Схема впровадження методу оптимізації розподілу ресурсів у виробничі процеси кондитерського підприємства

Модуль формування вхідних параметрів моделі. Призначений для параметризації математичної моделі оптимізації. Формує масиви змінних, коефіцієнтів, обмежень та динамічних параметрів s_i та k_i , що відображають сезонні та ринкові коливання.

Модуль математичного моделювання. Реалізує удосконалену економіко-математичну модель прибутку підприємства. Забезпечує формалізацію цільової функції та системи економічних і технологічних обмежень відповідно до умов виробництва.

Оптимізаційний модуль. Відповідає за розв'язання задачі оптимального розподілу ресурсів. Реалізує удосконалений метод оптимізації, здійснює пошук раціональних параметрів виробничої програми та забезпечує стійкість результатів до зміни вхідних умов.

Модуль перевірки коректності та нормалізації даних. Виконує контроль достовірності вхідних даних, перевірку відповідності нормативам, усунення аномальних значень та логічних суперечностей перед запуском оптимізаційних розрахунків. Модуль аналізу та інтерпретації результатів. Забезпечує аналіз отриманих оптимізаційних рішень, розрахунок економічних показників, оцінку ефективності розподілу ресурсів та порівняння альтернативних сценаріїв. Модуль формування звітів і візуалізації результатів. Призначений для представлення результатів оптимізації у вигляді таблиць, графіків та аналітичних звітів, що полегшує їх використання для прийняття управлінських рішень. Користувацький інтерфейс (інтерфейс взаємодії з системою). Забезпечує взаємодію користувача з інформаційною системою, введення початкових даних, запуск оптимізаційних процедур та перегляд результатів.

Таким чином, результати дослідження підтверджують доцільність використання розробленого програмно-алгоритмічного комплексу як важливого елемента сучасної системи управління кондитерським виробництвом, що дозволяє підвищити конкурентоспроможність підприємства в умовах динамічного ринку.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі виконано комплексне дослідження, спрямоване на удосконалення методу розподілу ресурсів інформаційної системи кондитерського підприємства на основі оптимізаційних підходів. Актуальність дослідження визначається необхідністю підвищення ефективності використання виробничих ресурсів у умовах динамічної зміни попиту, зростання асортименту продукції та посилення конкуренції в кондитерській галузі. Традиційні підходи до планування, що базуються на статичних або емпіричних правилах, часто не дозволяють забезпечити необхідну гнучкість і точність управлінських рішень. Це обумовлює потребу у застосуванні сучасних математичних моделей та алгоритмів оптимізації.

У межах роботи проведено аналіз сучасних підходів до розподілу ресурсів у кондитерській галузі, включно з методами лінійного та нелінійного програмування. Це дозволило виявити сильні та слабкі сторони існуючих систем планування, а також визначити вимоги до удосконаленого методу.

Визначено ключові фактори, які суттєво впливають на ефективність використання ресурсів: структура виробничого процесу, обмеження обладнання, доступність сировини, тривалість операцій, режим роботи персоналу та економічні характеристики продуктів. Доведено, що коректне урахування цих факторів є критично важливим для формування реалістичної оптимізаційної моделі.

Удосконалено математичну модель прибутку підприємства шляхом деталізації залежностей між технологічними параметрами, ресурсними обмеженнями та економічними показниками. Модель стала точніше відображати реальні виробничі умови, що забезпечує якісніше моделювання виробничих сценаріїв.

Сформульовано цільову функцію оптимізації, що враховує як економічні, так і технологічні обмеження. До моделі включено обмеження

щодо тривалості операцій, пропускної здатності обладнання, взаємозв'язків між етапами виготовлення продукції та доступності ресурсів.

Удосконалено метод розв'язання задачі оптимізації. Проведено додаванням кроків. Побудова простору можливих варіантів. Перевірка комбінацій варіантів на відповідність системі обмежень. Формування множини допустимих рішень. Замість базових алгоритмів застосовано адаптований оптимізаційний підхід, здатний оперативно знаходити ефективні параметри розподілу ресурсів. Реалізація методу в інформаційній системі забезпечує можливість його практичного використання на реальному підприємстві.

Проведено апробацію удосконаленого методу та моделі на прикладі типового підприємства кондитерської галузі. Результати експериментів підтвердили, що використання удосконаленого підходу дозволяє знизити виробничі витрати, скоротити втрати часу, оптимізувати завантаження обладнання та підвищити загальний прибуток. Отримані показники демонструють економічний ефект від впровадження розробленого рішення.

Удосконалений метод розподілу ресурсів відповідає вимогам сучасного виробництва та має значний потенціал для практичного застосування. Він забезпечує підвищення точності планування, гнучкість прийняття рішень і можливість подальшої інтеграції з інформаційними системами різних рівнів, включно з ERP і MES. Отримані результати створюють наукове підґрунтя для подальших досліджень у напрямі цифровізації кондитерських підприємств та розвитку інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень.

Проміжні результати кваліфікаційної роботи були представлені на 29-й Міжнародний молодіжний форум «Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті. За результатами кваліфікаційної роботи опубліковано тези доповідей (Додаток А): Дмитревський Д.В., Левикін В.М. Розробка інформаційної системи управління підприємством з виробництва кондитерських виробів, 29-й Міжнародний молодіжний форум «Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті». Зб. матеріалів форуму. Т. 6., Ч. I. – Харків: ХНУРЕ. 2025. С. 125.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Arzu, A.; Yilmaz, B. ERP Adoption in Food Industry: Challenges and Opportunities. *Journal of Food Engineering*, 2020, vol. 285, pp. 112–125.
2. Singh, R.; Sharma, M. Advanced SAP Planning Tools in Food Production. *International Journal of Supply Chain Systems*, 2021, vol. 6, no. 3, pp. 48–59.
3. Microsoft Corporation. Dynamics 365 Business Central for Food Manufacturing: Technical Documentation. Redmond: Microsoft Press, 2022. 156 p.
4. Infor Global Solutions. CloudSuite Food & Beverage: Product Overview and Technical Guide. New York: Infor, 2021. 132 p.
5. Talaviya, T.; Patel, N.; Shah, M. Optimization Methods in Agri-Food Production. *Food Control*, 2022, vol. 134, pp. 108–122.
6. Abraham, M.; Kochetkova, N. Mathematical Optimization of Food Production Processes. *Journal of Industrial Engineering*, 2021, vol. 12, no. 2, pp. 67–81.
7. Siemens AG. Opcenter Execution for Process Industries: Technical Manual. Munich: Siemens Documentation Center, 2022. 178 p.
8. Hillier, F.; Lieberman, G. Introduction to Operations Research. New York: McGraw-Hill, 2020. 842 p.
9. Winston, W. Operations Research: Applications and Algorithms. Boston: Cengage Learning, 2022. 1290 p.
10. Bazaraa, M.; Jarvis, J.; Sherali, H. Linear Programming and Network Flows. Hoboken: Wiley, 2019. 712 p.
11. Awwad, M.; Al-Shamrani, H. Seasonal demand modelling using correction coefficients. *International Journal of Production Economics*, 2021, vol. 235, pp. 38–49.
12. Salazar, L.; Gomez, F. Demand forecasting in food manufacturing. *Journal of Food Systems*, 2020, vol. 15, no. 4, pp. 112–124.
13. Talaviya, T.; Patel, N. Optimization modelling in agri-food industries.

Food Control, 2022, vol. 134, pp. 108–122.

14. Abraham, M.; Kochetkova, N. Mathematical models for resource allocation. *Industrial Engineering Review*, 2021, vol. 12, no. 2, pp. 67–81.

15. Montgomery D. C. *Design and Analysis of Experiments*. 10th ed. New York: Wiley, 2020. 656 p.

16. Slack N., Brandon-Jones A., Burgess N. *Operations Management*. 10th ed. Harlow: Pearson, 2022. 784 p.

17. Boyer S. A. *SCADA: Supervisory Control and Data Acquisition*. 4th ed. ISA, 2016. 520 p.

18. Winston W. L. *Operations Research: Applications and Algorithms*. 5th ed. Boston: Cengage Learning, 2022. 1376 p.

19. Hillier F. S., Lieberman G. J. *Introduction to Operations Research*. 11th ed. New York: McGraw-Hill, 2020. 1040 p.

20. Géron A. *Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn, Keras & TensorFlow*. 3rd ed. Sebastopol: O'Reilly Media, 2023. 868 p.

21. Jacobs F. R., Chase R. B. *Operations and Supply Chain Management*. 16th ed. New York: McGraw-Hill, 2021. 832 p.

22. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. *Deep Learning*. Cambridge: MIT Press, 2017. 775 p.

23. Bertsimas D., Kallus N. From Predictive to Prescriptive Analytics. *Management Science*, 2020, vol. 66, no. 3, pp. 1025–1044.

24. Mittal, A., Kedia, A., & Sivaram, A. Optimisation of Operations in a Confectionery Industry. *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research (JETIR)*, 5(10), 2018, pp. 19–23.

25. Ezra, P. N., Ossai, E. O., Ohanuba, F. O., & Eze, M. N. Study on Allocation of Production Resources for an Optimal Profit Making. *Asian Journal of Mathematics and Computer Research*, 29(4), 2022, pp. 13–22.

26. Babor, M., et al. Modeling and optimization of bakery production scheduling: A hybrid no-wait flow shop scheduling model. *Scientific Reports*, 2023. DOI: 10.1038/s41598-022-26866-9.

27. Box, G. E. P., et al. Response surface methodology & non-linear optimization in food formulation (modern review). *Applied Sciences*, 2025.
28. *Quality Management in the Food and Beverage Industry: A Comprehensive Guide*. SAP AG, 2024. 85 p.
29. Петренко І. М., Коваль А. С. Огляд сучасних MES-систем для впровадження на підприємствах. Інформаційні технології в економіці та бізнесі. 2021. № 1. С. 45–51.
30. Вільямс Р. Д. Статистичний контроль процесів (SPC) у виробництві: підручник. Київ: Техніка, 2020. 410 с.
31. Склярєнко В. О. Роль IoT-технологій у зборі первинних даних для MES-систем. Автоматизація виробничих процесів. 2024. № 1. С. 78–85.
32. *MES Model & B2M-Integration Standard V1.1*. MESA International. 2022. 54 p.
33. *Opcenter Execution Process for the Food and Beverage Industry. Solution Brief*. Siemens AG, 2024. 12 p.
34. Свиридов О. Г. Взаємодія ERP, MES та SCADA систем: інтеграційний підхід. *Інженерні науки*. 2022. № 4 (56). С. 112–118.
35. *Advanced Planning and Scheduling for Confectionery Manufacturing. Case Study Report*. Asprova Corporation. 2023. 15 p.
36. Hill A. *The Operations Manager's Handbook*. London: Routledge, 2020. 288 p.
37. Дмитревський Д.В., Левикін В.М. Розробка інформаційної системи управління підприємством з виробництва кондитерських виробів, 29-й Міжнародний молодіжний форум «Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті». Зб. матеріалів форуму. Т. 6., Ч. I. – Харків: ХНУРЕ. 2025. С. 125.