

Хмельницький національний університет  
Факультет інформаційних технологій  
Кафедра комп'ютерної інженерії та інформаційних систем

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Кіберфізична система моніторингу та контролю функціонування супермаркету  
Назва теми

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Галузь знань 12 «Інформаційні технології»  
Шифр, назва

Спеціальність 123 «Комп'ютерна інженерія»  
Шифр, назва

Освітня програма «Комп'ютерна інженерія та програмування»  
Назва

КвРКІ 240250.24.02.39 ПЗ

Виконав здобувач II курсу, група КІ2М-24-2

Керівник канд.-екон. наук, доцент  
Науковий ступінь, учене звання

Нормоконтролер д. техн. наук, професор  
Науковий ступінь, учене звання

До захисту допускаю:  
завідувач кафедри КІС  
«01» травня 2026 р.

дата

О  
Підпис

Олег ПУСТОВІТ  
Ініціали, прізвище

С  
Підпис

Світлана САЧЕНКО  
Ініціали, прізвище

С  
Підпис

Сергій ЛИСЕНКО  
Ініціали, прізвище

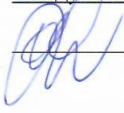
О  
Підпис

Ольга ПАВЛОВА  
Ініціали, прізвище

Хмельницький 2026

# ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ  
Кафедра КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ  
Рівень вищої освіти ДРУГИЙ (МАГІСТЕРСЬКИЙ)  
Галузь знань 12 ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ  
Спеціальність 123 КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ  
Освітня програма «КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ ТА ПРОГРАМУВАННЯ»

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувачка кафедри КІПС  
 Ольга ПАВЛОВА

“ 12 ” 01 2026 р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Пустовіту Олегу Руслановичу

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема проекту (роботи) Кіберфізична система моніторингу та контролю функціонування супермаркету

Керівник проекту (роботи) Саченко Світлана Іванівна, к.е.н., доц.

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджена наказом ректора університету від 12.01.2026 р. № 6

2. Термін подання здобувачем роботи на кафедру 01.05.2026 р.

3. Вихідні дані до роботи Завдання на кваліфікаційну роботу

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) \_\_\_\_\_

Аналіз відомих методів і засобів моніторингу та контролю об'єктів торговельної інфраструктури та постановка задачі

Модель процесу моніторингу та контролю функціонування супермаркету

Метод моніторингу й контролю кіберфізичної системи супермаркету

Кіберфізична система моніторингу та контролю функціонування супермаркету

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень)

---

---

---

---



## РЕФЕРАТ

Тема кваліфікаційної роботи магістра: Кіберфізична система моніторингу та контролю функціонування супермаркету

Автор роботи: Олег ПУСТОВІТ

Керівник роботи: Світлана САЧЕНКО

Пояснювальна записка: 90 с., 11 рис., 7 табл., 2 дод., 80 джерел.

ПЕРЕЛІК КЛЮЧОВИХ СЛІВ: КІБЕРФІЗИЧНА СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ, ІНТЕЛЕКТУАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ, ІНТЕРНЕТ РЕЧЕЙ, РОЗУМНА РОЗДРІБНА ТОРГІВЛЯ, АДАПТИВНИЙ МОНІТОРИНГ, ПРЕДИКТИВНЕ КЕРУВАННЯ, ЄДИНИЙ МОНІТОРИНГОВИЙ СТАН, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ

Об'єктом дослідження є процеси моніторингу та контролю функціонування супермаркету як кіберфізичної системи.

Предметом дослідження є методи, моделі та алгоритми адаптивного багаторівневого моніторингу і керування кіберфізичною системою супермаркету.

Метою кваліфікаційної роботи магістра є забезпечення узгодженої роботи кіберфізичної системи супермаркету та покращення якості обслуговування покупців при оптимізації енергетичних і експлуатаційних витрат шляхом інтеграції реального та прогнозного моніторингу всіх підсистем.

Для розв'язання поставлених задач використовувалися методи теорії масового обслуговування (для моделювання потоків відвідувачів), теорія графів (для моделювання зон залу та інформаційних потоків), методи математичного моделювання фізичних та інформаційних процесів.

Наукова новизна отриманих результатів:

– набув подальшого розвитку метод адаптивного багаторівневого моніторингу та контролю кіберфізичної системи супермаркету, який базується на використанні єдиного моніторингового стану  $M(t)$  для всіх підсистем та поєднанні реального моніторингу з прогнозними моделями для превентивного управління ресурсами;

– набула подальшого розвитку модель адаптивного зонного керування освітленням торгового залу, що використовує графове представлення та предиктивний механізм активації суміжних зон залежно від ймовірності переміщення покупців.

На основі проведених досліджень розроблена архітектура і компоненти програмного забезпечення, що базуються на трирівневій структурі обробки даних (локальний, проміжний, централізований рівні) та застосуванні об'єктно-орієнтованих шаблонів проектування.

Практична значимість отриманих результатів полягає у створенні інструментарію для оцінки роботи об'єкта в режимі реального часу через інтегральний показник  $M(t)$ , що дозволяє знизити витрати на модернізацію та забезпечити стабільне функціонування систем навіть за умов зашумленості даних або пікових навантажень.

У першому розділі проведено аналіз концепцій Індустрія 4.0 та Розумна інфраструктура у ритейлі, виявлено обмеження існуючих рішень («інформаційні острови») та обґрунтовано необхідність КФС.

У другому розділі формалізовано супермаркет як КФС, розроблено математичні моделі потоків покупців та адаптивного освітлення, описано інформаційні контури керування.

У третьому розділі запропоновано метод адаптивного моніторингу з використанням трьох режимів роботи (нормальний, піковий, аварійний) та описано механізми обробки невизначеності даних.

У четвертому розділі розроблено архітектурну схему ПЗ, проведено експериментальні дослідження, які підтвердили підвищення ефективності системи (середній показник  $M(t) = 0.86$ ) при використанні адаптивного підходу.

## ЗМІСТ

Скорочення та умовні позначки .....	5
Вступ .....	6
1 Аналіз відомих методів і засобів моніторингу та контролю об’єктів торговельної інфраструктури .....	9
1.1 Класифікація методів і засобів моніторингу об’єктів торговельної інфраструктури .....	12
1.2 Класифікація методів контролю об’єктів торговельної інфраструктури .....	14
1.3 Аналіз існуючих науково-технічних рішень у сфері КФС торговельної інфраструктури .....	17
1.4 Постановка задачі.....	24
1.5 Висновки .....	25
2 Модель процесу моніторингу та контролю функціонування супермаркету .....	26
2.1 Формалізація об’єкта моніторингу та контролю як кіберфізичної системи ....	26
2.2 Моделювання інформаційних потоків і контурів керування кіберфізичної системи .....	29
2.3 Моделювання процесів у торговому залі супермаркету .....	38
2.4 Формалізація предиктивного керування.....	46
2.5 Робота системи в умовах невизначеності та зашумлених даних .....	49
2.6 Висновки .....	51
3 Метод моніторингу й контролю кіберфізичної системи супермаркету.....	53
3.1 Основи методу моніторингу й контролю системи супермаркету .....	53
3.2 Концепція реального та прогнозного моніторингу .....	57
3.3 Трирівнева структура обробки даних у кіберфізичній системі супермаркету	59
3.4 Метод адаптивного багаторівневого моніторингу та контролю супермаркету	62

3.5	Обробка невизначеності та зашумлених даних.....	69
3.6	Масштабованість та інтеграція методу .....	71
3.7	Висновки .....	72
4	Кіберфізична система моніторингу та контролю функціонування супермаркету .....	73
4.1	Вибір типу архітектури та шаблонів проектування.....	73
4.2	Розробка архітектури програмного забезпечення моніторингу та контролю функціонування супермаркету .....	77
4.3	Аналіз стійкості та надійності функціонування кіберфізичної системи супермаркету .....	82
4.4	Проведення експериментальних досліджень роботи системи .....	83
4.4	Висновки .....	92
	Висновки.....	94
	Перелік джерел посилань.....	96
	Додаток А. Тези доповіді.....	105
	Додаток Б. Презентація.....	110

## СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

КФС - кіберфізична система

ПЗ - програмне забезпечення

РД - рівень даних

СМО - системи масового обслуговування

BMS - Building Management System (систем автоматизації будівель)

ERP - Enterprise Resource Planning (планування ресурсів підприємства)

ESL - Electronic Shelf Labels (система електронних цінників)

RFID - Radio Frequency Identification (технологія безконтактної радіочастотної ідентифікації)

UWB - Ultra-Wideband (надширокосмуговий зв'язок)

## ВСТУП

Сучасний супермаркет еволюціонує від простої точки продажу до складної кіберфізичної екосистеми. Якщо раніше моніторинг обмежувався лише візуальним наглядом або обліком у ERP, то сьогодні кіберфізична система передбачає замкнений цикл, до складу якого входять фізичні об'єкти (стелажі, холодильники, покупці) генерують дані, які обробляються алгоритмами штучного інтелекту, а результати аналізу автоматично впливають на фізичний світ (наприклад, зміна ціни на ESL, активація систем охолодження, перенаправлення персоналу, тощо).

Актуальність дослідження обумовлена стрімкою цифровізацією роздрібною торгівлі та переходом супермаркетів до моделей «розумного магазину», де ключову роль відіграють дані, отримані в реальному часі. Зростання кількості сенсорів, камер, електронних цінників та автоматизованих виконавчих пристроїв призводить до формування великих обсягів різнорідних даних, які необхідно обробляти з мінімальними затримками. За відсутності узгоджених моделей та адаптивних алгоритмів керування такі дані не лише не підвищують ефективність роботи, але й можуть ускладнювати прийняття рішень.

Додатковим фактором є суттєва невизначеність процесів, що відбуваються в торговому залі. Потоки покупців мають стохастичний характер і залежать від часу доби, днів тижня, сезонних коливань, маркетингових акцій та зовнішніх соціально-економічних чинників. Поведінка відвідувачів є складно прогнозованою, а сенсорні вимірювання часто супроводжуються шумами, затримками або пропусками даних. У таких умовах застосування традиційних статичних алгоритмів або спрощених моделей масового обслуговування не забезпечує достатньої точності та стійкості керування.

Особливого значення набуває проблема інтеграції різнорідних підсистем супермаркету в єдину кіберфізичну структуру. Системи моніторингу потоків покупців, керування освітленням, клімат-контролю, ціноутворення та логістики часто функціонують автономно, що призводить до локальної оптимізації окремих процесів без урахування їх взаємного впливу. Відсутність єдиного

моніторингового стану унеможлиблює комплексну оцінку ефективності функціонування супермаркету та знижує потенціал автоматизованого прийняття рішень.

У зв'язку з цим актуальним є розроблення адаптивних методів моніторингу та контролю, здатних працювати в неоднорідних умовах та динамічних змін режимів роботи. Формалізація супермаркету як кіберфізичної системи дозволяє перейти від фрагментарного керування окремими процесами до узгодженого багаторівневого контролю, що враховує як фізичні, так і інформаційні аспекти функціонування об'єкта. Саме такий підхід створює передумови для підвищення енергоефективності, якості обслуговування покупців та загальної стійкості системи.

Метою кваліфікаційної роботи магістра є забезпечення узгодженої роботи кіберфізичної системи супермаркету та покращення якості обслуговування покупців при оптимізації енергетичних і експлуатаційних витрат шляхом інтеграції реального та прогнозного моніторингу всіх підсистем.

Поставлена мета досягається розв'язанням таких основних завдань:

- проаналізувати сучасні підходи до моніторингу та контролю кіберфізичних систем у сфері роздрібної торгівлі та визначити їхні переваги й обмеження;
- формалізувати супермаркет як кіберфізичну систему, виділивши структурні компоненти, інформаційні потоки та контури управління;
- сформувати математичні моделі потоків відвідувачів, адаптивного керування освітленням та обробки сенсорних даних;
- забезпечити інтеграцію даних із різномірних підсистем у єдиний моніторинговий стан для оцінки поточного та прогнозного стану системи;
- обґрунтувати механізми адаптивного формування керуючих впливів, що враховує енерговитрати, комфорт покупців та стабільність роботи системи.

Об'єктом дослідження є процеси моніторингу та контролю функціонування супермаркету як кіберфізичної системи.

Предметом дослідження є методи, моделі та алгоритми адаптивного багаторівневого моніторингу і керування кіберфізичною системою супермаркету.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у розробленні методу адаптивного багаторівневого моніторингу та контролю кіберфізичної системи супермаркету, який базується на використанні єдиного моніторингового стану для всіх підсистем, поєднанні реального та прогнозного моніторингу, а також адаптивному формуванні керуючих впливів залежно від поточного режиму роботи та рівня невизначеності даних. Запропонований підхід забезпечує узгоджену роботу підсистем, підвищує стійкість системи до зашумлених і неповних даних та створює передумови для підвищення ефективності управління супермаркетами в реальних умовах експлуатації.

Практична значимість отриманих результатів полягає у трирівневій архітектурі обробки даних (локальний, проміжний, централізований рівні), що забезпечує стабільне функціонування систем моніторингу навіть за умов зашумленості сенсорних даних або часткових збоїв у мережі. Графові моделі та інтегральний показник стану  $M(t)$  надають адміністрації супермаркету наочний інструмент для оцінки ефективності роботи об'єкта в режимі реального часу та прогнозування пікових навантажень. Застосування об'єктно-орієнтованих шаблонів проектування дозволяє легко інтегрувати в існуючу систему нове обладнання різних виробників, що знижує витрати на подальшу модернізацію торгової точки.

Для розв'язання поставлених задач використовувалися методи: теорія масового обслуговування, теорія графів, методи математичного моделювання.

За темою кваліфікаційної роботи опубліковано одну публікацію [80] у Збірнику наукових праць за матеріалами XIX Всеукраїнської науково практичної WEB конференції аспірантів, студентів та молодих вчених «Комп'ютерні інтелектуальні системи та мережі» (25-27 березня 2026 р.). – Кривий Ріг: Криворізький національний університет, 2026. – 370 с.

## **1 АНАЛІЗ ВІДОМИХ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ МОНІТОРИНГУ ТА КОНТРОЛЮ ОБ'ЄКТІВ ТОРГОВЕЛЬНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ**

Концепція Індустрія 4.0 виникла як відповідь на потребу в цифровій трансформації промислових і сервісних процесів та базується на глибокій інтеграції фізичних об'єктів із цифровими технологіями [1]. Її ключовою ідеєю є створення інтелектуальних систем, у яких обладнання, програмне забезпечення та люди взаємодіють у єдиному інформаційному просторі. Основу Індустрія 4.0 становлять кіберфізичні системи, які поєднують сенсорні та виконавчі пристрої з алгоритмами аналізу даних і автоматизованого управління. Такі системи здатні в реальному часі збирати інформацію про стан фізичних процесів, обробляти її та приймати рішення без безпосереднього втручання людини або з мінімальною її участю.

Однією з визначальних характеристик Індустрія 4.0 є децентралізований характер управління. На відміну від традиційних ієрархічних систем автоматизації, у яких рішення приймаються на верхніх рівнях, кіберфізичні системи дозволяють окремим компонентам самостійно аналізувати свій стан і взаємодіяти між собою. Це забезпечує гнучкість, адаптивність та високу стійкість до змін умов експлуатації. Для супермаркету такий підхід означає можливість автономного регулювання роботи холодильного обладнання, систем освітлення чи клімат-контролю залежно від поточного навантаження, часу доби або кількості відвідувачів.

Важливою складовою Індустрія 4.0 є використання Інтернету речей, який забезпечує зв'язок між фізичними пристроями та цифровими платформами. Сенсори, контролери та виконавчі механізми формують розподілену мережу, здатну передавати дані для подальшого аналізу. У поєднанні з хмарними обчисленнями та технологіями великих даних це дозволяє здійснювати довготривале зберігання інформації, виявляти закономірності та формувати прогнозні моделі. Індустрія 4.0 спрямована не лише на автоматизацію, а й на інтелектуалізацію управління процесами.

Паралельно з розвитком Індустрія 4.0 формується концепція Розумна інфраструктура, яка орієнтована на створення інтелектуальних будівель, комплексів і міських об'єктів. Розумна інфраструктура передбачає використання цифрових технологій для ефективного управління інженерними системами, ресурсами та сервісами. У центрі цієї концепції знаходиться ідея підвищення енергоефективності, безпеки та комфорту користувачів шляхом інтеграції різних підсистем у єдину керовану структуру.

Для об'єктів роздрібної торгівлі, зокрема супермаркетів, Розумна інфраструктура означає перехід від ізольованих систем автоматизації до комплексного управління будівлею як єдиним об'єктом. Системи освітлення, вентиляції, кондиціонування, відеоспостереження, контролю доступу та енергоспоживання об'єднуються в єдину інформаційну платформу, що дозволяє координувати їхню роботу та оптимізувати використання ресурсів. Завдяки цьому забезпечується не лише економія енергії, а й підвищення надійності функціонування інфраструктури.

Особливістю Розумна інфраструктура є орієнтація на адаптивність і прогнозування. Системи аналізують історичні та поточні дані, що дає змогу передбачати пікові навантаження, потенційні відмови обладнання та зміни умов експлуатації. У контексті супермаркету це дозволяє завчасно коригувати режими роботи інженерних систем, забезпечуючи стабільні умови зберігання товарів і комфорт для відвідувачів. Важливим аспектом також є підвищення рівня безпеки за рахунок інтеграції систем відеоаналітики та моніторингу.

Концепції Індустрія 4.0 і Розумна інфраструктура є взаємодоповнюючими та взаємопов'язаними. Якщо Індустрія 4.0 фокусується на інтелектуалізації процесів і автоматизованому прийнятті рішень, то Розумна інфраструктура забезпечує фізичну та організаційну основу для впровадження таких рішень у реальному середовищі. Кіберфізична система моніторингу та контролю супермаркету фактично є практичною реалізацією синтезу цих концепцій, оскільки поєднує фізичні інженерні системи з цифровими технологіями аналізу та управління.

Детальне дослідження та впровадження принципів Індустрія 4.0 і Розумна інфраструктура у сфері роздрібної торгівлі є актуальним і перспективним напрямом, що дозволяє підвищити ефективність управління супермаркетами, знизити експлуатаційні витрати та створити основу для подальшого розвитку інтелектуальних торговельних об'єктів.

Повсюдна діджиталізація свідчить про стрімку інтелектуалізацію засобів контролю, в тому числі в ритейлі. Проте, попри високий рівень технологічного розвитку, більшість сучасних рішень залишаються вузькоспеціалізованими, що створює розрив між збором даних та їх ефективним використанням у контурі управління.

Існують певні особливості, що викликають необхідність розробки нової моделі кіберфізичної системи.

Сучасні супермаркети використовують десятки автономних систем: від інтелектуального відеоспостереження до систем автоматизації будівель (BMS). Основна проблема полягає в тому, що ці системи функціонують як «інформаційні острови». Дані про пікову кількість покупців у торговому залі не передаються автоматично до системи кондиціонування для корекції мікроклімату, а інформація про порожні полиці не синхронізується з динамічним ціноутворенням у режимі реального часу. Це призводить до надмірних витрат ресурсів та втрати потенційного прибутку.

Традиційні методи (зокрема ті, що базуються на хмарних ERP-системах) мають високу затримку між виникненням події та реакцією системи. У контексті кіберфізичної системи моніторинг не повинен бути лише засобом візуалізації, він має стати фундаментом для зворотного зв'язку. Необхідне впровадження методів Периферійні обчислення, де обробка відбувається безпосередньо на місці виникнення даних, що дозволяє системі миттєво адаптуватися до фізичних змін у середовищі супермаркету.

Існуючі рішення часто демонструють низьку стійкість до непередбачуваних факторів (раптові зміни логістики, технічні збої або аномальна поведінка споживачів).

## 1.1 Класифікація методів і засобів моніторингу об'єктів торговельної інфраструктури

Моніторинг об'єктів торговельної інфраструктури є важливим елементом забезпечення ефективності, безпеки та стабільного функціонування супермаркетів, торговельних центрів і роздрібних магазинів. Сучасна торговельна інфраструктура являє собою складну систему, що включає різноманітні інженерно-технічні засоби, програмні комплекси, персонал та логістичні процеси. Ефективний контроль роботи таких об'єктів потребує інтеграції різних методів моніторингу, що дозволяють своєчасно виявляти відхилення від нормальних режимів функціонування, запобігати технічним збоям та забезпечувати безперервність обслуговування споживачів.

Методи моніторингу об'єктів торговельної інфраструктури можна класифікувати за кількома ознаками.

По-перше, виділяють ручні та автоматизовані методи. Ручні методи передбачають збір інформації персоналом або аудиторами шляхом інспекцій, візуального спостереження, опитувань споживачів чи аналізу документів [2]. Ці методи мають обмежену ефективність через значну трудомісткість, людський фактор та затримку у отриманні даних.

Автоматизовані методи, навпаки, забезпечують безперервний збір даних у режимі реального часу та дозволяють інтегрувати їх у єдину систему управління. До таких методів відносять сенсорні системи контролю обладнання, відеоспостереження, RFID-технології, датчики температури та вологості, системи обліку потоків споживачів, а також SCADA- та IoT-рішення [3].

У сучасних супермаркетах та торговельних центрах застосовуються різні технології контролю і моніторингу.

Основні з них включають сенсорні системи, RFID та системи ідентифікації, відеоспостереження та аналітику потоків, системи автоматизованого обліку та ERP.

Розглянемо детальніше основні системи.

Сенсорні системи, до яких входять сенсори температури та вологості використовуються для контролю умов зберігання харчових продуктів, особливо в холодильних камерах та на вітринах. Датчики навантаження та тиску дозволяють відстежувати стан торговельного обладнання та ліній кас. Використання сенсорів у поєднанні з контролерами дозволяє формувати сигнали тривоги при відхиленні параметрів від заданих норм [4, 5].

RFID-технології застосовуються для обліку товарів на складах та торгових залах. Вони дозволяють відстежувати переміщення продукції, вести точний облік залишків і запобігати втратам. RFID-системи також інтегруються з базами даних та аналітичними платформами для формування статистики продажів [5, 6].

Відеокамери традиційно використовуються для забезпечення безпеки та контролю доступу. Сучасні системи включають алгоритми комп'ютерного зору, що дозволяють автоматично рахувати потоки покупців, оцінювати заповненість торговельних зон та визначати критичні ділянки для оптимізації логістики [7].

ERP-системи та автоматизовані касові системи дозволяють контролювати облік товарів, фінансові потоки та продажі. Інтеграція таких систем із сенсорними та відеопідсистемами відкриває можливості комплексного моніторингу і управління торговельними процесами [8].

Аналіз існуючих методів показує, що більшість рішень мають фрагментарний характер. Наприклад, сенсорні системи контролюють лише технічні параметри обладнання, не враховуючи поведінку покупців чи логістику товарів. Відеоспостереження та аналітика потоків часто не інтегруються з іншими системами контролю, що ускладнює формування цілісної картини стану супермаркета.

Багато методів також не передбачають автоматичного реагування на відхилення, наприклад дані збираються, але рішення приймає людина. Це збільшує ризики затримки у виявленні проблем та зниження ефективності експлуатації торговельного об'єкта. Крім того, системи контролю часто обмежені локальною інфраструктурою та не використовують можливості віддаленого моніторингу чи інтеграції в хмарні сервіси.

## 1.2 Класифікація методів контролю об'єктів торгівельної інфраструктури

Методи контролю можна поділити за способом виконання та за об'єктом контролю.

За способом виконання такі методи зазвичай поділяються на автоматизовані та ручні (оперативні).

В автоматизованих система самостійно реагує на сигнали від сенсорів і здійснює корекцію.

При використанні ручних персонал виконує необхідні дії на основі отриманих даних або повідомлень.

За об'єктом контролю системи поділяються згідно груп. Це можуть бути технічні системи, логістичні процеси та інфраструктурні процеси.

До технічних систем відносяться холодильне обладнання, кондиціонери, освітлення, касові термінали, системи безпеки.

Логістичні процеси включають управління запасами, розподіл товарів, контроль постачань.

Інфраструктурні процеси описують завантаженість торгових зон, черги, потоки клієнтів, аварійна безпека.

Також методи контролю класифікуються за принципом роботи на регуляторні та прогнозні.

Регуляторні методи забезпечують підтримку параметрів в заданих межах (температура, вологість, потоки клієнтів).

Прогнозні передбачають можливі відхилення та рекомендують/здійснюють корекційні дії до настання критичної ситуації.

До прикладів методів контролю можна віднести:

- автоматичне регулювання температури в холодильних камерах;
- керування освітленням торгового залу за розкладом або датчиками руху;
- включення аварійних сигналізацій при перевищенні допустимих

навантажень на обладнання;

- регулювання розподілу товарів між залом і складом на основі даних про залишки;
- автоматичне формування замовлень у постачальників при зниженні запасів нижче заданого порогу;
- відкриття додаткових кас при зростанні черг;
- керування маршрутизацією покупців у торгових зонах для оптимізації потоків;
- сповіщення персоналу про необхідність обслуговування певних зон або проведення перевірок;
- автоматичне блокування обладнання при виникненні небезпечних ситуацій;
- контроль доступу до складів або обмежених зон;
- сигналізація про небезпечні відхилення (пожежа, витік газу, перевищення температури).

Особливості методів контролю полягають в тому, що контроль завжди передбачає вплив на об'єкт і може бути як автоматизованим, так і ручним.

Він базується на даних, отриманих через моніторинг, але відрізняється тим, що дані перетворюються на дії, а не лише на аналітичні звіти.

У кіберфізичних системах методи контролю виконують ключову роль у забезпеченні стабільності та безпеки роботи всієї системи. Вони тісно інтегруються з сенсорними підсистемами, що збирають дані про стан об'єкта чи середовища, забезпечуючи своєчасне виявлення відхилень від нормальних параметрів. Алгоритми обробки даних аналізують отриману інформацію, визначають необхідні коригувальні дії та оптимізують роботу системи у реальному часі. Контрольні модулі взаємодіють із інтерфейсом керування, що дозволяє операторам або автоматизованим агентам здійснювати оперативне втручання у робочі процеси. Завдяки такій інтеграції забезпечується ефективне поєднання спостереження, аналізу та регулювання, що підвищує надійність і продуктивність кіберфізичних

систем.

В таблиці 1.1 наведено порівняння методів моніторингу та контролю.

Таблиця 1.1 – Порівняльна характеристика методів моніторингу та контролю

Критерій	Методи моніторингу	Методи контролю
Мета	Спостереження, збір даних	Вплив на стан об'єкта для підтримки або корекції
Дія на об'єкт	Пасивна	Активна
Час реакції	Відображає стан у реальному часі або періодично	Миттєвий або близький до реального час реагування
Функція у системі	Джерело інформації для аналізу	Використання інформації для управління процесом
Тип реалізації	Автоматизований, ручний	Автоматизований, ручний, комбінований
Взаємозв'язок	Необхідний для контролю	Базується на результатах моніторингу
Приклади	Датчики температури, відеоспостереження, RFID, облік потоків покупців	Регулювання температури, управління освітленням, відкриття додаткових кас, сигналізація про відхилення

Порівняння методів моніторингу та контролю, представлене в таблиці 1.1, дозволяє чітко побачити їхні функціональні відмінності та взаємодоповнюваність. Моніторинг забезпечує збір, обробку та відображення даних про стан об'єкта або процесу, що дає змогу своєчасно виявляти відхилення та потенційні ризики. Контроль, у свою чергу, спрямований на прийняття рішень і впровадження коригувальних дій для підтримки бажаного стану системи. Аналіз таблиці показує, що ефективна робота кіберфізичних систем потребує комплексного застосування

обох підходів. Моніторинг виступає джерелом інформації для контролю, а контроль забезпечує реалізацію практичних заходів на основі отриманих даних. Така взаємодія підвищує оперативність реагування на зміни в системі та зменшує ризик виникнення аварійних ситуацій. Крім того, порівняння дозволяє визначити оптимальні методи для конкретних типів об'єктів чи процесів, враховуючи їхню складність та критичність. Загалом, інтеграція моніторингу та контролю формує ефективну основу для забезпечення надійності та стабільності функціонування сучасних кіберфізичних систем.

### 1.3 Аналіз існуючих науково-технічних рішень у сфері КФС торгівельної інфраструктури

Огляд наукових джерел у сфері кіберфізичних систем моніторингу та контролю, зокрема в контексті розумних магазинів/супермаркетів і роздрібною торгівлі, показує, що дослідження активно рухаються в напрямі інтеграції IoT-рішень, систем реального часу, хмарних обчислень, використання штучного інтелекту та великих даних для підвищення продуктивності, безпеки та користувацького досвіду.

Основними напрямками є контроль мікроклімату (температура, вологість), енергоспоживання, логістики та запасів, поведінки споживачів, а також безпеки приміщень. У більшості робіт супермаркет розглядається як складна кіберфізична система з великою кількістю гетерогенних компонентів.

Зокрема, автори роботи [9] розглядають впровадження IoT у розумних магазинах, виділяючи ключові драйвери та складнощі, зокрема питання безпеки даних та конфіденційності споживачів. Використання сенсорних мереж і систем моніторингу дозволяє знизити операційні витрати та підвищити точність управління ресурсами. Водночас автори вказують на суттєві обмеження, пов'язані з конфіденційністю персональних даних клієнтів та відсутністю єдиних стандартів безпеки. Дослідження показує, що без належної кібербезпеки впровадження КФС

у торгівлю має серйозні ризики, обмежуючи повсюдне застосування таких технологій.

В роботі [10] аналізують безпеку кіберфізичних та IoT-систем, що є критично важливим для супермаркетів із великою кількістю підключених пристроїв. Основним результатом є систематизація типових вразливостей CPS-архітектур. Недоліком дослідження є те, що запропоновані підходи мають переважно концептуальний характер і не враховують специфіку роздрібно-інфраструктури.

Наукові праці останніх років, зокрема дослідження [11-13], вказують на домінування комп'ютерного зору як основного джерела первинних даних. Сучасні рішення відійшли від простої фіксації руху до складного семантичного аналізу сцен.

Особливістю рішень останнього періоду є впровадження технології Периферійні обчислення [14]. Замість передачі «сирого» відеопотоку на сервер, обробка відбувається на периферійних контролерах. Це дозволяє вирішити проблему конфіденційності даних, оскільки за межі камери виходять лише метадані (координати об'єктів, вектори руху). Проте, аналіз публікацій виявляє суттєве обмеження: точність таких систем різко падає в умовах «динамічного захаращення» (пересування візків, зміна експозиції товарів), що вимагає розробки нових методів адаптивного навчання моделей безпосередньо в процесі експлуатації.

У великих супермаркетах ключовою проблемою є фізичне екранування сигналу металевими конструкціями та холодильним обладнанням. Використання протоколів LoRaWAN та ZigBee 3.0 дозволяє побудувати відмовостійку топологію мережі [15, 16].

Огляд рішень [17, 18] показує, що моніторинг кліматичних параметрів (температура, вологість, концентрація CO<sub>2</sub>) став невід'ємною частиною систем енергоменеджменту. Однак аналіз впроваджень свідчить про наявність «технологічного розриву»: дані від датчиків мікроклімату рідко синхронізуються з даними про потік відвідувачів, що призводить до інертності систем кондиціонування.

Не зважаючи на всі переваги існуючих рішень, є недоліки, усунення або пом'якшення негативного впливу яких, зумовлює необхідність розроблення та впровадження нових підходів до контролю функціонування об'єктів ритейлу.

Найбільш суттєвим обмеженням, зафіксованим у звітах SAP та Oracle, є ситуація, при якій операційні дані з фізичного рівня (датчики, камери) не збігаються з бізнес-логікою ERP-систем у реальному часі [19, 20]. Наприклад, дані про продаж товару на касі оновлюються миттєво, тоді як дані про його фізичну відсутність на полиці можуть затримуватися на години.

Ряд авторів пропонують вирішення таких проблем через семантичну сумісність [21]. Це означає створення єдиного цифрового словника (онтології) об'єктів супермаркету. У такій системі холодильне обладнання це не просто споживач енергії, а об'єкт, стан якого залежить від навколишньої температури, заповненості продуктами та інтенсивності відкриття дверей покупцями.

Продовжуючи аналіз сучасних підходів, варто відзначити стрімкий розвиток концепції Роздрібна торгівля 4.0, де КФС виступають фундаментом для створення автономних торгових просторів.

Так, в дослідженні [22] розглядається вплив технологій ШІ та IoT на поведінку споживачів. Автори підкреслюють, що інтеграція сенсорних мереж дозволяє не лише моніторити запаси, а й створювати персоналізований клієнтський досвід у реальному часі.

Автори роботи [23] аналізують цифрову трансформацію ритейлу, вказуючи на те, що КФС є ключовим фактором подолання розриву між онлайн- та офлайн-каналами продажів. Дослідження акцентує увагу на необхідності створення єдиної інфраструктури даних.

Дослідження авторів [24] пропонують архітектуру розумного супермаркету на базі графових нейронних мереж для аналізу траєкторій покупців. Це рішення дозволяє оптимізувати розміщення товарів на полицях, базуючись на фізичній взаємодії клієнта з об'єктами КФС.

Автори [25] зосереджуються на проблемі енергоефективності КФС у ритейлі. Вони описують систему інтелектуального керування освітленням та

кондиціюванням, яка адаптується до щільності потоку відвідувачів, використовуючи дані з камер та датчиків руху.

В роботі [26] досліджується використання технології блокчейн у КФС торговельних мереж для забезпечення прозорості ланцюгів постачання. Це дозволяє синхронізувати фізичний рух товару з його цифровим двійником, мінімізуючи помилки в ERP-системах.

Дослідження [27] описує впровадження систем Периферійні обчислення для розпізнавання товарів «на льоту». Автори доводять, що обробка даних на периферії знижує затримку передачі даних на 40% порівняно з хмарними рішеннями, що критично для систем самообслуговування.

Автори [28] розглядають питання безпеки в Розумна роздрібна торгівля. Дослідження фокусується на захисті від так званих ін'єкцій даних у сенсорні мережі, які можуть призвести до фальшивих сповіщень про відсутність товару або порушення температурного режиму.

Робота [29] присвячена аналізу використання цифрових двійників для моделювання роботи супермаркету. Це дозволяє передбачити пікові навантаження на касові зони та оптимізувати роботу персоналу ще до виникнення черг.

В роботі [30] досліджується інтеграція RFID-міток з КФС для автоматизації інвентаризації в реальному часі. Робота вирішує проблему металевого екранування шляхом використання адаптивних алгоритмів зчитування.

Проведений огляд показав, що використання сучасних підходів, зокрема технології цифрових двійників, дозволяє ефективно моделювати роботу супермаркету та прогнозувати навантаження на його інфраструктуру. Це забезпечує можливість оптимізації розподілу ресурсів і підвищення якості обслуговування покупців за рахунок адаптивного управління системою.

Для наочності проведеного аналізу складено порівняльну таблицю основних технологічних рішень, що застосовуються для моніторингу торговельної інфраструктури.

Порівняльна характеристика існуючих рішень наведена в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Порівняльний аналіз засобів моніторингу супермаркетів

Технологія / Рішення	Об'єкт моніторингу	Основні переваги	Ключові обмеження та недоліки
Відеоаналітика (YOLOv11)	Потік покупців, черги	Висока точність, аналіз поведінки	Оклюдія, висока вартість обчислень
RFID (Item-level)	Товарні запаси, логістика	Швидкість інвентаризації	Екранування металом, вартість міток
LoRaWAN Sensors	Температура, вологість	Велика дальність, автономність	Низька швидкість передачі даних
Electronic Shelf Labels	Ціни, залишки на полиці	Динамічне ціноутворення	Обмежений ресурс батареї, вартість
Digital Twins (Omniverse)	Весь об'єкт (копія)	Предиктивне моделювання	Складність актуалізації даних
UWB Navigation	Персонал, візки	Точність локації до 10 см	Потребує дорогої інфраструктури анкерів

Сучасний стан розвитку технологій моніторингу та контролю в ритейлі характеризується переходом від пасивної фіксації подій до розбудови складних аналітичних систем. Дослідження еволюції комп'ютерного зору показує, що базисом для візуального контролю стали нейромережеві моделі архітектури YOLO (від v8 до v11), описані у працях [31, 32]. Ці рішення дозволили реалізувати детекцію об'єктів у реальному часі безпосередньо на периферійних пристроях, що значно знизило навантаження на мережу.

Розвитком цього напрямку стали спеціалізовані алгоритми Глибинне

навчання для моніторингу полиць [33], які автоматизують виявлення дефіциту товарів.

Однак, як зазначають дослідники [34], візуального контролю товарів недостатньо для повної картини функціонування об'єкта; необхідне впровадження систем аналізу поведінки на основі оцінки поз людини, що дозволяє диференціювати наміри покупця без порушення його приватності.

Паралельно з візуальними методами активно розвивається сегмент бездротових сенсорних мереж. Дослідження [35] підкреслюють ефективність протоколу LoRaWAN для моніторингу холодильних ланцюгів у великих супермаркетах, де звичайні сигнали Wi-Fi блокуються металевим обладнанням. Водночас для контролю фізичних параметрів на рівні окремих стелажів актуальним залишається впровадження інтелектуальних інтерфейсів за стандартом IEEE 1451, що дозволяє інтегрувати датчики ваги безпосередньо в інформаційне поле КФС [36].

Енергетична ефективність таких систем забезпечується адаптивним освітленням на базі ZigBee 3.0, специфікації якого від Connectivity Standards Alliance передбачають динамічне керування яскравістю залежно від щільності людського потоку [37].

Особливе місце в сучасних дослідженнях посідає концепція «Цифрових двійників». Відповідно до звітів NVIDIA Research, використання фізично точних віртуальних моделей дозволяє не лише візуалізувати стан супермаркету, а й проводити предиктивне моделювання кризових сценаріїв [38].

У поєднанні з методами предиктивного обслуговування) на основі ISO 13374 та алгоритмів машинного навчання для систем опалення, вентиляції та кондиціонування, це створює умови для запобігання аваріям ще до їх виникнення у фізичному середовищі [39].

Проблеми ідентифікації та логістики на рівні одиничних товарів вирішуються через масштабування EPC-сумісних RFID-систем, детально описаних у звітах [40]. Для забезпечення актуальності цінової політики ці системи інтегруються з електронними цінниками, що використовують енергоефективний

стандарт IEEE 802.15.4.

Важливим кроком до прозорості стало впровадження блокчейн-технологій, зокрема платформи IBM Food Trust, яка базується на Hyperledger Fabric і забезпечує простежуваність продуктів «від ферми до столу» [41].

Завершальним етапом формування КФС є автоматизація операцій на касах та забезпечення безпеки. Сучасні рішення від Diebold Nixdorf використовують ШІ для запобігання крадіжкам на касах самообслуговування, а точність внутрішньої навігації персоналу забезпечується за рахунок технології Ultra-Wideband (UWB) згідно зі стандартом IEEE 802.15.4z [42].

Доповнює систему безпеки акустичний моніторинг середовища, здатний розпізнавати критичні звукові патерни в зонах, недоступних для відеокамер. Усі зазначені потоки даних фіналізуються в хмарних платформах рівня SAP S/4HANA Cloud Retail, що здійснюють вертикальну інтеграцію бізнес-процесів [43]. Проте, аналіз показує, що навіть за такої архітектури зберігається розрив між оперативними даними сенсорів та стратегічним управлінням, що підтверджує необхідність розробки більш адаптивної та цілісної кіберфізичної системи.

На основі проведеного аналізу можна виділити такі ключові тенденції у розвитку методів моніторингу об'єктів торговельної інфраструктури:

1. Інтеграція сенсорних і програмних підсистем стає обов'язковою для комплексного контролю всіх параметрів супермаркета.
2. Автоматизація обробки даних і аналітика в режимі реального часу дозволяє швидко реагувати на відхилення та підвищувати ефективність управління.
3. Поєднання контролю технічного обладнання, логістики та потоків покупців створює можливість для розробки кіберфізичних систем нового покоління.
4. Незважаючи на широкий арсенал існуючих рішень, залишається потреба у системах, що поєднують моніторинг, аналіз та автоматичний контроль в єдиному комплексі.

По-друге, методи можна класифікувати за об'єктом контролю:

- інженерно-технічні системи – холодильні установки, кондиціонери, освітлення, вентиляція, касові термінали, системи безпеки;
- логістичні процеси до яких входить облік товарів, контроль запасів, управління постачаннями;
- персонал та взаємодія з клієнтами з врахуванням контролю робочого часу, обслуговування покупців, рівня задоволеності;
- інфраструктурна складова, тобто відвідуваність зон, черги, завантаженість простору, стан аварійних виходів.

Після проведеного огляду, слід зазначити, що основна проблема полягає у відсутності адаптивності. Більшість систем працюють за жорстко заданими сценаріями (наприклад, якщо температура вище  $X$ , то увімкнути охолодження). Проте КФС має враховувати контекст, тобто чи є в залі люди, яка вартість електроенергії в цей момент, і чи не планується завантаження нової партії товару.

#### 1.4 Постановка задачі

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі основні завдання.

1. Дослідити існуючі методи моніторингу та контролю КФС у ритейлі, визначивши їхні переваги та обмеження.
2. Описати супермаркет як динамічну систему, виділивши структурні компоненти та контури управління.
3. Розробити моделі потоків відвідувачів на основі теорії масового обслуговування та модель адаптивного зонного керування освітленням із використанням графового представлення .
4. Обґрунтувати створення єдиного моніторингового стану  $M(t)$ , що об'єднує інформацію про трафік, температуру, залишки товарів та стан обладнання для подолання «інформаційних островів».
5. Сформулювати механізми вибору режимів роботи (нормальний, піковий,

аварійний) та багатокритеріальну функцію ефективності, що балансує між комфортом клієнтів та енергоспоживанням.

### 1.5 Висновки

Проведений аналіз сучасного стану та тенденцій розвитку торговельної інфраструктури дозволив встановити, що в основі її цифрової трансформації лежить глибока інтеграція концепцій Індустрія 4.0 та Розумна інфраструктура. Це передбачає перехід від простих систем автоматизації до складних кіберфізичних екосистем, де фізичні об'єкти (товари, обладнання) тісно взаємодіють із цифровими алгоритмами в єдиному інформаційному просторі. Систематизація існуючих методів моніторингу та контролю показала, що попри наявність широкого арсеналу засобів, від інтелектуальної відеоаналітики на базі нейромереж YOLO (v8–v11) до енергоефективних сенсорних мереж LoRaWAN та ZigBee 3.0, більшість сучасних рішень залишаються вузькоспеціалізованими .

Ключовою проблемою, ідентифікованою у ході дослідження, є формування так званих «інформаційних островів», коли дані про потоки покупців, стан мікроклімату та логістику товарів не синхронізуються між собою у реальному часі . Це створює суттєвий технологічний розрив між оперативними даними сенсорного рівня та стратегічним управлінням у ERP-системах, що призводить до інертності прийняття рішень та надмірних витрат ресурсів .

Аналіз підтвердив необхідність розробки інтегрованого методу адаптивного багаторівневого моніторингу, який базуватиметься на формуванні єдиного моніторингового стану  $M(t)$  для подолання розриву між фізичним і кібернетичним просторами супермаркету .

## 2 МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ МОНІТОРИНГУ ТА КОНТРОЛЮ ФУНКЦІОНУВАННЯ СУПЕРМАРКЕТУ

### 2.1 Формалізація об'єкта моніторингу та контролю як кіберфізичної системи

Об'єктом дослідження в даній магістерській роботі є процеси моніторингу та контролю функціонування супермаркету, де супермаркет розглядається як складна багаторівнева кіберфізична система, у якій фізичні процеси тісно інтегровані з інформаційними та керуючими компонентами.

Функціонування такого об'єкта характеризується наявністю великої кількості взаємопов'язаних елементів, що працюють у реальному часі та потребують безперервного моніторингу й адаптивного контролю.

З фізичної точки зору супермаркет включає торгові зали, складські приміщення, холодильне та морозильне обладнання, інженерні системи (освітлення, вентиляція, кондиціонування), а також потоки товарів і покупців. Дані фізичні процеси описуються сукупністю вимірюваних параметрів, серед яких температура, вологість, рівень освітлення, енергоспоживання, заповненість торгових зон, стан товарних запасів та технічний стан обладнання.

Кіберфізична складова об'єкта представлена мережею сенсорів, виконавчих пристроїв, комунікаційних каналів, обчислювальних вузлів та програмних компонентів. Сенсорна підсистема забезпечує збір первинних даних про стан фізичного середовища, а комунікаційна інфраструктура передає ці дані до підсистеми обробки та аналізу. На цьому рівні використовуються алгоритми фільтрації, агрегації та інтелектуального аналізу даних, що дозволяють виявляти аномалії, прогнозувати відхилення та формувати керуючі впливи.

З точки зору теорії систем супермаркет як КФС доцільно представити у вигляді кортежу виду 2.1:

$$CPS = \langle P, S, A, C, U \rangle, \quad (2.1)$$

де  $P$  – множина фізичних процесів (зберігання товарів, рух покупців, енергоспоживання);

$S$  – множина сенсорів і засобів збору даних;

$A$  – алгоритми обробки, аналізу та прогнозування;

$C$  – комунікаційна інфраструктура;

$U$  – підсистема управління та прийняття рішень.

Підсистема управління реалізує функції моніторингу та контролю шляхом формування керуючих сигналів для виконавчих механізмів (регулювання температури, освітлення, вентиляції, сигналізації, поповнення запасів). Управління може здійснюватися як у автоматичному режимі, так і за участю оператора через інтерфейс людина–машина, що є важливою особливістю реальних систем роздрібної торгівлі.

Важливою характеристикою формалізованого об'єкта є його динамічність та невизначеність, зумовлені змінами потоку покупців, сезонними коливаннями попиту, зношенням обладнання та зовнішніми впливами. Це вимагає застосування адаптивних і інтелектуальних методів контролю, здатних працювати в умовах неповної та зашумленої інформації.

Формалізація супермаркету як кіберфізичної системи дозволяє чітко виділити його структурні компоненти, інформаційні потоки та контури управління. Це створює методологічну основу для подальшої розробки моделей моніторингу, алгоритмів контролю та обґрунтування наукової новизни магістерської роботи.

Кіберфізична складова об'єкта представлена мережею сенсорів, виконавчих пристроїв, комунікаційних каналів, обчислювальних вузлів та програмних компонентів.

Сенсорна підсистема забезпечує збір первинних даних про стан фізичного середовища, а комунікаційна інфраструктура передає ці дані до підсистеми обробки та аналізу. На цьому рівні використовуються алгоритми фільтрації, агрегації та інтелектуального аналізу даних, що дозволяють виявляти аномалії, прогнозувати відхилення та формувати керуючі впливи.

З позицій теорії систем супермаркет доцільно розглядати як складну відкриту динамічну систему, що функціонує у змінному зовнішньому середовищі та характеризується великою кількістю взаємопов'язаних елементів. Система є відкритою, оскільки на її стан постійно впливають зовнішні фактори: потік покупців, зміни попиту, енергетичні тарифи, технічний стан обладнання, нормативні вимоги тощо.

Водночас супермаркет має ознаки ієрархічної системи, де можна виділити декілька рівнів: фізичний (обладнання, приміщення, товари), інформаційний (сенсори, канали зв'язку), обчислювальний (алгоритми аналізу) та керуючий (прийняття рішень). Така багаторівнева структура є типовою для кіберфізичних систем і визначає необхідність застосування системного підходу до їх аналізу та моделювання.

У рамках теорії систем об'єкт моніторингу та контролю описується через такі базові поняття, як стан, вхід, вихід та керування. Стан системи визначається множиною змінних, які характеризують її поточний режим функціонування. Для супермаркету це можуть бути температурні режими холодильного обладнання, рівень заповнення полиць, енергоспоживання, кількість покупців у торговому залі.

Вхідні сигнали відображають як керуючі впливи, так і зовнішні збурення. До збурень належать зміни зовнішньої температури, нерівномірність потоку покупців, випадкові відмови обладнання.

Вихідні сигнали – це результати функціонування системи, які можуть бути виміряні або оцінені. Це якість зберігання товарів, рівень комфорту, витрати енергії.

Особливістю кіберфізичних систем є те, що не всі змінні стану можуть бути безпосередньо виміряні, що зумовлює необхідність використання теорії спостереження та оцінювання стану.

Сформовані на основі оброблених даних керуючі впливи реалізуються через виконавчі підсистеми, до яких належать системи освітлення, клімат-контролю, касового обслуговування та керування торговим обладнанням. Реалізація керування здійснюється у замкненому контурі з постійним зворотним

зв'язком, що забезпечує актуалізацію стану системи після кожного циклу управління. Такий підхід дозволяє системі оперативно реагувати на зміну умов функціонування та коригувати свої дії відповідно до поточного та прогнозованого стану об'єкта.

Узгоджена робота фізичної та кібернетичної складових супермаркету забезпечує цілісність і адаптивність кіберфізичної системи в цілому. Завдяки інтеграції моніторингу, прогнозування та контролю в єдину архітектуру створюються передумови для підвищення ефективності управління, зниження експлуатаційних витрат та покращення якості обслуговування відвідувачів. Це, у свою чергу, підтверджує доцільність обраного підходу.

## 2.2 Моделювання інформаційних потоків і контурів керування кіберфізичної системи

Узагальнений граф кіберфізичної системи супермаркету слугує концептуальним та аналітичним інструментом для візуалізації та формалізації взаємодії фізичних і кібернетичних компонентів системи. Такий граф відображає структурні зв'язки між основними підсистемами, включаючи стан об'єкта, сенсорний моніторинг, алгоритми контролю та керуючі впливи, а також зовнішні фактори, що впливають на його функціонування.

Граф дозволяє наочно показати двосторонній потік інформації між фізичним та кібернетичним просторами. Фізичний простір включає торговий зал, холодильне обладнання, товари та покупців, тобто всі реальні об'єкти, стан яких змінюється динамічно у часі. Кібернетичний простір відповідає за збір даних, обробку інформації та прийняття управлінських рішень, забезпечуючи контроль за станом системи та її адаптацію до змін зовнішніх умов.

Узагальнений граф кіберфізичної системи супермаркету представлений на рисунку 2.1.

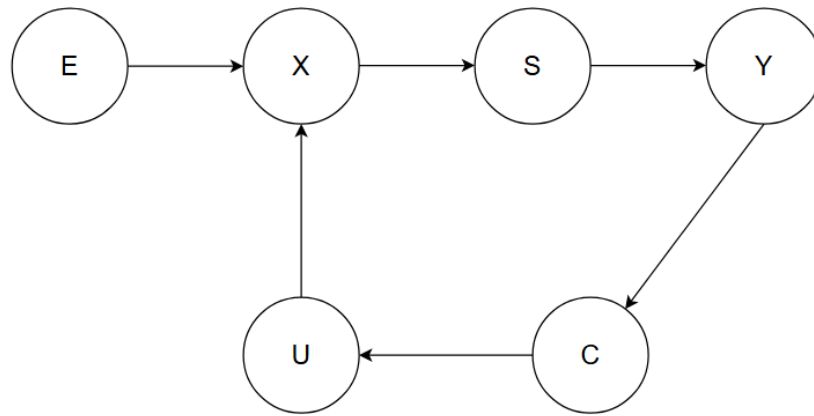


Рисунок 2.1 – Узагальнений граф кіберфізичної системи супермаркету

Основними елементами графа є:

$X$  – стан системи;

$U$  – вхідні керуючі впливи;

$Y$  – вихідні сигнали;

$S$  – сенсорна підсистема;

$C$  – контролер відповідає за алгоритми прийняття рішень та формування керуючих впливів;

$E$  – зовнішнє середовище, тобто збурення, що не контролюються безпосередньо системою.

Стан системи  $X$  включає сукупність ключових параметрів супермаркету, які змінюються у часі.

До них належать:

- інтенсивність трафіку покупців, яка визначає навантаження на торгові зали та касові вузли;
- температура в торгових і холодильних зонах, що впливає на збереження продуктів та комфорт клієнтів;
- рівень залишків товарів, тобто характеризує наявність продуктів на полицях і складах.

Цей блок відображає фізичний стан системи та слугує вихідною точкою для сенсорного моніторингу та контролю.

Вектор керування  $U$  формує підсистема контролю на основі оцінки стану і цільових параметрів. Він включає:

- режими освітлення торгових та допоміжних приміщень, оптимізація енерговитрат та комфорту клієнтів;
- робота касових вузлів, тобто кількість відкритих кас, швидкість обслуговування;
- електронні цінники, тобто оперативне оновлення цін та інформаційного контенту.

Керування впливає на фізичний простір, створюючи зворотний зв'язок, що дозволяє підтримувати оптимальний стан системи.

Вихідні сигнали  $Y$  формуються сенсорними підсистемами та системою моніторингу. Вони включають:

- температурні показники та енергоспоживання;
- інформацію про залишки товарів та черги на касах;
- дані про відвідуваність і поведінку покупців.

Цей блок забезпечує неперервне спостереження стану системи, необхідне для формування точних оцінок та керуючих впливів.

Сенсори  $S$  збирають дані фізичного середовища та передають їх до контролера. Вона включає:

- термодатчики та холодильні монітори;
- системи відеоспостереження та датчики трафіку;
- системи обліку залишків і електронні цінники.

Сенсорна підсистема є первинним каналом збору інформації і дозволяє оцінити поточний стан супермаркету для контролера.

Контролер  $C$  реалізує алгоритми прийняття рішень, перетворюючи вихідні дані сенсорів у керуючі впливи. Його функції:

- оцінка стану системи на основі отриманих даних;
- прийняття рішень щодо оптимального керування (регулювання освітлення, кас, температури, ESL);

- адаптація до змін зовнішніх умов та непередбачуваних збурень.

Контролер формує інтелектуальний шар системи, який забезпечує ефективну роботу супермаркету.

Зовнішнє середовище E включає некеровані фактори, що впливають на стан системи:

- погодні умови (температура, вологість);
- сезонні коливання попиту;
- випадкові відмови обладнання або зміни поведінки покупців.

Граф дозволяє відобразити, як зовнішні збурення впливають на стан системи та викликають необхідність адаптивного керування.

За допомогою графа можна відслідковувати, як зміни у стані фізичного простору, що передаються через сенсорну підсистему до контролера та впливають на керуючі сигнали, які знову змінюють стан об'єкта.

Граф слугує:

- інструментом формалізації замкненого контуру моніторингу та контролю, який включає взаємодію між станом, вимірюванням, оцінкою та управлінням;
- моделлю для аналізу впливу зовнішніх факторів на продуктивність та ефективність системи;
- підставою для математичного моделювання, оскільки він визначає, які змінні спостерігаються, які впливи керовані, а які є стохастичними;
- засобом візуалізації для пояснення принципів функціонування КФС, що полегшує розробку алгоритмів оптимального контролю та інтеграцію нових технологій.

Завдяки узагальненому графу можна оцінити вразливі місця системи, прогнозувати ефект різних стратегій управління та оптимізувати ресурси (енергію, персонал, обслуговування) при збереженні необхідної якості обслуговування покупців.

Граф процесу моніторингу стану кіберфізичної системи супермаркету є структурною моделлю інформаційних потоків, що відображає, як дані про стан

об'єкта збираються, обробляються та передаються для оцінки стану та подальшого контролю.

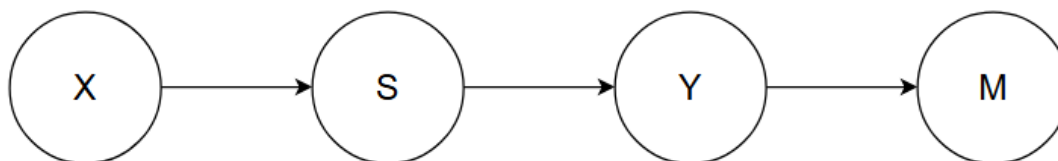


Рисунок 2.2 – Граф процесу моніторингу стану кіберфізичної системи супермаркету

На основі оброблених даних формується оцінка стану системи М, яка може включати:

- інтерполяцію та екстраполяцію даних для неповністю спостережуваних змінних;
- аналіз відхилень від нормальних параметрів (наприклад, черги на касах, підвищена температура холодильних блоків);
- побудову ймовірнісних моделей стану, що враховують випадкові збурення зовнішнього середовища.

Оцінка стану є ключовою для прийняття рішень контролером, оскільки вона служить основою для формування керуючих впливів.

Мета такого графа полягає в:

- візуалізації інформаційного потоку від фізичних параметрів об'єкта до алгоритмів оцінки стану;
- виявленні критичних точок збору даних, де точність вимірювань може суттєво впливати на результати оцінки;
- формалізації підходу до обробки даних, включаючи фільтрацію шумів, агрегацію та прогнозування;
- створенні основи для побудови моделей контролю та оптимізації;
- забезпеченні інтеграції нових сенсорів або алгоритмів у існуючу систему.

Граф моніторингу є першою ланкою у замкненому контурі кіберфізичної системи, що забезпечує ефективну взаємодію фізичного та кібернетичного простору.

Процес контролю в кіберфізичній системі супермаркету доцільно формалізувати у вигляді орієнтованого графа замкненого типу, який відображає безперервну взаємодію між фізичним об'єктом управління, підсистемою моніторингу та алгоритмом керування. Такий граф дозволяє наочно й формально описати циклічний характер функціонування системи, а також потоки інформації та керуючих впливів між її компонентами (рисунок 2.3).

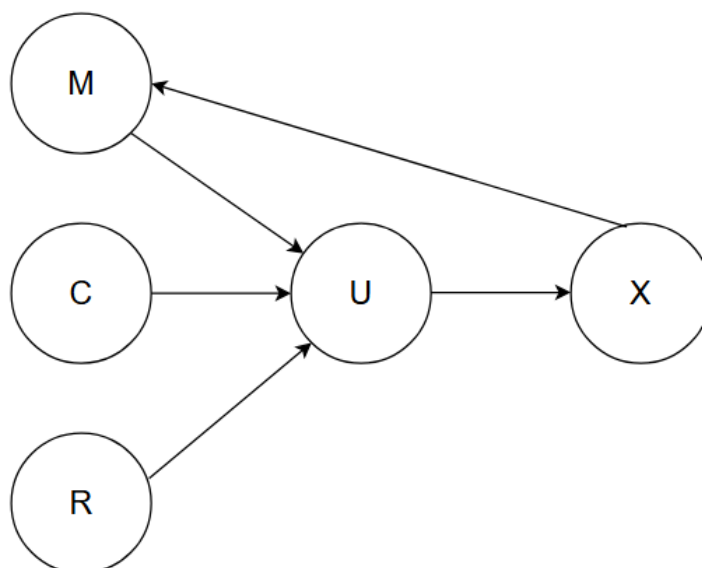


Рисунок 2.3 – Орієнтований граф замкненого типу

Вершини графа відповідають ключовим функціональним елементам системи, серед яких фізичний стан об'єкта, оцінка або моніторингове представлення цього стану, блок формування керуючих рішень, а також виконавчі механізми. Орієнтовані ребра графа відображають напрямки передачі інформації та сигналів керування, формуючи замкнений інформаційно-керуючий контур.

Замкненість графа означає наявність зворотного зв'язку, за якого результати реалізованих керуючих впливів безпосередньо впливають на подальший стан системи та використовуються для корекції наступних рішень.

Саме завдяки цьому механізму система здатна реагувати на динамічні зміни середовища, компенсувати збурення та підтримувати задані режими функціонування.

У межах кіберфізичної системи супермаркету замкнений контур контролю забезпечує узгодження між фізичним простором, у якому відбуваються реальні процеси (рух покупців, зміна температури, робота обладнання), та кібернетичним простором аналізу і прийняття рішень. Граф процесу контролю дозволяє інтегрувати результати моніторингу, прогнозування та оптимізації в єдину формальну структуру.

Крім того, графова форма подання процесу контролю спрощує аналіз стійкості, адаптивності та масштабованості системи. Вона дає змогу досліджувати вплив окремих підсистем на загальну поведінку КФС, виявляти критичні вузли та оцінювати ефективність різних стратегій керування. Це робить граф процесу контролю важливим інструментом як для теоретичного аналізу, так і для практичної реалізації адаптивних алгоритмів управління.

Потоки інформації в графі процесу моніторингу зображені на рисунку 2.4. Тут демонструється шлях інформації від фізичних змін у торговому середовищі до прийняття керуючих рішень у кібернетичному просторі.

Потоки інформації на графі потрібні для обґрунтування принципу функціонування системи, показуючи, як дані збираються, обробляються та використовуються для підтримки ефективної роботи супермаркету. Реальні фізичні процеси, такі як зміни трафіку покупців, коливання температури у зонах зберігання або зменшення залишків товарів, фіксуються сенсорними пристроями та перетворюються на цифрові сигнали. Ці сигнали проходять через етап обробки, який включає фільтрацію шумів, агрегацію даних та їх аналіз, що дозволяє отримати достовірну та структуровану інформацію про стан системи.

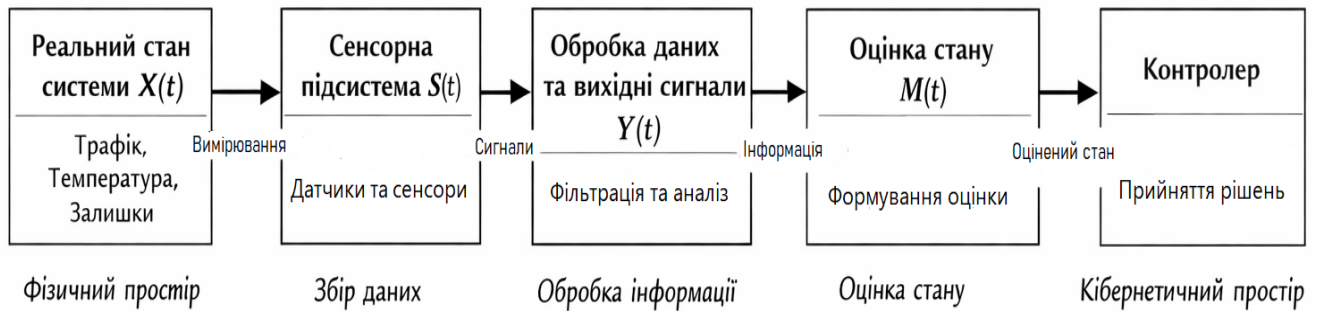


Рисунок 2.4 – Потоки інформації в графі процесу моніторингу

На наступному етапі формується оцінка стану, яка узагальнює інформацію від усіх сенсорів та підсистем, враховує зовнішні збурення і потенційні прогнозовані зміни, забезпечуючи повну картину поточного функціонування супермаркету. Отримані дані надходять до контролера, який на основі оцінки стану формує керуючі впливи, такі як регулювання освітлення, активація або оптимізація роботи касових вузлів, оновлення інформації на електронних цінниках, що, у свою чергу, впливає на фізичний стан системи.

Потоки інформації на графі відображають замкнений цикл взаємодії фізичного та кібернетичного простору, де дані з реального середовища трансформуються у знання, а знання перетворюється на дії, які підтримують ефективність і адаптивність системи.

Для розробників така візуалізація є ключовим інструментом для аналізу роботи CPS, виявлення вузьких місць у зборі та обробці даних, інтеграції нових сенсорів або алгоритмів оцінки та прогнозування, а також для оптимізації ресурсів супермаркету з точки зору енерговитрат, якості обслуговування та доступності товарів.

Для адміністрації та менеджерів супермаркету граф потоку інформації надає наочне уявлення про те, як дані конвертуються в управлінські рішення, забезпечуючи прозорість процесів і обґрунтування прийнятих рішень.

З позиції експлуатації кіберфізичної системи граф потоків інформації також виконує роль інструмента узгодження між стратегічним та оперативним рівнями

управління. Дані, що циркулюють у системі, можуть бути використані не лише для поточного контролю, але й для довгострокового аналізу тенденцій, оцінки ефективності впроваджених алгоритмів та планування розвитку інфраструктури супермаркету. Це дозволяє перетворити систему з реактивної на проактивну, орієнтовану на прогнозування та запобігання потенційним проблемам.

Крім того, формалізоване подання потоків інформації створює основу для масштабування кіберфізичної системи та її інтеграції з зовнішніми інформаційними сервісами. Зокрема, графова модель полегшує підключення нових підсистем, таких як системи аналітики попиту, логістичні платформи або сервіси управління ланцюгами постачання, без порушення цілісності існуючої архітектури. Це підвищує гнучкість та інвестиційну привабливість рішень, що застосовуються в супермаркеті, та забезпечує їхню відповідність сучасним вимогам цифрової трансформації роздрібною торгівлі.

Особливу увагу в межах розглянутої кіберфізичної системи слід приділити методам багаторівневої обробки та семантичної кореляції даних, які забезпечують узгодження інформації, отриманої з різномірних сенсорних джерел. Первинні дані, що надходять із фізичного середовища, характеризуються зашумленістю, неповнотою та часовими затримками, що унеможлиблює їх безпосереднє використання для формування керуючих впливів. Застосування багаторівневого підходу до обробки даних дозволяє виконувати фільтрацію та попередній аналіз інформації на локальному рівні, агрегацію та узгодження показників із різних сенсорів на проміжному рівні, а також інтеграцію та прогнозування стану системи на верхньому рівні управління.

Семантична кореляція даних забезпечує встановлення логічних зв'язків між подіями фізичного світу та відповідними реакціями цифрової підсистеми, що дозволяє інтерпретувати вимірні параметри з урахуванням контексту функціонування супермаркету. Такий підхід дає можливість поєднувати інформацію про потоки покупців, температурні режими, стан обладнання та рівень енергоспоживання в єдиному моніторинговому представленні. У результаті формується узагальнена оцінка стану системи, яка враховує як поточні

вимірювання, так і прогнозовані зміни, зумовлені динамікою зовнішніх і внутрішніх факторів.

Інтеграція багаторівневої обробки та семантичної кореляції даних створює передумови для реалізації замкненого контуру моніторингу та контролю, в межах якого керуючі впливи формуються на основі актуального та прогнозного стану кіберфізичної системи. Це підвищує стійкість системи до невизначеності та зашумлених даних, забезпечує адаптивність до змін інтенсивності потоків відвідувачів і зовнішніх умов експлуатації, а також дозволяє підтримувати ефективну та узгоджену роботу всіх підсистем супермаркету в динамічному режимі.

### 2.3 Моделювання процесів у торговому залі супермаркету

Для забезпечення адаптивності кіберфізичної системи необхідно формалізувати основні процеси, що відбуваються в торговому залі, у вигляді математичних моделей. Такі моделі дозволяють перейти від емпіричного керування до алгоритмічного прийняття рішень.

Потік покупців у супермаркеті розглядається як випадковий процес, що змінюється в часі та залежить від зовнішніх і внутрішніх факторів. Для його опису супермаркет моделюється як багатоканальна система масового обслуговування з обмеженою чергою, де каналами обслуговування є каси, а заявками є покупці.

Інтенсивність вхідного потоку  $\lambda(t)$  визначається на основі даних відеоаналітики, зокрема результатів детекції об'єктів із використанням алгоритмів комп'ютерного зору. Середня інтенсивність обслуговування  $\mu(t)$  залежить від типу кас, навантаження персоналу та структури покупок.

Використання рівнянь Ерланга дозволяє оцінити ймовірність утворення черги, середній час очікування та рівень завантаженості кас. Ці показники є важливою складовою моніторингового стану та використовуються для визначення моментів критичного навантаження, за яких необхідно змінювати режим роботи

касової зони.

На відміну від традиційного глобального керування освітленням, у даній роботі використовується зонний підхід, який дозволяє враховувати просторову неоднорідність активності покупців.

Торговий зал формалізується у вигляді орієнтованого або неорієнтованого графа вида 2.2:

$$G = \langle V, W \rangle, \quad (2.2)$$

де  $V$  – множина вершин, яка відповідає окремим просторовим зонам залу, які визначаються з урахуванням зон видимості камер відеоспостереження, архітектурних обмежень та логіки покупецьких маршрутів. Кожна зона може відповідати відділу товарів, проходу між стелажми або касовій групі;

$W$  – ребра графа, які відображають можливі траєкторії переміщення покупців між зонами та задають просторову зв'язність торгового простору.

Кожна вершина характеризується вектором параметрів стану виду 2.3:

$$VG_i = \langle L_i, P_i, K_i, Q_i \rangle, \quad (2.3)$$

де  $L_i$  – поточний рівень освітленості у зоні;

$P_i$  – кількість відвідувачів у зоні;

$K_i$  – коефіцієнт комфорту (визначається на основі нормативів освітленості та кількості людей);

$Q_i$  – поточне енергоспоживання освітлювальних приладів у зоні.

Ребра графа  $V$  можуть мати вагу  $w_i$ , яка визначає ймовірність переходу покупця із однієї до іншої зони на основі аналізу траєкторій руху та статистики потоків. Це дозволяє здійснювати прогнозування присутності відвідувачів у суміжних зонах і реалізовувати превентивне керування освітленням.

Таке графове подання дозволяє перейти від абстрактного поняття «торговий зал» до формалізованої структури, придатної для алгоритмічного

аналізу та оптимізації. Кожна вершина графа асоціюється з набором параметрів, серед яких рівень освітленості, поточна активність відвідувачів, часові характеристики перебування та енергоспоживання відповідних світлових приладів. Ребра графа, у свою чергу, можуть бути зваженими, де ваги відображають імовірність переходу покупця між зонами, що визначається статистикою руху або результатами комп'ютерного зору.

На основі аналізу напрямку руху покупців реалізується предиктивний механізм керування, за якого освітлення в суміжних зонах активується превентивно. Це дозволяє зменшити затримки в реакції системи та одночасно оптимізувати енергоспоживання.

Результати цієї моделі інтегруються в моніторинговий стан у вигляді показників комфорту та енергоефективності, що впливають на подальше формування керуючих впливів.

У сучасних кіберфізичних системах роздрібної торгівлі освітлення є не лише інженерною підсистемою, а й важливим елементом формування комфорту відвідувачів, впливу на їх поведінку та загальної енергоефективності об'єкта. Традиційні системи керування освітленням у супермаркетах, як правило, базуються на глобальних сценаріях або простих датчиках руху, що не враховують складну просторово-часову структуру активності покупців. Такий підхід призводить до надлишкового енергоспоживання або, навпаки, до затримок у реакції системи, які негативно впливають на сприйняття якості обслуговування.

У даній роботі пропонується модель адаптивного керування освітленням торгового залу, що базується на зонному принципі та інтегрується в загальну кіберфізичну систему супермаркету. Основною ідеєю моделі є відмова від глобального керування на користь локалізованого, просторово-орієнтованого підходу, який дозволяє враховувати нерівномірний розподіл потоку відвідувачів і динаміку їх переміщення в реальному часі.

Ключовою особливістю запропонованої моделі є використання предиктивного механізму керування освітленням. На основі аналізу напрямку та швидкості руху покупців система не лише реагує на вже зафіксовану присутність

людини в зоні, але й прогнозує її подальше переміщення. Якщо покупець знаходиться в зоні з високою ймовірністю рухається в напрямку іншої зони, то система превентивно підвищує рівень освітленості в тій зоні ще до фактичного входу відвідувача.

Такий підхід дозволяє суттєво зменшити затримки між появою покупця та досягненням комфортного рівня освітлення, що особливо важливо для зон з інтенсивним рухом або підвищеними вимогами до візуального комфорту. На відміну від реактивних систем, де освітлення активується лише після спрацювання датчика, предиктивне керування формує відчуття плавної та природної адаптації середовища до дій людини.

З точки зору енергоефективності зонний підхід дозволяє уникнути постійного освітлення всього торгового залу на максимальному рівні. Зони з низькою активністю або відсутністю покупців можуть перебувати в енергозберігаючому режимі, тоді як освітлення активується лише там і тоді, де це дійсно необхідно. Система досягає балансу між якістю обслуговування та витратами енергії, що є однією з ключових цілей функціонування кіберфізичної системи супермаркету.

Модель адаптивного керування освітленням тісно інтегрується з підсистемою моніторингу та формування єдиного моніторингового стану  $M(t)$ . Показники, що характеризують стан освітлення, рівень комфорту та поточне енергоспоживання, входять до складу цього стану нарівні з іншими параметрами, такими як потоки покупців або температурні режими. Це дозволяє розглядати освітлення не як ізольовану підсистему, а як складову цілісної адаптивної системи керування.

Зокрема, результати роботи моделі можуть бути представлені у вигляді індексу освітлювального комфорту та коефіцієнта енергоефективності, які використовуються під час обчислення багатокритеріальної цільової функції. Зміна пріоритетів між комфортом і економією енергії може здійснюватися адаптивно залежно від часу доби, завантаженості супермаркету або зовнішніх умов. У пікові години система може надавати перевагу комфорту, тоді як у періоди низької

відвідуваності мінімізації енергоспоживання.

Запропонована модель адаптивного керування освітленням торгового залу є прикладом інтеграції методів графового моделювання, прогнозування поведінки користувачів та оптимізації ресурсів у межах кіберфізичної системи. Вона забезпечує підвищення якості обслуговування відвідувачів, зменшення експлуатаційних витрат і створює основу для подальшого розвитку інтелектуальних функцій супермаркету, зокрема адаптації до індивідуальних сценаріїв поведінки та контекстно-залежного керування середовищем.

Керуючий вплив на освітлення у відповідній зоні формується як функція стану сусідніх зон і прогнозованого переміщення покупців, формула 2.4:

$$L_j(t + 1) = L_j(t) + \alpha \sum_{i \in N_j} w_{ij} * P_i(t), \quad (2.4)$$

де  $N_j$  – множина сусідніх зон;

$w_{ij}$  – ймовірність переходу з однієї зони в іншу;

$P_i(t)$  – кількість покупців у певній зоні в момент часу  $t$ ;

$\alpha$  – коефіцієнт адаптації освітлення (визначає, наскільки швидко світло реагує на передбачувану присутність відвідувачів).

Динаміка зміни освітленості дозволяє забезпечити плавний перехід між станами і запобігати різким сплескам споживання енергії.

Інтеграція підсистеми адаптивного керування освітленням у єдиний моніторинговий стан кіберфізичної системи супермаркету є необхідною умовою забезпечення узгодженого та адаптивного функціонування всіх підсистем. На відміну від ізольованих систем керування, де рішення приймаються локально та не враховують загальний контекст роботи об'єкта, запропонований підхід передбачає формування інтегрованого представлення стану супермаркету, яке використовується як основа для прийняття керуючих рішень на різних рівнях.

Моніторинговий стан  $M(t)$  виступає узагальненим інформаційним образом поточного та прогнозованого стану фізичного об'єкта. До його складу входять

агреговані показники, що характеризують ключові аспекти функціонування супермаркету, зокрема потоки відвідувачів, енергоспоживання, мікроклімат, завантаженість інфраструктури та рівень комфорту. Параметри, отримані в результаті роботи моделі адаптивного освітлення, інтегруються в цей стан нарівні з іншими підсистемами, що забезпечує їхню узгодженість та взаємну адаптацію.

Для кожної зони торгового залу результати предиктивного керування освітленням подаються у вигляді нормалізованих показників комфорту та енергоефективності. Ці показники відображають ступінь відповідності фактичного рівня освітленості нормативним вимогам та поточним умовам перебування відвідувачів, а також витрати енергоресурсів на підтримку заданого режиму. Агрегація таких локальних показників дозволяє сформувати глобальну оцінку стану освітлення в масштабі всього супермаркету.

Включення підсистеми освітлення в моніторинговий стан дозволяє реалізувати багаторівневий механізм адаптації. На нижньому рівні система здійснює локальне керування окремими зонами, реагуючи на зміни активності покупців. На вищому рівні інформація про стан освітлення використовується разом з даними інших підсистем для оптимізації загальної стратегії керування супермаркетом. Наприклад, у разі перевищення допустимого рівня енергоспоживання система може змінювати пріоритети цільової функції, зменшуючи інтенсивність освітлення в зонах з низькою активністю.

Інтеграція в моніторинговий стан також забезпечує зв'язок між реальним та прогнозним моніторингом. Прогнозовані значення активності зон і відповідні рівні освітленості враховуються при формуванні майбутнього стану  $M(t+1)$ , що дозволяє системі оцінювати можливі наслідки прийнятих рішень ще до їх фізичної реалізації. Моніторинговий стан виконує не лише функцію відображення поточного стану, а й роль інструмента підтримки прийняття рішень.

Завдяки інтеграції підсистеми освітлення в моніторинговий стан забезпечується замкнений контур контролю, у межах якого результати керування безпосередньо впливають на подальший аналіз і прогнозування. Реалізовані керуючі впливи змінюють фізичний стан торгового залу, що фіксується сенсорами

та камерами і знову включається до складу моніторингового стану. Такий механізм зворотного зв'язку підвищує стійкість системи до збурень і дозволяє адаптуватися до змінних умов експлуатації.

У цілому інтеграція адаптивного керування освітленням у моніторинговий стан кіберфізичної системи супермаркету забезпечує цілісність, узгодженість та масштабованість системи. Вона створює передумови для реалізації комплексних алгоритмів оптимізації, у межах яких освітлення розглядається не як окремий інженерний компонент, а як повноцінний елемент інтелектуального середовища роздрібної торгівлі.

Кожна зона передає свої параметри до єдиного моніторингового стану  $M(t)$ , який агрегує дані з усіх підсистем супермаркету (формула 2.5):

$$M(t) = f(\{S_i(t)\}_{i=1}^n, X(t), Y(t)), \quad (2.5)$$

де  $X(t)$  – вхідні параметри системи (потік покупців, температура, залишки продукті);

$Y(t)$  – керуючі впливи з інших підсистем;

$f$  – функція інтеграції, яка формує загальний стан системи для контролю та прогнозування;

Індекс комфорту для зони визначається через нормалізовану функцію, описану формулою 2.6:

$$C_i(t) = 1 - \frac{|L_i(t) - L_{opt}|}{L_{max} - L_{min}}, \quad (2.6)$$

де  $L_{opt}$  – оптимальний рівень освітлення для даного типу зони;

$L_{max}, L_{min}$  – верхня та нижня границя допустимого освітлення.

Для адаптивного керування визначено за формулою 2.7 багатокритеріальну цільову функцію, яка враховує одночасно комфорт відвідувачів та енергоспоживання:

$$J(t) = \beta_1 \sum_{i=1}^n (1 - C_i(t)) + \beta_2 \sum_{i=1}^n E_i(t), \quad (2.7)$$

де  $\beta_1, \beta_2$  – вагові коефіцієнти, які визначають пріоритети системи між комфортом та економією енергії;

$J(t)$  – мінімізація, що дозволяє системі збалансовано регулювати освітлення, підвищуючи якість обслуговування у пікові години та знижуючи споживання енергії у періоди низької відвідуваності.

Коефіцієнти  $\beta_1$  та  $\beta_2$  можуть адаптуватися динамічно на основі прогнозу потоку покупців або зовнішніх умов.

Багатокритеріальна цільова функція ефективності в адаптивному керуванні супермаркетом визначає комплексну оцінку стану системи, поєднуючи кілька взаємопов'язаних аспектів її функціонування.

По-перше, вона враховує якість обслуговування покупців, зокрема час очікування у черзі, комфорт перебування в торговому залі та доступність товарів. Цей компонент дозволяє формувати керуючі впливи, щоб забезпечити максимальне задоволення потреб клієнтів при оптимальному використанні ресурсів.

По-друге, цільова функція включає економічний та енергетичний аспекти, зокрема витрати на електроенергію, роботу холодильного та освітлювального обладнання, а також ефективність використання персоналу. Інтеграція цих критеріїв дозволяє балансувати між підвищенням комфорту покупців і мінімізацією експлуатаційних витрат, що особливо важливо для великих торгових мереж із високою динамікою потоків відвідувачів та змінним навантаженням на підсистеми.

По-третє, багатокритеріальна функція ефективності передбачає врахування стану обладнання та прогнозованих змін зовнішніх факторів, таких як температура, сезонні коливання попиту або очікуване збільшення потоку покупців. Завдяки цьому система не лише реагує на поточний стан, а й формує превентивні керуючі

впливи, адаптуючи освітлення, клімат-контроль, роботу касс та інші підсистеми для підтримки стабільної роботи супермаркету. Такий підхід дозволяє реалізувати єдиний моніторинговий стан  $M(t)$ , який агрегує всю інформацію та забезпечує комплексну оцінку ефективності функціонування КФС.

Завдяки графовому представлення та інтеграції у єдиний моніторинговий стан, система освітлення функціонує як замкнений контур контролю.

Потік інформації виглядає наступним чином:

- камери та сенсори детектують присутність відвідувачів;
- дані передаються у графову модель зон, де розраховується прогноз переміщення покупців.
- формуються керуючі впливи на освітлення суміжних зон.
- внесені зміни оновлюють стан  $S_i(t+1)$ , який надходить до моніторингового стану  $M(t+1)$ .

Цикл повторюється безперервно, забезпечуючи адаптивність та баланс між комфортом і економією енергії.

## 2.4 Формалізація предиктивного керування

Предиктивне керування в кіберфізичних системах супермаркету базується на принципі прийняття керуючих рішень не лише з урахуванням поточного стану системи, але й на основі прогнозу її майбутньої поведінки. Для реалізації такого підходу необхідна чітка математична формалізація, яка дозволяє описати динаміку системи, взаємозв'язки між її елементами та механізми формування керуючих впливів у часовій перспективі.

Математична формалізація предиктивного керування є ключовим елементом інтеграції фізичного та кібернетичного просторів, оскільки вона забезпечує перехід від емпіричних правил і сценаріїв до формалізованих алгоритмів, здатних працювати в реальному часі та адаптуватися до змін умов функціонування супермаркету. У контексті керування освітленням це означає

можливість передбачати появу відвідувачів у певних зонах торгового залу та відповідно коригувати рівні освітленості ще до фактичної зміни фізичного стану середовища.

Формалізація предиктивного керування ґрунтується на описі торгового залу у вигляді графової моделі, де динаміка станів зон задається дискретними часовими рівняннями переходу. Поточний стан системи в момент часу  $t$  розглядається як вектор параметрів, що включає освітленість, активність покупців і енергоспоживання. На основі цього стану та інформації про ймовірні траєкторії руху відвідувачів формується прогноз майбутнього стану системи на наступний часовий крок  $t+1$ .

Прогнозування у межах предиктивного керування не має на меті точне відтворення поведінки кожного окремого покупця. Натомість воно ґрунтується на статистичних закономірностях руху потоків відвідувачів і дозволяє оцінити імовірність появи активності в суміжних зонах торгового залу. Саме ця ймовірнісна природа прогнозу зумовлює використання зважених графів і функцій переходу, які формують основу для розрахунку керуючих впливів.

Математичний апарат предиктивного керування дозволяє формалізувати компроміс між швидкістю реакції системи та стабільністю її роботи. З одного боку, система повинна реагувати завчасно, щоб забезпечити комфорт відвідувачів. З іншого боку, надмірно агресивне керування може призводити до коливань рівня освітленості та зростання енергоспоживання. Саме тому у рівняннях керування використовуються коефіцієнти адаптації, які регулюють інтенсивність впливу прогнозованих подій на поточний стан системи.

Важливим аспектом математичної формалізації є можливість інтеграції предиктивного керування в замкнений контур контролю. Результати прогнозу використовуються для формування керуючих впливів, після чого система переходить у новий стан, який знову підлягає моніторингу та аналізу. Кожен цикл керування включає етапи спостереження, прогнозування, прийняття рішення та корекції, що відповідає класичній структурі адаптивних систем управління.

У межах кіберфізичної системи супермаркету математична формалізація

предиктивного керування виконує також функцію узгодження між різними підсистемами. Прогноз руху покупців, сформований для задачі керування освітленням, може бути використаний для оптимізації роботи кас, регулювання мікроклімату або управління цифровими цінниками. Предиктивна модель стає спільним інструментом для багаторівневого контролю, що підсилює цілісність і ефективність системи.

Математична формалізація предиктивного керування є необхідною умовою побудови інтелектуальної кіберфізичної системи супермаркету. Вона забезпечує науково-обґрунтований механізм прийняття рішень, дозволяє реалізувати випереджальне керування та створює основу для адаптації системи до змінних умов експлуатації. Саме завдяки формалізації предиктивного керування переходить з концептуального рівня на рівень практичної реалізації в реальних системах роздрібно́ї торгівлі.

У традиційних системах автоматизації супермаркетів переважає реактивний підхід до керування, за якого керуючі впливи формуються виключно на основі поточного або вже зафіксованого стану системи. Такий підхід передбачає, що система спочатку реєструє зміну стану фізичного середовища, а вже після цього реагує на неї відповідною дією. У випадку керування освітленням це означає, що підвищення рівня освітленості відбувається лише після появи покупця в зоні, що неминуче супроводжується затримкою та короткочасним зниженням комфорту.

Предиктивне керування, навпаки, орієнтоване на випереджальну реакцію системи. Воно базується на аналізі тенденцій, напрямків руху та статистичних закономірностей поведінки відвідувачів. У межах кіберфізичної системи супермаркету це дозволяє формувати керуючі впливи до настання фактичної події, наприклад, активувати освітлення в зоні ще до входу покупця. Система не лише реагує на зміни, а й активно формує оптимальні умови середовища.

Ключова відмінність між цими підходами полягає у часовому горизонті прийняття рішень. Реактивне керування працює з поточним або минулим станом, тоді як предиктивне працює з прогнозованим майбутнім станом системи. Це

дозволяє зменшити амплітуду коливань керованих параметрів, підвищити стабільність системи та оптимізувати використання ресурсів.

З точки зору енергоефективності предиктивне керування має суттєву перевагу, оскільки дає змогу уникати надлишкових вмикань та вимикань освітлення, характерних для реактивних систем. Крім того, предиктивний підхід краще масштабується в умовах складних просторових структур торгового залу та високої щільності потоків покупців.

Перехід від реактивного до предиктивного керування є принципово важливим для побудови адаптивної кіберфізичної системи супермаркету, здатної забезпечувати високий рівень комфорту при мінімальних енергетичних витратах.

## 2.5 Робота системи в умовах невизначеності та зашумлених даних

Функціонування кіберфізичної системи супермаркету відбувається в умовах суттєвої невизначеності, що зумовлена як властивостями фізичного середовища, так і обмеженнями сенсорної інфраструктури. Потoki даних, які формуються в реальному часі, мають стохастичний характер і можуть містити похибки вимірювання, пропуски, затримки або спотворення, викликані шумами, технічними несправностями або складною поведінкою відвідувачів.

До основних джерел невизначеності належать варіації інтенсивності потоку покупців, непередбачувані траєкторії руху, зміни зовнішніх умов (температура, освітленість, сезонні фактори), а також деградація сенсорів і виконавчих пристроїв у процесі експлуатації. У таких умовах пряме використання сирих вимірювань для формування керуючих впливів може призводити до нестабільної роботи системи або неефективного використання ресурсів.

Для зменшення впливу зашумлених даних у запропонованій системі використовується багаторівнева обробка інформації. На первинному рівні здійснюється фільтрація та нормалізація сенсорних даних, що дозволяє усунути випадкові сплески та аномальні значення. На наступному рівні виконується агрегація інформації з різних джерел, у результаті чого формується узагальнене

увявлення про стан окремих зон та підсистем супермаркету.

Ключову роль у роботі системи в умовах невизначеності відіграє формування оцінки стану, яка є не просто набором вимірних параметрів, а результатом інтеграції реальних спостережень, історичних даних та прогнозних моделей. Такий підхід дозволяє компенсувати тимчасову відсутність даних або їх низьку достовірність, використовуючи оцінені або прогнозовані значення параметрів.

Особливістю запропонованого методу є поєднання реального та прогнозного моніторингу. Реальний моніторинг відображає поточний стан фізичного середовища, тоді як прогнозний моніторинг дозволяє оцінювати майбутній розвиток процесів на заданому часовому горизонті. У разі зростання рівня невизначеності система автоматично збільшує роль прогнозованої складової, зменшуючи чутливість до миттєвих коливань вимірювань.

На рівні прийняття рішень невизначеність враховується через адаптивне формування керуючих впливів. Керуючі алгоритми не орієнтуються на жорстко задані порогові значення, а використовують багатокритеріальну оцінку ефективності, де вагові коефіцієнти можуть змінюватися залежно від достовірності даних та поточного режиму роботи супермаркету. Це дозволяє забезпечити компроміс між енергоефективністю, комфортом покупців і стабільністю функціонування системи.

Робота кіберфізичної системи в умовах невизначеності базується на принципах адаптивності, прогнозування та інтеграції різномірної інформації. Це забезпечує стійке функціонування системи навіть за наявності зашумлених або неповних даних та підвищує її практичну придатність для реальних умов експлуатації. Важливим аспектом функціонування системи в умовах невизначеності є наявність зворотного зв'язку між результатами реалізації керуючих впливів та подальшою оцінкою стану об'єкта. Після виконання керуючих дій система аналізує реакцію фізичного середовища та зіставляє її з очікуваними результатами, що дозволяє коригувати параметри моделей та уточнювати моніторинговий стан. Такий механізм забезпечує поступову адаптацію

системи до змін характеристик об'єкта, зокрема до деградації обладнання або зміни поведінки відвідувачів у довгостроковій перспективі.

Крім того, формалізоване представлення невизначеності у межах кіберфізичної системи створює передумови для подальшого розширення та вдосконалення алгоритмів керування. Зокрема, це дозволяє інтегрувати методи сценарного аналізу, імовірнісного прогнозування та навчання на історичних даних без порушення цілісності архітектури системи. У результаті система здатна не лише стабільно функціонувати в складних умовах експлуатації, але й поступово підвищувати ефективність управління, адаптуючись до специфіки конкретного супермаркету та зовнішнього середовища.

## 2.6 Висновки

У другому розділі магістерської роботи було сформовано математичну та концептуальну основу функціонування кіберфізичної системи супермаркету, що дозволяє комплексно аналізувати взаємодію фізичних процесів, сенсорних підсистем та керуючих механізмів. Вивчення потоків відвідувачів на основі теорії масового обслуговування дозволило оцінити критичні навантаження на касові вузли, просторову активність покупців та ймовірність утворення черг, що є ключовим для підвищення ефективності обслуговування та комфорту клієнтів.

Було розроблено модель адаптивного керування освітленням торгового залу з використанням зонного підходу та предиктивної активації, що дозволяє враховувати напрямок руху покупців та оптимізувати енергоспоживання. Інтеграція цих моделей через єдиний моніторинговий стан  $M(t)$  забезпечує узгодженість роботи всіх підсистем, дозволяє агрегувати дані від сенсорів, обробляти їх із урахуванням шумів та невизначеності, а також формувати достовірну оцінку стану супермаркету в реальному часі.

Розроблені графи моніторингу та контролю, а також схеми потоків інформації демонструють логіку взаємодії фізичного та кібернетичного простору,

наочно показують маршрути передачі даних, процес їх обробки та прийняття рішень. Це дозволяє як розробникам, так і адміністрації супермаркету отримати прозоре уявлення про роботу системи, виявляти вузькі місця та планувати впровадження нових сенсорів або алгоритмів контролю.

Отримані результати дають можливість сформувати основи нового адаптивного методу багаторівневого моніторингу та контролю, який поєднує реальний та прогнозний моніторинг та адаптивне формування керуючих впливів.

### 3 МЕТОД МОНІТОРИНГУ Й КОНТРОЛЮ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ СУПЕРМАРКЕТУ

#### 3.1 Основи методу моніторингу й контролю системи супермаркету

У сучасних кіберфізичних системах супермаркетів переважна більшість рішень з моніторингу та контролю ґрунтується на локальних або слабо інтегрованих підходах, які не враховують повною мірою взаємозалежність між потоками покупців, енергоспоживанням та станом товарних запасів. Існуючі системи, як правило, оптимізують окремі підсистеми (каси, освітлення, холодильне обладнання) без урахування глобального стану системи, що призводить до зростання експлуатаційних витрат або погіршення якості обслуговування.

Запропонований у даній роботі метод адаптивного багаторівневого моніторингу та контролю кіберфізичної системи супермаркету ґрунтується на інтеграції різнорідних моделей та підходів, які традиційно застосовуються ізольовано. Його ключовою особливістю є поєднання методів теорії масового обслуговування, динамічних моделей теплообміну та багатокритеріальної оптимізації в єдиній концептуальній і алгоритмічній структурі. Такий підхід дозволяє перейти від локального управління окремими підсистемами до цілісного контролю функціонування супермаркету як складної кіберфізичної системи.

У межах запропонованого методу супермаркет розглядається як багаторівнева система, в якій фізичні процеси (потоки покупців, теплові режими, товарообіг) тісно пов'язані з кібернетичними процесами збору даних, обробки інформації та прийняття рішень. Багаторівневність методу полягає у тому, що моніторинг і контроль здійснюються одночасно на декількох рівнях абстракції: на рівні окремих фізичних параметрів, на рівні підсистем та на рівні інтегрального стану всієї системи. Це дозволяє враховувати як локальні зміни, так і глобальні тенденції у функціонуванні супермаркету.

Основою методу є використання єдиного моніторингового стану  $M(t)$ , який слугує узагальненим інформаційним представленням поточного та прогнозованого стану кіберфізичної системи.

На відміну від класичних підходів, де кожна підсистема обробляється окремо, у запропонованому методі всі сенсорні дані, незалежно від їх фізичної природи, агрегуються в єдиний моніторинговий простір. Моніторинговий стан формується шляхом об'єднання поточних вимірювань, історичних даних та результатів прогнозування, що дозволяє зменшити вплив шумів, неповноти та затримок у даних.

Єдиний моніторинговий стан виконує роль інформаційного ядра методу, на основі якого формуються всі керуючі рішення. Такий підхід забезпечує узгодженість між підсистемами супермаркету, оскільки рішення щодо регулювання освітлення, роботи кас або температурних режимів приймаються не ізольовано, а з урахуванням загального стану системи. Це особливо важливо в умовах високої динаміки та невизначеності, характерних для роздрібної торгівлі.

Важливою складовою новизни методу є поєднання реального та прогнозного моніторингу. Реальний моніторинг забезпечує відображення поточного стану супермаркету на основі сенсорних даних у режимі реального часу. Прогнозний моніторинг, у свою чергу, дозволяє оцінити ймовірні зміни стану системи у найближчому майбутньому, зокрема очікуване зростання потоку покупців або зміну температурних навантажень. Інтеграція цих двох підходів створює основу для проактивного управління, за якого керуючі впливи формуються не лише як реакція на вже наявні відхилення, але й з урахуванням майбутніх сценаріїв розвитку системи.

У класичних системах масового обслуговування (СМО) основний фокус зосереджений на математичному описі потоків клієнтів, часу обслуговування та ймовірності утворення черг. Такі моделі зазвичай припускають стаціонарність потоків, гомогенність клієнтів та фіксовані параметри обслуговування. Рішення про оптимізацію, як правило, обмежуються вибором кількості каналів обслуговування або регулюванням інтенсивності персоналу для зменшення часу очікування чи вартості обслуговування. Хоча СМО добре працюють у стандартних і контрольованих умовах, вони не враховують складну динаміку реальних фізичних процесів, змінні зовнішні фактори та взаємодію різних підсистем.

Запропонований у магістерській роботі підхід суттєво розширює концепцію СМО, інтегруючи її в кіберфізичну систему супермаркету. По-перше, модель потоків покупців не існує окремо, а є частиною замкненого контуру моніторингу та контролю, який враховує не лише кількість людей у черзі, а й їхні траєкторії, зони активності та взаємодію з іншими підсистемами (освітлення, клімат-контроль, електронні цінники).

По-друге, у відміну від традиційної СМО, де параметри обслуговування ( $\mu$ ) та інтенсивності потоку ( $\lambda$ ) вважаються статичними або заданими експериментально, у запропонованому підході вони динамічно оновлюються на основі реальних та прогнозних даних, що надходять від сенсорів та систем комп'ютерного зору. Це дозволяє системі адаптуватися до пікових навантажень, сезонних коливань та непередбачуваних подій у режимі реального часу.

По-третє, традиційні СМО не враховують взаємозв'язок між ефективністю обслуговування та іншими критеріями, такими як енергоспоживання, комфорт покупців або стан обладнання. Запропонований метод реалізує багатокритеріальну цільову функцію, що дозволяє оптимізувати роботу супермаркету комплексно, а не лише з точки зору часу очікування в черзі. Завдяки інтеграції потоків покупців у єдиний моніторинговий стан  $M(t)$  система може формувати керуючі впливи на всі підсистеми одночасно, забезпечуючи синхронізацію дій та підвищуючи загальну ефективність.

Запропонований підхід включає прогнозний компонент, який відсутній у класичних СМО. Це дозволяє системі не лише реагувати на поточну ситуацію, а й передбачати зміни в потоках покупців, температуру та стан обладнання, формуючи превентивні дії. Такий інтегрований, адаптивний та прогнозний підхід робить систему більш стійкою до невизначеності та зашумлених даних, що значно перевищує можливості стандартних математичних моделей обслуговування.

В таблиці 3.1 наведені основні відмінності класичного підходу з використанням СМО та запропонованого підходу.

Таблиця 3.1 – Порівняння класичних СМО та адаптивного підходу

Параметр / Характеристика	Класичні СМО	Адаптивна КФС супермаркету
Модель потоків клієнтів	Статичні або стаціонарні потоки, однорідні клієнти	Динамічні потоки з урахуванням індивідуальних траєкторій та зон активності
Параметри обслуговування ( $\mu, \lambda$ )	Фіксовані або задані експериментально	Динамічно оновлюються на основі сенсорних даних та прогнозу
Наявність прогнозу	Відсутній	Прогнозний моніторинг для випереджального керування
Критерії оптимізації	Мінімізація часу очікування, вартості обслуговування	Багатокритеріальна цільова функція: час очікування, енергоефективність, комфорт, стан обладнання
Інтеграція з іншими підсистемами	Відсутня, модель ізольована	Повна інтеграція з освітленням, клімат-контролем, електронними цінниками, холодильним обладнанням
Адаптивність	Обмежена: налаштування каналів або кількості кас	Висока: система адаптує керуючі впливи в реальному часі залежно від стану та прогнозу
Реакція на невизначеність та шум даних	Мінімальна, моделі слабо стійкі до змін	Використання фільтрації, агрегації та прогнозування; компенсує неповні та зашумлені дані
Формування керуючих впливів	Немає або дуже просте (регулювання каналів)	Генерація керуючих впливів для всіх підсистем через єдиний моніторинговий стан $M(t)$

Кінець табл.3.1

Параметр / Характеристика	Класичні СМО	Адаптивна КФС супермаркету
Ціль системи	Зменшення черг та часу очікування	Комплексна ефективність супермаркету: обслуговування, енергія, комфорт, стабільність роботи

### 3.2 Концепція реального та прогнозного моніторингу

У межах запропонованого методу адаптивного багаторівневого моніторингу ключову роль відіграє поєднання реального та прогнозного моніторингу, яке забезпечує повноту, своєчасність та інформативність оцінки стану кіберфізичної системи супермаркету. Такий підхід дозволяє перейти від реактивного управління, заснованого лише на фіксації поточних відхилень, до проактивного контролю, орієнтованого на випередження небажаних режимів функціонування системи.

Реальний моніторинг у кіберфізичній системі супермаркету базується на безперервному зборі сенсорних даних, що відображають поточний фізичний стан об'єкта. До таких даних належать показники трафіку покупців у торговому залі, температура у холодильних і складських зонах, рівень освітлення, стан касових вузлів та наявність товарів на полицях. Ці дані надходять у систему з різною частотою та точністю, що зумовлює необхідність їх попередньої обробки, синхронізації та фільтрації. Реальний моніторинг забезпечує актуальну картину функціонування супермаркету у даний момент часу та дозволяє оперативно виявляти відхилення від нормативних або бажаних режимів.

Водночас використання лише реального моніторингу має низку обмежень, пов'язаних із запізненням реакції системи на швидкі зміни умов функціонування. Наприклад, різке зростання потоку покупців може бути зафіксоване лише після формування черг на касах, а порушення температурного режиму після досягнення

критичних значень. У таких випадках керуючі впливи формуються вже після виникнення проблемної ситуації, що негативно позначається на якості обслуговування або енергоефективності. Саме ці обмеження зумовлюють необхідність доповнення реального моніторингу прогнозними механізмами.

Прогнозний моніторинг у запропонованому методі спрямований на оцінку майбутнього стану кіберфізичної системи на основі аналізу поточних і історичних даних. Його завданням є виявлення тенденцій та закономірностей у зміні параметрів системи, що дозволяє передбачати розвиток подій у найближчій часовій перспективі. У контексті супермаркету прогнозний моніторинг охоплює, зокрема, прогнозування інтенсивності потоків покупців, теплових навантажень на холодильне обладнання та динаміки споживання енергоресурсів.

Прогнозування потоків покупців ґрунтується на використанні моделей теорії масового обслуговування та аналізу часових рядів. Інтенсивність надходження покупців розглядається як випадковий процес, параметри якого змінюються залежно від часу доби, дня тижня та сезонних факторів. Прогнозний моніторинг дозволяє оцінити ймовірне навантаження на касові вузли до того, як воно фактично виникне, що створює умови для завчасного відкриття додаткових кас або перерозподілу персоналу.

Аналогічно, прогнозний моніторинг температурних режимів базується на динамічних моделях теплообміну, які враховують як внутрішні, так і зовнішні фактори. До внутрішніх факторів належать теплові навантаження від обладнання та присутності покупців, а до зовнішніх – температура навколишнього середовища та кліматичні умови. Прогноз температури дозволяє завчасно коригувати режими роботи холодильного обладнання, уникаючи перевитрат енергії або порушень умов зберігання продуктів.

Використання комбінованого підходу до моніторингу суттєво підвищує адаптивність кіберфізичної системи супермаркету. Система здатна не лише реагувати на вже сформовані проблемні ситуації, але й запобігати їх виникненню шляхом завчасного коригування керуючих впливів. Такий підхід особливо важливий в умовах високої варіабельності поведінки покупців та зовнішніх

факторів, характерних для роздрібної торгівлі.

Крім того, поєднання реального та прогнозного моніторингу створює основу для гнучкого налаштування пріоритетів у багатокритеріальній цільовій функції. У разі очікуваного зростання навантаження система може підвищувати вагу критеріїв якості обслуговування, тоді як за стабільних або низьких навантажень, орієнтуватися на мінімізацію енергоспоживання. Прогнозний моніторинг відіграє ключову роль у формуванні адаптивних стратегій керування.

Реальний та прогнозний моніторинг у запропонованому методі не є окремими або альтернативними підходами, а виступають взаємодоповнюючими складовими єдиної системи оцінки стану. Їх інтеграція забезпечує підвищення точності, своєчасності та ефективності прийняття керуючих рішень, що є необхідною умовою для функціонування супермаркету як сучасної кіберфізичної системи.

### 3.3 Трирівнева структура обробки даних у кіберфізичній системі супермаркету

Функціонування кіберфізичної системи супермаркету ґрунтується на безперервному зборі, передачі та аналізі великої кількості різнорідних даних, що надходять із фізичного середовища в режимі реального часу. Ці дані характеризуються високою динамічністю, просторовою розподіленістю та стохастичною природою, що унеможлиблює їх ефективну обробку в межах єдиного централізованого рівня. Крім того, вимоги до мінімізації затримок, підвищення надійності та зменшення навантаження на канали зв'язку зумовлюють необхідність розподілу обчислювальних функцій між різними рівнями системи.

У зв'язку з цим, у роботі застосовується трирівнева структура обробки даних, яка поєднує локальний, проміжний та централізований рівні аналізу інформації (рисунок 3.1).

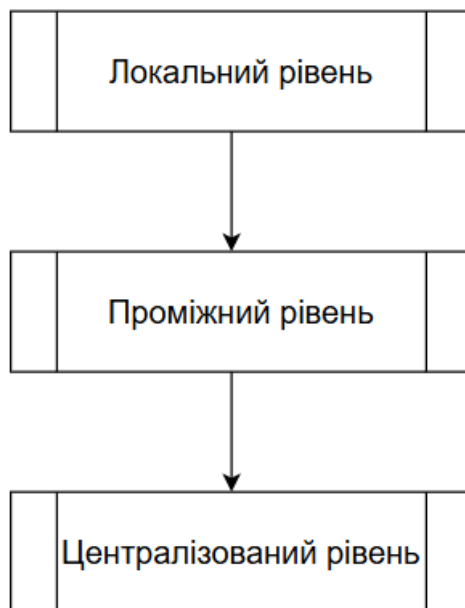


Рисунок 3.1 – Трирівнева структура обробки даних у кіберфізичній системі супермаркету

Такий підхід дозволяє здійснювати первинну обробку та фільтрацію даних безпосередньо поблизу джерел їх формування, виконувати інтеграцію та узагальнення інформації на рівні підсистем, а також реалізовувати довгострокове прогнозування й адаптивне формування керуючих впливів на верхньому рівні. Трирівнева архітектура забезпечує узгоджену взаємодію фізичного та кібернетичного просторів і є основою для реалізації замкненого контуру моніторингу та контролю кіберфізичної системи супермаркету.

Сенсорна підсистема є первинним рівнем збору даних і базою для всього циклу моніторингу та контролю. До неї входять: камери спостереження, що фіксують присутність та переміщення покупців у торговому залі; температурні та вологостійкі датчики у холодильних та морозильних відділах; освітлювальні датчики для контролю рівня освітленості; електронні цінники (ESL), які надають інформацію про актуальні ціни та акції; а також касові вузли, що дозволяють оцінювати швидкість обслуговування та завантаженість персоналу.

Основною функцією сенсорної підсистеми є збір та первинна обробка даних. На цьому рівні здійснюється фільтрація шумів, усунення випадкових сплесків і аномальних показників, а також нормалізація даних для подальшої обробки. Наприклад, камери можуть передавати лише координати покупців і їхній напрямок руху, а не весь відеопотік, що значно зменшує навантаження на систему та забезпечує швидку реакцію. Завдяки цій підготовці дані стають достовірними, структурованими та готовими для агрегації на наступному рівні.

На проміжному рівні відбувається узгодження та інтеграція даних з різних сенсорів. Це дозволяє отримати цілісну картину стану окремих зон і підсистем супермаркету, уникнувши дублювання інформації (наприклад, одна людина, зафіксована кількома камерами, враховується один раз). Тут також реалізується кореляція подій між різними підсистемами: активність покупців у певній зоні, зміни температури або освітлення, стан обладнання та інформаційні повідомлення на ESL формують комплексну оцінку поточного стану.

Проміжний рівень забезпечує передобробку для високого рівня, формує узагальнені показники та оцінки, які використовуються для визначення тенденцій, виявлення потенційних проблем і підготовки прогнозів. Цей рівень є критичним для підтримки замкненого циклу контролю, оскільки дозволяє об'єднати різноманітні дані у єдине, структуроване представлення системи.

Високий рівень відповідає за аналіз та прогнозування розвитку подій у супермаркеті та формування керуючих впливів. На цьому рівні система використовує історичні дані та поточні спостереження для оцінки майбутніх змін потоків покупців, навантаження на касові вузли, енергоспоживання, освітленість та температурні режими.

Важливим компонентом високого рівня є поєднання реального та прогнозного моніторингу. Реальний моніторинг відображає поточний стан фізичного середовища та підсистем, тоді як прогнозний моніторинг дозволяє оцінювати розвиток процесів на майбутньому часовому горизонті. У разі підвищеної невизначеності система автоматично підвищує вагу прогнозової

складової при формуванні керуючих впливів, забезпечуючи стабільність роботи та збереження якості обслуговування.

На цьому рівні здійснюється багатокритеріальна оцінка ефективності системи, що враховує енерговитрати, комфорт покупців, стабільність функціонування обладнання та бізнес-показники. Керуючі впливи формуються у вигляді адаптивних команд для регулювання освітлення, клімат-контролю, роботи кас, оновлення інформації на ESL та перенаправлення персоналу.

Система працює за принципом замкненого циклу, де результати керуючих впливів повертаються на вхід як нові дані для уточнення моніторингового стану. Це забезпечує постійну адаптацію алгоритмів до змін у навантаженні, поведінці покупців та зовнішніх умовах, підвищує точність прогнозів і стабільність роботи всіх підсистем супермаркету.

### 3.4 Метод адаптивного багаторівневого моніторингу та контролю супермаркету

Адаптивний багаторівневий метод моніторингу та контролю кіберфізичної системи супермаркету передбачає інтеграцію всіх підсистем об'єкта в єдиний цикл спостереження, аналізу та керування. Основна ідея полягає у тому, що всі дані з сенсорів, камер, електронних цінників, кліматичного обладнання та касових вузлів збираються, обробляються та інтерпретуються в єдиному моніторинговому представленні. Це дозволяє отримати актуальну картину стану супермаркету та формувати керуючі впливи не тільки на основі поточних спостережень, але й з урахуванням прогнозованих змін.

Метод включає кілька рівнів обробки даних.

На первинному рівні здійснюється збір і фільтрація сирих даних. Наприклад, відеопотік із камер аналізується в реальному часі для визначення кількості покупців у різних зонах, а дані з датчиків температури, освітлення та вологості проходять нормалізацію для усунення шумів і аномалій. На цьому етапі

відсікається надлишкова інформація, а ключові параметри передаються на наступний рівень.

На середньому рівні відбувається агрегація та узгодження даних із різних джерел. Це дозволяє уникнути дублювання інформації (наприклад, одна людина, що одночасно потрапляє в поле дії кількох камер, враховується лише один раз) і створює єдину картину стану для кожної зони супермаркету. Тут також здійснюється кореляція подій між різними підсистемами: зміна температури у холодильнику, активність відвідувачів у суміжному відділі та рівень освітленості об'єднуються у загальну оцінку стану.

На високому рівні здійснюється формування прогнозів і управлінських рішень. Система аналізує історичні дані та поточні тенденції, щоб передбачати майбутній розвиток подій, наприклад, зростання потоку покупців у певний відділ або збільшення навантаження на каси. Ця інформація використовується для адаптивного формування керуючих впливів: регулювання освітлення та температури, оптимізація роботи кас, оновлення інформації на електронних щитках та перенаправлення персоналу.

Особливість методу полягає в поєднанні реального та прогнозного моніторингу. Реальний моніторинг забезпечує відображення поточного стану об'єкта, тоді як прогнозний моніторинг дозволяє оцінювати майбутні зміни та зменшувати ризики, пов'язані з непередбачуваними коливаннями потоків відвідувачів або зовнішніми факторами. У разі підвищеної невизначеності система автоматично підвищує вагу прогнозової складової при формуванні керуючих впливів, забезпечуючи стабільність роботи супермаркету та збереження якості обслуговування.

Метод базується на єдиному моніторинговому стані, який інтегрує інформацію про всі підсистеми. Це дозволяє формувати узгоджені дії на основі багатокритеріальної оцінки ефективності, де враховуються енерговитрати, комфорт покупців, стабільність функціонування обладнання та бізнес-показники. Завдяки адаптивному підходу система здатна самостійно регулювати пріоритети керуючих впливів залежно від поточної ситуації та прогнозів.

Важливим компонентом є замкнений контур управління, у якому результати дій системи постійно оцінюються та повертаються на вхід для уточнення моніторингового стану. Це дозволяє поступово підвищувати точність прогнозів, оптимізувати ресурси та забезпечувати стійке функціонування супермаркету навіть за умов невизначеності та зашумлених даних.

Запропонований метод адаптивного багаторівневого моніторингу та контролю супермаркету реалізується у вигляді послідовності взаємопов'язаних алгоритмічних кроків, що забезпечують інтеграцію реального та прогнозного моніторингу, формування єдиного моніторингового стану та адаптивне керування. Загальна логіка роботи методу включає такі основні етапи:

1. Збір даних із сенсорних підсистем таких, як трафік покупців, температура в холодильних і складських зонах, рівень освітлення, наявність товарів на полицях та стан касових вузлів.
2. Обробка та фільтрація даних для усунення шумів, аномалій та затримок, що забезпечує отримання надійного оціненого стану.
3. Прогнозування стану на майбутній горизонт часу  $\Delta t$  на основі моделей потоків покупців та динаміки теплообміну, що формує прогнозний стан.
4. Формування єдиного моніторингового стану  $M(t)$ , який інтегрує реальні та прогнозні дані для всіх підсистем.
5. Адаптивне формування вагових коефіцієнтів для багатокритеріальної цільової функції залежно від прогнозного навантаження та поточного режиму супермаркету.
6. Прийняття керуючих рішень на основі оптимізації цільової функції та поширення керуючих впливів на підсистеми (освітлення, робота кас, ESL, температурний контроль).
7. Повторна оцінка стану у режимі реального часу та коригування керування відповідно до змін у середовищі.

Запропонований метод моніторингу й контролю кіберфізичної системи супермаркету передбачає роботу в декількох режимах функціонування, які відображають реальні умови експлуатації торговельного об'єкта. Перехід між

режимами відбувається автоматично на основі аналізу моніторингового стану системи та дозволяє адаптувати алгоритми обробки даних і керування до поточного рівня навантаження, невизначеності та ризиків. Виділення режимів нормальної, пікової та аварійної роботи забезпечує гнучкість і стійкість функціонування системи в широкому спектрі експлуатаційних сценаріїв.

Нормальний режим відповідає типовим умовам функціонування супермаркету, за яких інтенсивність потоку покупців, енергоспоживання та завантаженість обладнання перебувають у межах очікуваних значень. У цьому режимі система орієнтована на досягнення збалансованого компромісу між якістю обслуговування та мінімізацією експлуатаційних витрат. Моніторинг здійснюється переважно на основі реальних сенсорних даних із використанням помірної фільтрації та згладжування, що дозволяє зберігати високу чутливість до змін стану.

Керуючі впливи в нормальному режимі формуються з урахуванням довгострокової енергоефективності та комфорту покупців. Освітлення регулюється відповідно до фактичної активності в зонах торгового залу, робота касових вузлів оптимізується на основі середніх показників інтенсивності потоку, а температурні режими підтримуються в економічному діапазоні. Прогнозна складова моніторингу використовується обмежено й виконує допоміжну функцію для виявлення повільних трендів або сезонних змін.

Піковий режим активується в умовах значного зростання інтенсивності потоку покупців, характерного для годин пік, святкових періодів або промоційних заходів. У цьому режимі пріоритети системи зміщуються від енергетичної оптимізації до забезпечення безперебійної роботи та високої якості обслуговування. Моніторинговий стан фіксує швидкі зміни параметрів, що потребує підвищення частоти оновлення даних і зменшення часових вікон агрегації.

Особливу роль у піковому режимі відіграє прогнозний моніторинг, який дозволяє завчасно виявляти наближення критичних навантажень. На основі прогнозу система може превентивно активувати додаткові касові вузли, підвищувати рівень освітлення в зонах зростаючої активності та коригувати

розподіл персоналу. Керуючі алгоритми стають менш інерційними та більш чутливими до змін, навіть за рахунок зростання енергоспоживання. Такий підхід дозволяє уникнути утворення черг, зниження комфорту покупців і втрат доходу.

Аварійний режим призначений для роботи в умовах суттєвих відхилень або відмов, які можуть загрожувати стабільності функціонування супермаркету. До таких ситуацій належать відмови сенсорів або виконавчих пристроїв, різке зростання невизначеності в даних, критичні температурні відхилення, перебої в електропостачанні або аномальна поведінка потоків покупців. Перехід у аварійний режим відбувається автоматично у разі перевищення заданих порогів невизначеності або втрати достовірності моніторингового стану.

У цьому режимі система знижує залежність від поточних вимірювань і переходить до використання оцінених і прогнозних значень параметрів. Керуючі впливи формуються за принципом забезпечення безпеки та мінімізації ризиків, навіть якщо це призводить до зниження енергоефективності або комфорту. Наприклад, у разі відмови температурних датчиків система може підтримувати консервативний режим охолодження, а за втрати даних про трафік використовувати історичні сценарії навантаження.

Особливості та переваги методу полягають в тому, що циклічність та інтеграція реального й прогнозного моніторингу дозволяє запобігати проблемам до їх фактичного виникнення.

Адаптивне формування вагових коефіцієнтів забезпечує баланс між якістю обслуговування та енергоефективністю залежно від поточного та прогнозованого стану. Єдиний моніторинговий стан  $M(t)$  інтегрує дані всіх підсистем, що дозволяє уникати конфліктів у керуванні.

Метод легко масштабований та може враховувати нові сенсори, підсистеми та критерії ефективності без зміни основної структури.

Важливою перевагою запропонованого методу є автоматичне та плавне перемикання між режимами роботи без втручання оператора. Рішення про зміну режиму приймається на основі аналізу моніторингового стану, рівня невизначеності та прогнозних оцінок. Такий підхід дозволяє уникнути різких змін

керуючих впливів і забезпечує стійкість системи в умовах швидкоплинних змін середовища.

Розподіл методу моніторингу й контролю на нормальний, піковий та аварійний режими забезпечує його практичну придатність для реальних умов експлуатації супермаркету. Це дозволяє системі адаптуватися до змін навантаження, зберігати стабільність у кризових ситуаціях і підтримувати ефективність функціонування впродовж усього життєвого циклу об'єкта.

Запропонований метод моніторингу й контролю реалізується у вигляді режимно-орієнтованої структури керування, де функціонування кіберфізичної системи супермаркету описується як послідовність переходів між нормальним, піковим та аварійним режимами. Перехід між режимами ініціюється на основі оцінки моніторингового стану, який узагальнює інформацію про інтенсивність потоків відвідувачів, рівень навантаження на підсистеми, енергетичні показники та достовірність сенсорних даних.

Нормальний режим є базовим станом системи та відповідає умовам стабільної роботи з передбачуваним навантаженням. Перехід до пікового режиму відбувається у разі виявлення стійкого зростання інтенсивності потоків покупців або прогнозованого перевищення допустимих рівнів завантаження касових вузлів і торговельних зон. Водночас система може повернутися до нормального режиму після зниження навантаження та стабілізації показників.

Аварійний режим активується у випадках різкого зростання невизначеності, втрати або деградації сенсорних даних, відмов виконавчих пристроїв чи виникнення критичних зовнішніх впливів. Після усунення причин аварійного стану система не повертається одразу до пікового режиму, а спочатку переходить у нормальний режим для повторної оцінки стану та перевірки стабільності функціонування.

Алгоритм функціонування методу наведений на рисунку 3.2.

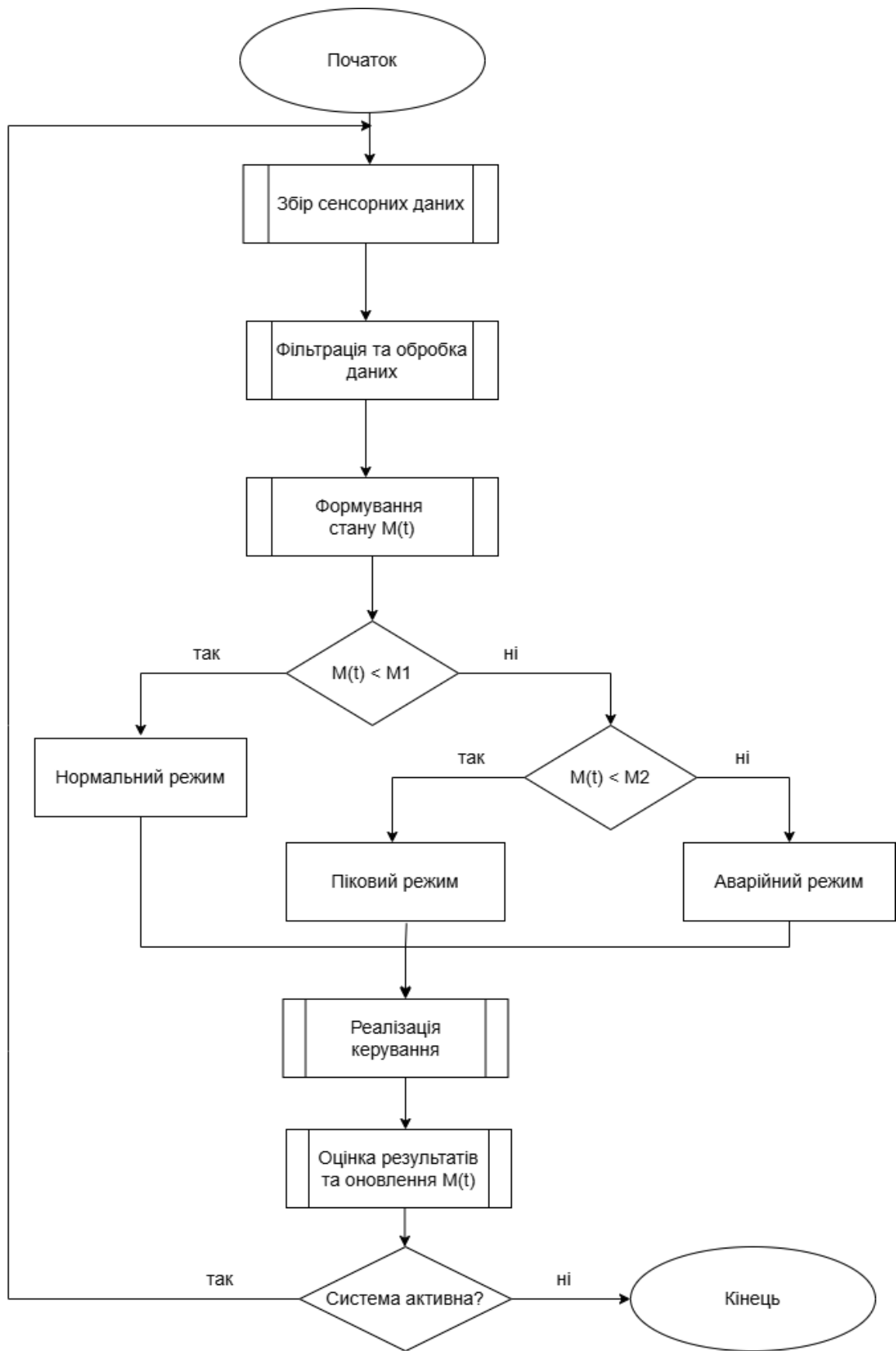


Рисунок 3.2 – Алгоритм функціонування методу

### 3.5 Обробка невизначеності та зашумлених даних

Однією з характерних особливостей кіберфізичних систем є наявність невизначеності та зашумленості даних, що надходять від сенсорних пристроїв. Причинами цього можуть бути технічні обмеження сенсорів, зовнішні впливи, затримки передачі інформації або помилки вимірювання.

У контексті супермаркету такі фактори можуть проявлятися у вигляді неточностей у підрахунку кількості покупців, коливань показників температури або нестабільності сигналів від сенсорних пристроїв.

Для забезпечення надійності роботи системи в умовах невизначеності необхідно використовувати спеціальні методи обробки даних. У межах запропонованого методу застосовується комбінований підхід, який поєднує статистичну фільтрацію, агрегацію даних та використання історичних спостережень.

Фільтрація даних дозволяє зменшити вплив випадкових шумів і короткочасних аномалій. Для цього можуть використовуватися алгоритми згладжування, які враховують попередні значення параметрів та формують більш стабільну оцінку стану системи.

Агрегація даних передбачає об'єднання інформації, отриманої від декількох сенсорів, що вимірюють однакові або близькі параметри. Наприклад, інформація про температуру може надходити з декількох датчиків, розташованих у різних точках холодильного обладнання. Об'єднання цих даних дозволяє отримати більш точну оцінку реального температурного режиму.

Використання історичних даних дозволяє системі визначати типові закономірності зміни параметрів і виявляти відхилення від нормальної поведінки. Це особливо важливо для виявлення аномальних ситуацій, які можуть свідчити про несправність обладнання або інші проблеми у функціонуванні системи.

Завдяки поєднанню зазначених методів система здатна підтримувати стабільну роботу навіть у випадку часткової втрати або спотворення даних.

У процесі функціонування кіберфізичної системи супермаркету важливим

аспектом є забезпечення коректної роботи методу моніторингу в умовах наявності невизначеності та зашумленості вхідних даних. Джерелами таких спотворень можуть бути неточності вимірювань сенсорів, затримки передавання даних у мережі, часткові втрати інформації, а також вплив зовнішніх факторів, що не враховуються безпосередньо моделлю системи. У зв'язку з цим необхідним є застосування методів попередньої обробки даних, спрямованих на підвищення достовірності інформації, що надходить до модулів аналізу та прийняття рішень.

Для зменшення впливу випадкових перешкод у сенсорних даних можуть застосовуватися різні методи фільтрації, зокрема ковзне середнє, медіанна фільтрація або інші статистичні підходи до згладжування часових рядів. Використання таких методів дозволяє знизити рівень шуму в даних, отриманих від датчиків температури, освітленості, лічильників відвідувачів та інших елементів інфраструктури супермаркету. У результаті формується більш стабільна та репрезентативна інформаційна основа для подальшого аналізу стану системи.

Крім того, у випадках втрати або часткової відсутності даних доцільним є використання методів відновлення інформації на основі історичних значень або прогнозних оцінок. Наприклад, значення певного параметра можуть бути апроксимовані на основі попередніх спостережень або середніх значень за визначений часовий інтервал. Такий підхід дозволяє підтримувати безперервність функціонування алгоритмів моніторингу навіть за умов тимчасових збоїв у роботі сенсорної інфраструктури.

Застосування методів обробки невизначеності та зашумлених даних підвищує надійність функціонування запропонованого методу моніторингу та контролю кіберфізичної системи супермаркету. Це забезпечує більш точне визначення поточного стану системи  $M(t)$  та підвищує ефективність формування керуючих впливів у різних режимах її роботи.

Додатково можна зазначити, що врахування невизначеності даних сприяє підвищенню стійкості системи до зовнішніх впливів та забезпечує більш стабільне функціонування алгоритмів адаптивного моніторингу в реальних умовах експлуатації.

### 3.6 Масштабованість та інтеграція методу

Однією з важливих вимог до сучасних кіберфізичних систем є можливість їх подальшого розвитку та розширення без суттєвих змін базової архітектури. У зв'язку з цим запропонований метод моніторингу та контролю розроблений з урахуванням принципів масштабованості та модульності.

Масштабованість системи означає можливість додавання нових сенсорів, підсистем або функціональних модулів без порушення роботи існуючих компонентів. Це особливо важливо для великих торговельних мереж, де супермаркети можуть мати різну площу, кількість відділів і рівень автоматизації.

Модульна структура методу дозволяє інтегрувати нові компоненти шляхом підключення додаткових джерел даних до системи моніторингу. Наприклад, у майбутньому система може бути доповнена сенсорами якості повітря, системами аналізу поведінки покупців або інтелектуальними системами управління запасами.

Ще одним важливим аспектом є можливість інтеграції запропонованого методу з іншими інформаційними системами підприємства. До таких систем належать:

- системи управління ресурсами підприємства;
- системи управління складом;
- системи аналізу продажів;
- системи енергоменеджменту.

Інтеграція з такими системами дозволить використовувати результати моніторингу для прийняття стратегічних управлінських рішень.

Крім того, використання стандартних протоколів передачі даних забезпечить сумісність системи з сучасними технологіями Інтернету речей. Запропонований метод може бути використаний не лише для окремого супермаркету, але й для управління цілою мережею торговельних об'єктів, що значно підвищує його практичну цінність.

### 3.7 Висновки

У даному розділі було запропоновано метод моніторингу та контролю кіберфізичної системи супермаркету, який базується на інтеграції даних від різних сенсорних підсистем та їх подальшому аналізі для формування керуючих впливів. Запропонований підхід передбачає безперервний збір, обробку та аналіз інформації про стан об'єкта, що дозволяє забезпечити ефективне функціонування системи в умовах змінного навантаження. Метод має циклічний характер та передбачає використання механізму вибору режиму роботи системи залежно від поточного рівня навантаження та значення інтегрального показника стану  $M(t)$ .

Також було побудовано блок-схему алгоритму, що відображає логіку взаємодії між основними етапами обробки інформації та реалізації керуючих впливів. Запропонована структура алгоритму дозволяє адаптувати роботу підсистем супермаркету, зокрема систем освітлення, касових вузлів та інших елементів інфраструктури, відповідно до поточного режиму функціонування.

Окрему увагу було приділено питанням обробки невизначеності та зашумлених даних, що є характерними для реальних сенсорних систем. Запропоновано використання методів фільтрації та відновлення даних, які дозволяють підвищити достовірність інформації, що надходить до системи моніторингу, та забезпечити стабільність роботи алгоритмів аналізу.

Розроблений метод моніторингу та контролю створює основу для побудови ефективної системи управління кіберфізичною інфраструктурою супермаркету. Отримані результати можуть бути використані для подальшої оцінки ефективності запропонованого підходу, що розглядається у наступному розділі роботи.

## **4 КІБЕРФІЗИЧНА СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ ТА КОНТРОЛЮ ФУНКЦІОНУВАННЯ СУПЕРМАРКЕТУ**

### **4.1 Вибір типу архітектури та шаблонів проектування**

Одним із важливих етапів розроблення системи моніторингу та контролю інфраструктури супермаркету є вибір відповідного типу архітектури програмного забезпечення та зразків проектування. Від правильності такого вибору значною мірою залежить ефективність функціонування системи, її масштабованість, гнучкість та можливість подальшого розширення.

З огляду на специфіку кіберфізичних систем, що поєднують фізичні об'єкти, сенсорні пристрої та програмні компоненти обробки даних, доцільним є використання багаторівневої архітектури, яка забезпечує розподіл функціональних компонентів системи між різними рівнями. Такий підхід дозволяє відокремити процеси збору даних, їх обробки та прийняття керуючих рішень, що підвищує модульність системи та спрощує її супровід.

У межах запропонованого підходу архітектура системи включає декілька основних рівнів. Перший рівень становить рівень фізичних пристроїв, до якого належать сенсори, камери спостереження, датчики температури, освітленості та інші елементи інфраструктури супермаркету. Ці пристрої здійснюють безпосередній збір інформації про стан середовища та передають відповідні дані до системи обробки.

Наступним є рівень обробки та інтеграції даних, на якому виконується попередня обробка отриманої інформації, фільтрація зашумлених даних, а також інтеграція інформаційних потоків від різних джерел. На цьому рівні формується узагальнений моніторинговий стан системи, який використовується для подальшого аналізу.

Третій рівень архітектури становить рівень аналітики та прийняття рішень, де реалізуються алгоритми адаптивного моніторингу, аналізу стану системи та формування керуючих впливів. Саме на цьому рівні відбувається визначення режиму функціонування системи та вибір відповідних стратегій управління.

Крім вибору загального типу архітектури, важливим аспектом є використання відповідних шаблонів проектування, які дозволяють ефективно організувати взаємодію між компонентами системи. Зокрема, для реалізації механізмів обміну даними між сенсорними підсистемами та модулями обробки інформації доцільно застосовувати шаблон проектування Спостерігач, який забезпечує автоматичне повідомлення компонентів системи про зміну стану певних об'єктів. Шаблон проектування Спостерігач використовується для організації механізму оповіщення компонентів системи про зміну стану об'єктів. У контексті кіберфізичної системи супермаркету цей підхід дозволяє сенсорним пристроям передавати інформацію про зміни параметрів середовища, таких як температура, рівень освітлення або інтенсивність потоку покупців, безпосередньо до модуля моніторингу. У разі зміни відповідного параметра система автоматично генерує повідомлення, яке передається до компонентів обробки даних. Такий підхід забезпечує своєчасну реакцію системи на події, що відбуваються у фізичному середовищі.

Для організації доступу до даних сенсорних пристроїв та забезпечення єдиного інтерфейсу взаємодії з різними типами обладнання може використовуватися шаблон проектування Адаптер, який дозволяє інтегрувати пристрої з різними протоколами обміну даними у єдину систему моніторингу. Шаблон Адаптер використовується для забезпечення сумісності між різними компонентами системи, які можуть використовувати різні інтерфейси або протоколи обміну даними. У сучасних супермаркетах сенсорна інфраструктура часто включає обладнання різних виробників, яке може відрізнятися за способом передавання інформації. Використання адаптерів дозволяє створити єдиний інтерфейс взаємодії між такими пристроями та центральною системою моніторингу, що значно спрощує інтеграцію нових елементів у систему.

Крім того, для реалізації централізованого керування окремими підсистемами супермаркету може бути використаний шаблон Facade, що забезпечує спрощений інтерфейс взаємодії між модулями системи управління та різними функціональними компонентами інфраструктури. Шаблон Facade

застосовується для організації спрощеного доступу до складних підсистем інфраструктури супермаркету. У системі управління можуть існувати окремі модулі, які відповідають за різні функціональні компоненти, наприклад освітлення, кліматичний контроль або керування касовими вузлами. Використання фасаду дозволяє об'єднати ці модулі за допомогою єдиного інтерфейсу, що значно спрощує процес взаємодії між компонентами системи управління та іншими модулями програмного забезпечення.

Шаблон Singleton використовується для організації централізованого керування певними компонентами системи. У системі моніторингу кіберфізичної інфраструктури супермаркету такий підхід може бути застосований для створення єдиного модуля управління або диспетчеризації, який відповідає за координацію роботи інших компонентів. Використання одного екземпляра такого модуля дозволяє уникнути дублювання функцій управління та забезпечити узгодженість роботи всієї системи.

Шаблон проектування Стратегія використовується для реалізації різних алгоритмів керування залежно від поточного стану системи. У контексті розробленого методу моніторингу цей підхід дозволяє динамічно змінювати алгоритми управління відповідно до режиму функціонування супермаркету. Наприклад, у нормальному режимі система може виконувати оптимізацію енергоспоживання, тоді як у піковому режимі основна увага приділяється забезпеченню швидкого обслуговування покупців. У випадку виникнення аварійних ситуацій система може переходити до спеціальних стратегій керування, спрямованих на підтримання безпечного функціонування інфраструктури.

Використання багаторівневої архітектури у поєднанні з відповідними зразками проектування дозволяє створити гнучку та масштабовану систему моніторингу і контролю кіберфізичної системи супермаркету. Такий підхід забезпечує ефективну інтеграцію різнорідних компонентів системи, підвищує надійність її функціонування та створює передумови для подальшого розвитку та вдосконалення програмного забезпечення.

Перелік використаних шаблонів, їх основних характеристик та приклади використання в системі наведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Шаблони проектування у системі моніторингу кіберфізичної системи супермаркету

Шаблон проектування	Призначення	Приклад використання у системі
Спостерігач	Забезпечує автоматичне сповіщення компонентів системи про зміну стану об'єкта	Передавання повідомлень від сенсорних модулів до системи моніторингу при зміні параметрів середовища
Адаптер	Забезпечує сумісність між компонентами системи з різними інтерфейсами	Інтеграція різних типів сенсорів та пристроїв із єдиною системою збору даних
Facade	Створює спрощений інтерфейс доступу до складної підсистеми	Організація єдиного інтерфейсу керування підсистемами освітлення, касових вузлів та кліматичного контролю
Singleton	Забезпечує існування лише одного екземпляра певного класу	Централізований модуль керування системою моніторингу
Стратегія	Дозволяє змінювати алгоритм поведінки системи залежно від умов	Вибір стратегії керування для нормального, пікового або аварійного режиму

Застосування наведених шаблонів проектування дозволяє підвищити гнучкість та масштабованість програмної архітектури системи. Використання

шаблонів проектування сприяє більш ефективній організації взаємодії між компонентами системи, спрощує процес розроблення програмного забезпечення та забезпечує можливість подальшого розширення функціональності системи моніторингу.

Зокрема, поєднання зразків Спостерігач та Адаптер дозволяє ефективно організувати взаємодію між сенсорними пристроями та модулями обробки даних, що є важливим для функціонування кіберфізичних систем. Використання Facade забезпечує спрощений доступ до складних підсистем інфраструктури супермаркету, тоді як Стратегія дозволяє реалізувати адаптивну зміну алгоритмів керування залежно від поточного режиму роботи системи.

Використання зазначених шаблонів проектування дозволяє підвищити гнучкість та адаптивність програмної архітектури системи моніторингу. Поєднання різних шаблонів забезпечує ефективну взаємодію між програмними компонентами, спрощує процес розроблення та підтримки системи, а також створює передумови для її подальшого розширення та модернізації.

#### 4.2 Розробка архітектури програмного забезпечення моніторингу та контролю функціонування супермаркету

Розробка архітектури програмного забезпечення є одним із ключових етапів створення системи моніторингу та контролю кіберфізичної інфраструктури супермаркету. Архітектура програмної системи визначає структуру її компонентів, принципи їх взаємодії, а також механізми обробки та передавання інформації між різними рівнями системи. Від правильності вибору архітектурних рішень залежить ефективність функціонування програмного забезпечення, його масштабованість, надійність та можливість подальшого розвитку.

У межах даної роботи архітектура програмного забезпечення розробляється з урахуванням особливостей функціонування кіберфізичних систем, які поєднують фізичні пристрої, сенсорні мережі та програмні компоненти обробки інформації.

Такий підхід передбачає інтеграцію різних рівнів системи, починаючи від рівня збору даних і завершуючи рівнем аналітики та прийняття керуючих рішень.

Запропонована архітектура програмного забезпечення включає декілька основних функціональних модулів.

Першим модулем є модуль збору даних, який забезпечує взаємодію із сенсорними пристроями та іншими елементами інфраструктури супермаркету. До таких пристроїв належать датчики температури, освітленості, камери відеоспостереження, лічильники відвідувачів та інші сенсорні елементи. Основним завданням цього модуля є отримання та передавання первинних даних до системи обробки.

Наступним елементом архітектури є модуль попередньої обробки даних, який виконує фільтрацію, нормалізацію та синхронізацію інформації, отриманої від різних джерел. На цьому етапі усуваються можливі помилки вимірювання, зменшується вплив шумів у сенсорних даних та виконується підготовка інформації до подальшого аналізу.

Важливою складовою програмної архітектури є аналітичний модуль, у якому реалізуються алгоритми моніторингу та аналізу стану системи. Саме в цьому модулі відбувається формування інтегрального моніторингового показника стану системи  $M(t)$ , а також визначення режиму її функціонування. На основі отриманих результатів виконується формування відповідних керуючих впливів, спрямованих на оптимізацію роботи інфраструктури супермаркету.

Окрему роль відіграє модуль керування, який відповідає за реалізацію сформованих керуючих рішень. Цей модуль забезпечує взаємодію з різними підсистемами супермаркету, зокрема системами освітлення, кліматичного контролю, касовими вузлами та іншими елементами інфраструктури. Завдяки цьому забезпечується адаптивна зміна режимів функціонування системи відповідно до поточного навантаження.

Крім того, архітектура програмного забезпечення включає модуль зберігання даних, який забезпечує накопичення інформації про параметри функціонування системи та результати її роботи. Збережені дані можуть

використовуватися для подальшого аналізу, прогнозування поведінки системи та оптимізації алгоритмів керування.

Архітектура системи приведена на рисунку 4.1.

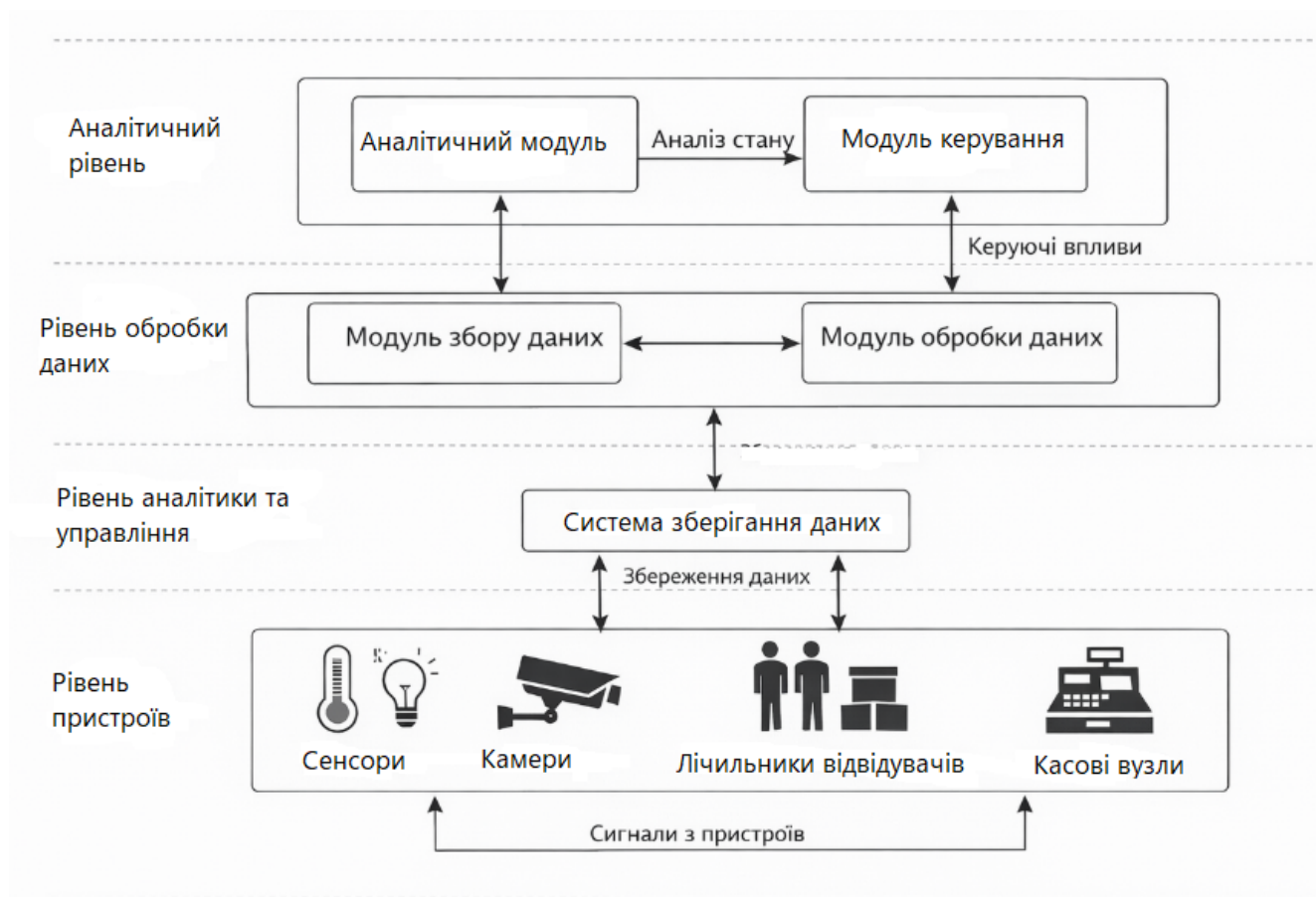


Рисунок 4.1 – Архітектурна схема кіберфізичної системи моніторингу та контролю функціонування супермаркету

Розроблена архітектура програмного забезпечення забезпечує інтеграцію сенсорної інфраструктури, модулів обробки інформації та компонентів керування в єдину систему моніторингу та контролю кіберфізичної системи супермаркету.

Запропонований підхід дозволяє підвищити ефективність обробки інформації, забезпечити адаптивне керування підсистемами об'єкта та створює основу для подальшого розвитку програмного забезпечення системи.

Для забезпечення ефективного функціонування системи моніторингу та контролю кіберфізичної інфраструктури супермаркету програмне забезпечення

було структуровано у вигляді набору взаємопов'язаних модулів. Кожен модуль відповідає за реалізацію певної функціональної частини системи та складається з окремих програмних елементів (рисунок 4.2).

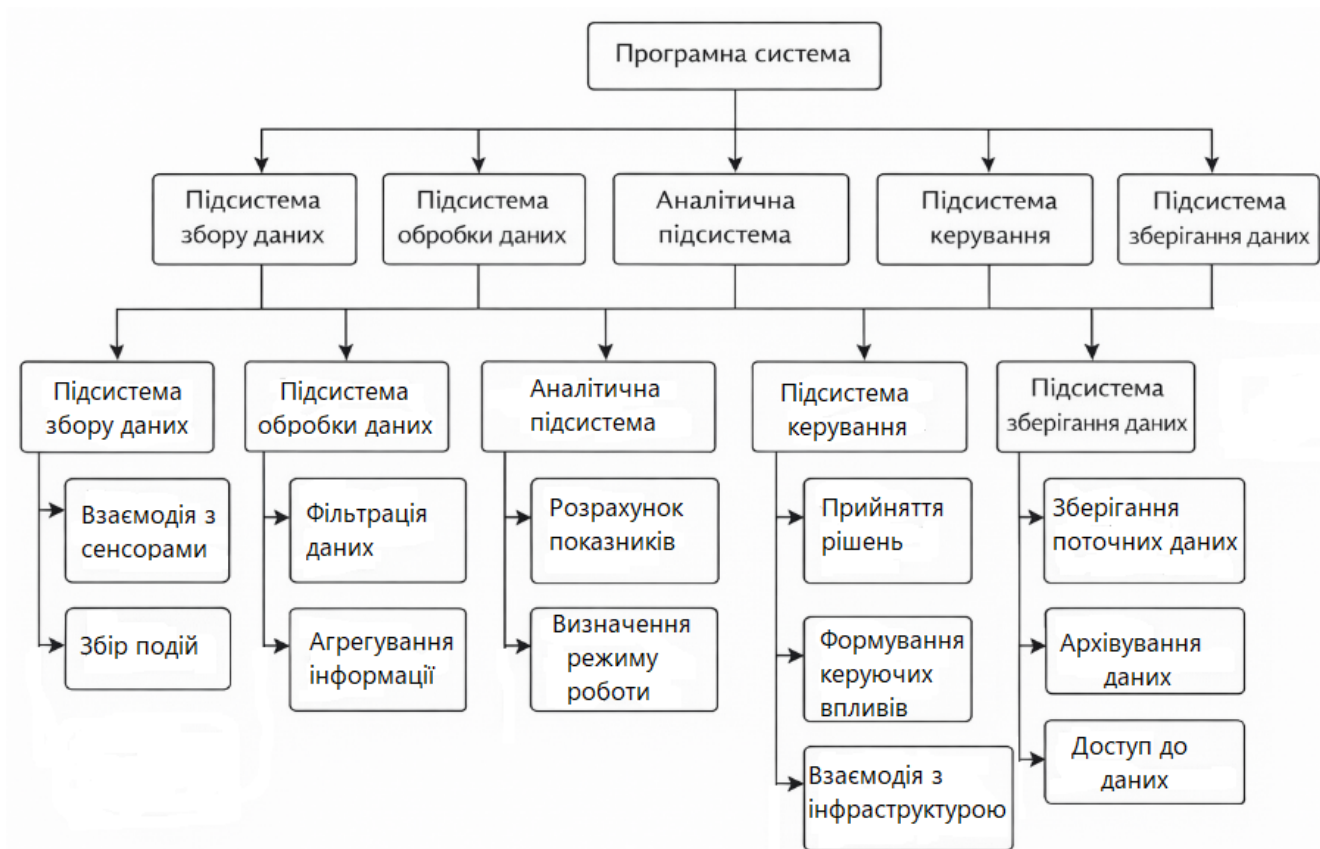


Рисунок 4.2 – Структура програмного забезпечення кіберфізичної системи моніторингу та контролю функціонування супермаркету

Підсистема збору даних забезпечує отримання інформації від сенсорних пристроїв та інших елементів інфраструктури супермаркету. Основною функцією цього модуля є приймання сигналів від фізичних пристроїв та передавання їх до системи обробки. До складу цієї підсистеми входять модулі взаємодії з сенсорами та модуль збору подій. Модуль взаємодії з сенсорами відповідає за підключення до сенсорних пристроїв, отримання показників вимірювання та первинну перевірку коректності отриманих даних. Модуль збору подій фіксує події, що виникають у системі, наприклад появу нових відвідувачів, зміну температурного режиму або активність касових вузлів.

Підсистема обробки даних виконує попередню обробку інформації, отриманої від сенсорних пристроїв. Основним завданням цієї підсистеми є підготовка даних до аналітичної обробки. До складу підсистеми входять модулі фільтрації даних та агрегування інформації. Модуль фільтрації даних виконує усунення шумів та помилок вимірювання, що можуть виникати під час роботи сенсорних пристроїв. Модуль агрегування інформації об'єднує дані з різних джерел у єдині інформаційні структури, що дозволяє отримувати узагальнені показники функціонування системи.

Аналітична підсистема забезпечує аналіз поточного стану кіберфізичної системи супермаркету та формування показників її функціонування. У межах цієї підсистеми реалізуються алгоритми моніторингу, визначення режимів роботи системи та формування аналітичних висновків. До складу підсистеми входять модулі розрахунку показників та визначення режиму роботи. Модуль розрахунку показників виконує обчислення інтегрального показника стану системи та інших характеристик її функціонування. Модуль визначення режиму роботи аналізує поточні параметри системи та визначає режим її функціонування (нормальний, піковий або аварійний).

Модуль керування відповідає за формування керуючих впливів на інфраструктуру супермаркету відповідно до результатів аналітичної обробки даних. До складу підсистеми входять модулі представлені на рисунку 4.3.

Модуль прийняття рішень формує рішення щодо зміни режимів функціонування системи на основі результатів аналізу. Модуль формування керуючих сигналів перетворює прийняті рішення у керуючі команди для підсистем супермаркету. Модуль взаємодії з інфраструктурою. Забезпечує передачу керуючих сигналів до відповідних пристроїв або програмних систем.

Підсистема зберігання даних забезпечує накопичення та збереження інформації про функціонування системи. До її складу входять такі модулі як модуль зберігання поточних даних, модуль архівування даних та модуль доступу до даних.

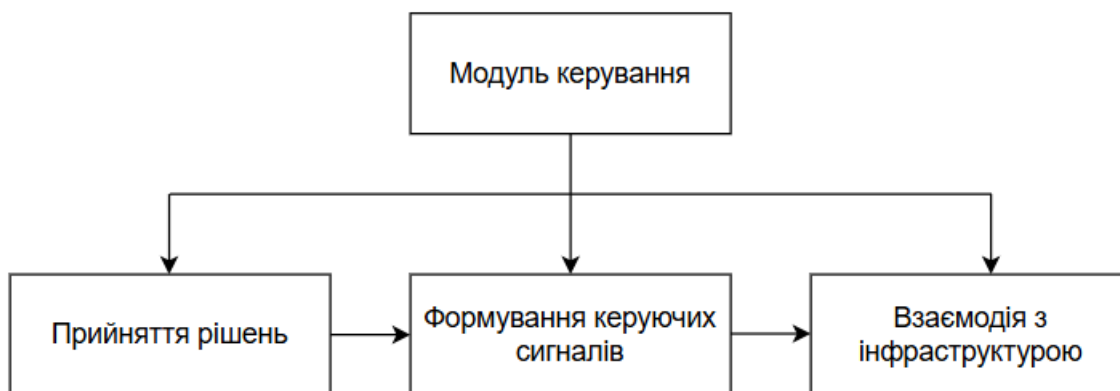


Рисунок 4.3 – Структура модуля керування

Модуль зберігання поточних даних забезпечує збереження актуальної інформації про стан системи. Модуль архівування даних виконує довгострокове зберігання історичних даних. Модуль доступу до даних надає іншим компонентам системи можливість отримувати необхідну інформацію з бази даних.

#### 4.3 Аналіз стійкості та надійності функціонування кіберфізичної системи супермаркету

Важливою характеристикою запропонованої кіберфізичної системи є її здатність зберігати працездатність і ефективність в умовах зовнішніх та внутрішніх збурень. До таких збурень належать різкі зміни потоку покупців, збої в роботі сенсорів, затримки передачі даних, а також деградація обладнання в процесі експлуатації. Тому під час проєктування моделей моніторингу та контролю необхідно враховувати питання стійкості та надійності функціонування системи в цілому.

Стійкість кіберфізичної системи супермаркету досягається завдяки замкненим контурам контролю та наявності зворотного зв'язку між фізичним і кібернетичним просторами. Постійне оновлення моніторингового стану дозволяє системі компенсувати вплив випадкових збурень і коригувати керуючі впливи у разі відхилення параметрів від допустимих значень. Застосування адаптивних алгоритмів забезпечує можливість автоматичної перебудови керуючих стратегій

без необхідності втручання оператора.

Надійність функціонування системи значною мірою визначається архітектурою збору та обробки даних. Використання багаторівневої обробки інформації з розподілом функцій між edge-, fog- та cloud-рівнями дозволяє зменшити навантаження на комунікаційні канали та підвищити відмовостійкість системи. Навіть у разі часткової втрати зв'язку з центральним сервером локальні алгоритми керування здатні підтримувати базові режими роботи супермаркету.

#### 4.4 Проведення експериментальних досліджень роботи системи

Для оцінювання ефективності запропонованого методу моніторингу та контролю кіберфізичної системи супермаркету було проведено експериментальні дослідження, спрямовані на аналіз роботи розробленої кіберфізичної системи в різних режимах функціонування. Основною метою експерименту є перевірка працездатності запропонованого алгоритму, а також оцінка його здатності адаптуватися до змінних умов функціонування інфраструктури супермаркету.

Експериментальні дослідження проводилися шляхом моделювання процесів функціонування кіберфізичної системи з використанням даних, що характеризують роботу основних елементів інфраструктури супермаркету (таблиця 4.2). До таких даних належать показники сенсорних пристроїв, інтенсивність потоку відвідувачів, активність касових вузлів та інші параметри, що відображають стан системи.

У ході експерименту розглядалися різні сценарії функціонування системи, зокрема:

- нормальний режим роботи супермаркету;
- режим підвищеного навантаження (піковий потік відвідувачів);
- ситуації, що характеризуються виникненням аномалій або збоїв у роботі окремих підсистем.

Для кожного із зазначених сценаріїв виконувалося моделювання роботи

системи моніторингу, у межах якого здійснювався збір даних, їх обробка та формування керуючих впливів відповідно до розробленого алгоритму.

Таблиця 4.2 – Параметри експериментального моделювання

Параметр	Позначення	Діапазон значень
Кількість відвідувачів	N	50 – 80 осіб
Інтенсивність потоку	$\lambda$	0.5 – 2.5 осіб/хв
Кількість касових вузлів	K	2 – 6
Температура	T	18 – 25 °C
Освітленність	L	300 – 800 лк
Час реакції системи	$\tau$	1 – 5 с

Особлива увага приділялася аналізу інтегрального показника стану системи  $M(t)$ , який використовується для оцінювання ефективності функціонування інфраструктури супермаркету. Зміна цього показника у часі дозволяє оцінити реакцію системи на зміну умов її роботи та визначити ефективність прийнятих керуючих рішень.

Отримані результати експериментального дослідження дозволяють оцінити ефективність запропонованого методу моніторингу та визначити його здатність забезпечувати стабільне функціонування кіберфізичної системи в умовах змінного навантаження.

Для проведення експериментальних досліджень було визначено набір параметрів, які характеризують стан кіберфізичної системи супермаркету. До основних параметрів експерименту належать:

- кількість відвідувачів у торговому залі;
- інтенсивність надходження покупців;
- кількість активних касових вузлів;
- інтегральний показник стану системи  $M(t)$ .

Додатково у процесі моделювання враховуються показники сенсорних систем (температура, освітленість тощо), які використовуються для формування інтегрального показника стану системи, але не наводяться у підсумковій таблиці результатів експерименту.

Зокрема, у режимі підвищеного навантаження система здатна визначати необхідність активації додаткових касових вузлів або зміну режиму роботи окремих елементів інфраструктури. У випадку виникнення аномальних ситуацій алгоритм моніторингу дозволяє оперативно виявляти відхилення від нормального режиму функціонування та формувати відповідні керуючі впливи.

Отримані результати підтверджують ефективність використання запропонованого підходу для моніторингу та контролю кіберфізичних систем торговельної інфраструктури.

Опис та значення основних параметрів, які використовувались для проведення експерименту подано в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Опис основних параметрів експерименту

Час, хв	Кількість відвідувачів	Активні касові вузли	Інтегральний показник $M(t)$
0	50	2	0.75
1	55	2	0.77
2	60	2	0.78
3	65	3	0.80
4	70	3	0.82
5	80	3	0.85
6	95	4	0.88
7	110	4	0.90
8	130	5	0.93

Кінець таблиці 4.3

Час, хв	Кількість	Активні касові вузли	Інтегральний
---------	-----------	----------------------	--------------

	відвідувачів		показник $M(t)$
9	150	5	0.95
10	170	6	0.97
11	180	6	0.96
12	160	5	0.94
13	140	5	0.92
14	120	4	0.89
15	100	4	0.86
16	90	3	0.84
17	80	3	0.82
18	70	3	0.80
19	60	2	0.78
20	55	2	0.76

У таблиці наведено результати експериментального дослідження функціонування кіберфізичної системи супермаркету. Представлено зміну кількості відвідувачів, кількості активних касових вузлів та інтегрального показника стану системи  $M(t)$  у часі. Отримані дані демонструють залежність ефективності функціонування системи від рівня навантаження та підтверджують здатність системи адаптуватися до змінних умов роботи.

Аналіз узагальнених результатів експерименту показує, що середнє значення інтегрального показника стану системи  $M(t)$  становить 0.86, що свідчить про достатньо високий рівень ефективності функціонування кіберфізичної системи супермаркету. При цьому максимальне значення показника досягається у періоди оптимального балансування навантаження та ресурсів, тоді як мінімальні значення відповідають початковим етапам адаптації системи або умовам зростання навантаження.

Узагальнені результати експерименту наведені в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Узагальнені результати експерименту

Показник	Середнє значення	Мінімальне значення	Максимальне значення
Кількість відвідувачів	102	50	180
Активні касові вузли	3.7	2	6
Інтегральний показник $M(t)$	0.86	0.75	0.97

Середня кількість активних касових вузлів становить 3.7, що підтверджує доцільність використання адаптивного механізму керування ресурсами. Збільшення кількості кас у періоди пікового навантаження дозволяє підтримувати стабільний рівень обслуговування покупців та уникати перевантаження системи.

Результати узагальненого аналізу підтверджують ефективність запропонованого методу моніторингу та керування, який забезпечує адаптацію системи до змінних умов функціонування та сприяє підвищенню загальної продуктивності інфраструктури супермаркету.

Оцінювання ефективності запропонованого методу моніторингу та контролю кіберфізичної системи супермаркету є важливим етапом дослідження, оскільки дозволяє визначити практичну доцільність його використання та оцінити вплив на якість функціонування системи. Основною метою оцінювання є визначення ступеня підвищення ефективності роботи інфраструктури супермаркету внаслідок застосування розробленого методу адаптивного моніторингу та керування.

У рамках дослідження ефективність системи оцінюється на основі сукупності кількісних показників, які характеризують якість функціонування основних підсистем супермаркету. До таких показників належать швидкість обробки інформації, час реакції системи на зміну навантаження, стабільність функціонування системи у різних режимах роботи, а також ефективність використання ресурсів. Використання комплексного підходу до оцінювання

дозволяє отримати більш об'єктивне уявлення про результати застосування запропонованого методу.

Одним із ключових показників ефективності є час реакції системи на зміну стану середовища. Під час функціонування супермаркету можливі ситуації різкого збільшення кількості відвідувачів, зміни навантаження на касові вузли або підвищення енергоспоживання окремих підсистем. Запропонований метод моніторингу дозволяє своєчасно виявляти такі зміни та формувати відповідні керуючі впливи, що сприяє більш стабільній роботі всієї системи.

Іншим важливим показником є рівень використання ресурсів системи. До ресурсів, що аналізуються, належать обчислювальні ресурси системи обробки даних, енергетичні ресурси, а також функціональні ресурси інфраструктури супермаркету, зокрема касові вузли, системи освітлення та кліматичного контролю. Ефективне управління цими ресурсами дозволяє зменшити витрати на експлуатацію системи та підвищити загальну продуктивність об'єкта.

Для кількісної оцінки ефективності може бути використаний узагальнений показник ефективності функціонування системи, який визначається як співвідношення між корисним результатом функціонування системи та витратами ресурсів на його досягнення. У загальному вигляді такий показник може бути представлений у вигляді формули 4.1:

$$E = R/C, \quad (4.1)$$

де  $E$  – інтегральний показник ефективності;

$R$  – результат функціонування системи (рівень продуктивності якості обслуговування покупців, тощо);

$C$  – витрати ресурсів системи.

Використання такого показника дозволяє виконувати порівняльний аналіз ефективності роботи системи за різних умов функціонування та оцінювати вплив запропонованого методу на загальну продуктивність кіберфізичної системи

супермаркету.

Запропонована методика оцінювання ефективності базується на аналізі сукупності показників функціонування системи та дозволяє комплексно оцінити результати застосування розробленого методу моніторингу та контролю. Отримані результати можуть бути використані для подальшого аналізу ефективності функціонування системи в різних режимах її роботи.

На рисунку 4.4 представлено динаміку зміни інтегрального показника ефективності функціонування кіберфізичної системи супермаркету у часі.



Рисунок 4.4 – Динаміка зміни інтегрального показника ефективності функціонування кіберфізичної системи супермаркету у часі

Показник ефективності  $E$  визначається як відношення результату функціонування системи до витрат ресурсів, що дозволяє оцінити ступінь раціональності використання інфраструктури.

Аналіз графіка показує, що на початкових етапах функціонування системи

спостерігається відносно нестабільна поведінка показника ефективності. Це пояснюється процесом адаптації системи до змінних умов навантаження, зокрема до збільшення кількості відвідувачів та необхідності залучення додаткових ресурсів.

У подальшому система переходить у більш стабільний режим функціонування, що характеризується незначними коливаннями показника ефективності. Це свідчить про ефективність механізмів адаптивного керування, які забезпечують узгодження між навантаженням та доступними ресурсами.

Також можна відзначити, що у моменти різкого зростання кількості відвідувачів спостерігається тимчасове зниження ефективності, що обумовлено інерційністю системи керування. Проте подальша активація додаткових касових вузлів дозволяє відновити оптимальний рівень функціонування.

Отримані результати підтверджують здатність системи забезпечувати стабільний рівень ефективності у динамічних умовах експлуатації.

На рисунку 4.5 представлено порівняння ефективності функціонування кіберфізичної системи супермаркету за умов відсутності адаптивного керування та при використанні запропонованого методу.

У випадку відсутності адаптації кількість ресурсів системи залишається сталою, що призводить до лінійного зростання показника ефективності разом зі збільшенням кількості відвідувачів. Однак такий характер залежності свідчить про перевантаження системи та погіршення якості обслуговування.

Натомість при використанні адаптивного підходу відбувається динамічна зміна кількості касових вузлів залежно від поточного навантаження. Це дозволяє підтримувати стабільний рівень ефективності системи, що підтверджує доцільність застосування запропонованого методу.

Отримані результати демонструють, що адаптивне керування забезпечує більш раціональне використання ресурсів та підвищує стійкість системи до змін навантаження.

Результати проведених експериментальних досліджень підтверджують ефективність запропонованого методу моніторингу та контролю кіберфізичної

системи супермаркету.

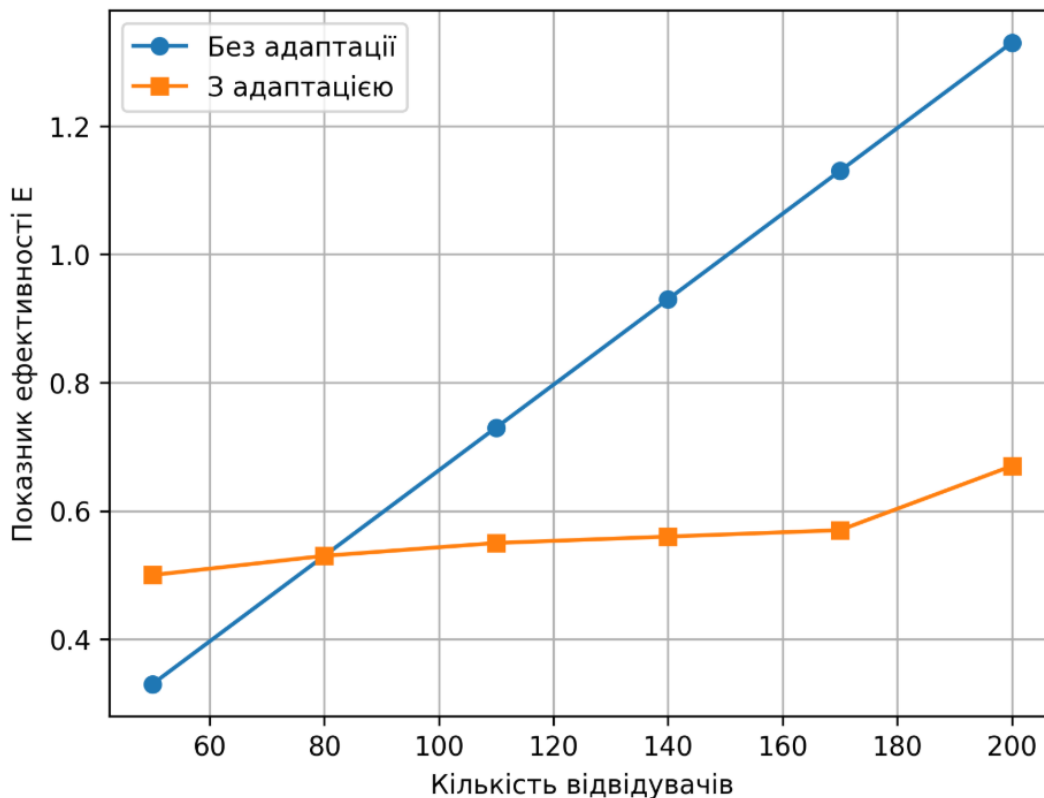


Рисунок 4.5 – Порівняння ефективності функціонування кіберфізичної системи супермаркету за умов відсутності адаптивного керування та при використанні запропонованого методу

Аналіз отриманих даних показав, що система здатна адаптивно реагувати на зміну умов функціонування та забезпечувати стабільний рівень продуктивності в різних режимах роботи.

У процесі моделювання було встановлено, що зі збільшенням кількості відвідувачів спостерігається зростання навантаження на інфраструктуру супермаркету, що призводить до зміни інтегрального показника стану системи  $M(t)$ . Проте використання розробленого алгоритму дозволяє своєчасно виявляти такі зміни та формувати відповідні керуючі впливи, що забезпечує стабілізацію роботи системи.

Особливої уваги заслуговує поведінка системи у режимі пікового навантаження. Отримані результати показують, що система здатна ефективно

адаптуватися до різкого збільшення потоку покупців за рахунок активації додаткових ресурсів, зокрема касових вузлів. Це дозволяє зменшити час обслуговування та підвищити рівень задоволеності клієнтів.

Порівняльний аналіз результатів функціонування системи з використанням запропонованого алгоритму та без нього показав суттєве підвищення ефективності у всіх розглянутих сценаріях. Найбільший приріст ефективності спостерігається у складних умовах функціонування, що підтверджує доцільність використання адаптивного підходу до управління кіберфізичною системою.

Результати експериментального дослідження свідчать про високу ефективність запропонованого методу та його придатність для практичного застосування у системах моніторингу та управління інфраструктурою супермаркетів.

#### 4.4 Висновки

У четвертому розділі магістерської роботи було розроблено програмну архітектуру системи моніторингу та контролю кіберфізичної інфраструктури супермаркету, а також проведено експериментальні дослідження ефективності запропонованого методу.

У процесі дослідження було визначено основні компоненти програмної системи, зокрема підсистеми збору, обробки, аналізу та зберігання даних, а також підсистему керування. Запропонована архітектура забезпечує модульність, масштабованість та гнучкість системи, що дозволяє адаптувати її до змінних умов функціонування. У межах розділу було сформовано інтегральний показник ефективності функціонування системи, який визначається як відношення корисного результату до витрат ресурсів. Це дозволило здійснити кількісну оцінку ефективності роботи системи у різних режимах.

Проведені експериментальні дослідження, що включали моделювання нормального, пікового та аномального режимів роботи, показали, що запропонований метод забезпечує стабільне функціонування системи навіть за

умов змінного навантаження. Отримані результати підтвердили здатність системи адаптивно реагувати на зміну кількості відвідувачів шляхом регулювання кількості активних касових вузлів.

Побудовані графічні залежності дозволили проаналізувати поведінку системи у різних сценаріях. Зокрема, було встановлено, що без використання адаптивного підходу ефективність системи має тенденцію до неконтрольованого зростання, що свідчить про перевантаження ресурсів. Натомість при використанні адаптивного керування забезпечується стабілізація показника ефективності, що підтверджує доцільність запропонованого підходу.

Порівняльний аналіз результатів функціонування системи з використанням розробленого алгоритму та без нього показав суттєве підвищення ефективності у всіх досліджених сценаріях, особливо в умовах пікового навантаження та при виникненні аномальних ситуацій.

Результати проведених досліджень підтверджують ефективність запропонованого методу моніторингу та керування кіберфізичною системою супермаркету, що дозволяє забезпечити раціональне використання ресурсів, підвищити якість обслуговування та адаптивність системи до змін умов функціонування.

## ВИСНОВКИ

У роботі за результатами виконаних теоретичних та практичних досліджень розроблено метод, моделі та архітектурні рішення для створення адаптивної кіберфізичної системи (КФС) моніторингу та контролю функціонування супермаркету. Запропонований підхід дозволяє перейти від фрагментарного керування окремими процесами до узгодженого багаторівневого контролю, що враховує як фізичні, так і інформаційні аспекти об'єкта.

У першому розділі проведено аналіз концепцій Індустрія 4.0 та Розумна інфраструктура як базису для цифровізації ритейлу. Виявлено проблему «інформаційних островів», де автономність існуючих систем призводить до надмірних витрат ресурсів.

У другому розділі формалізовано супермаркет як складну відкриту динамічну систему через кортеж взаємопов'язаних компонентів. Сформовано математичні моделі потоків відвідувачів на основі теорії масового обслуговування та розроблено графову модель адаптивного зонного керування освітленням із предиктивним механізмом активації суміжних зон.

У третьому розділі розроблено метод адаптивного багаторівневого моніторингу, що базується на трирівневій структурі обробки даних (локальний, проміжний, централізований). Впроваджено концепцію єдиного моніторингового стану  $M(t)$ , який інтегрує реальні та прогнозні дані для формування керуючих впливів у трьох режимах: нормальному, піковому та аварійному.

У четвертому розділі спроектовано багаторівневу архітектуру програмного забезпечення з використанням шаблонів проектування Спостерігач, Адаптер, Facade, Singleton та Стратегія. Експериментальні дослідження підтвердили ефективність адаптивного підходу: середнє значення показника ефективності склало 0.86, а динамічне регулювання кількості кас (від 2 до 6) забезпечило стабільність системи при зростанні навантаження.

Набула подальшого розвитку інформаційна технологія адаптивного багаторівневого моніторингу та контролю КФС супермаркету, яка, на відміну від

існуючих, використовує єдиний моніторинговий стан для всіх підсистем та поєднує реальний моніторинг із прогнозними моделями для превентивного управління ресурсами.

Впровадження результатів роботи дозволили забезпечити узгоджену роботу різних підсистем, підвищити якість обслуговування покупців через мінімізацію черг, оптимізувати енергоспоживання шляхом зонного контролю освітлення.

За темою кваліфікаційної роботи магістра опубліковані тези доповіді у Збірнику наукових праць за матеріалами ХІХ Всеукраїнської науково практичної WEB конференції аспірантів, студентів та молодих вчених «Комп'ютерні інтелектуальні системи та мережі» (25-27 березня 2026 р.). – Кривий Ріг: Криворізький національний університет, 2026. – 370 с.

**ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ**

1. Pires F., Cachada A., Barbosa J., Moreira A. P., Leitão P. Digital twin in Індустрія 4.0: Technologies, applications and challenges. In 2019 *IEEE 17th international conference on industrial informatics (INDIN)*. 2019. Vol. 1, pp. 721-726. IEEE.
2. Yellanki S. K. Adaptive Infrastructure for Real-Time Consumer Behavior Monitoring in Retail Environments. *European Journal of Analytics and Artificial Intelligence (EJAAI) p-ISSN*. 2023. Volume 1. Issue 1. Pp. 3050-9556.
3. Pamisetty A. Intelligent Infrastructure for Real-Time Inventory and Logistics in Retail Supply Chains. 2023. Available at SSRN 5267332.
4. Thanh H. T., Thanh T. D. Integrating scan mobile with electronic signage solution in supermarket and retail store. *VNUHCM Journal of Economics-Law and Management*. 2018. Vol. 2(1). Pp. 98-110.
5. Santhosh T., Priya S., Varshini S., Waseema S. A. AI supermarket. In 2024 *International Conference on Power, Energy, Control and Transmission Systems (ICPECTS)*. 2024. pp. 1-5. IEEE.
6. Hurjui C., Graur A., Turcu C. O. Monitoring the Shopping Activities from the Supermarkets based on the Intelligent Basket by using the RFID Technology. *Elektronika Ir Elektrotehnika*. 2018. Vol. 83(3). Pp. 7-10.
7. Eichhorn C., Plecher D. A., Mesmer T., Leder L., Simecek T., Boukadida N., Klinker G. Shopping in between realities-using an augmented virtuality smartphone in a virtual supermarket. In 2023 *IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*. 2023. pp. 1161-1170. IEEE.
8. Ramadhani I., Nindyasari R., Murti A. C. Design and Development of a Web-Based Point of Sale System for Small-Scale Retail Management. *bit-Tech*. 2025. Vol. 8(1). Pp.181-189.
9. Roe M., Spanaki K., Ioannou A., Zamani E. D., Giannakis M. Drivers and challenges of internet of things diffusion in smart stores: A field

- exploration. *Technological Forecasting and Social Change*. 2022. №178. P. 121593
10. Luo et al. A unified view of IoT and CPS security and privacy. 2023. *arXiv preprint arXiv:2209.13793*.
  11. Gundimeda V., Murali R. S., Joseph R., Naresh Babu N. T. An automated computer vision system for extraction of retail food product metadata. In *First International Conference on Artificial Intelligence and Cognitive Computing: AICC 2018*. 2018. pp. 199-216. Singapore: Springer Singapore.
  12. Fernández Del Carpio A. Analyzing computer vision models for detecting customers: a practical experience in a mexican retail. *International Journal of Advances in Intelligent Informatics*. 2024. Vol 10. Issue 1. P. 131.
  13. Ojika F. U., Owobu W. O., Abieba O. A., Esan O. J., Ubamadu B. C., Daraojimba A. I. The impact of machine learning on image processing: A conceptual model for real-time retail data analysis and model optimization. *International Journal of Multidisciplinary Research and Growth Evaluation*. 2022. Vol. 3(1). Pp. 861-875.
  14. Singh R., Gill S. S. Edge AI: a survey. *Internet of Things and Cyber-Physical Systems*. 2023. Vol. 3. Pp. 71-92.
  15. Almuhaya M. A., Jabbar W. A., Sulaiman N., Abdulmalek S. A survey on Lorawan technology: Recent trends, opportunities, simulation tools and future directions. *Electronics*. 2022. Vol. 11(1). p. 164.
  16. Ghobakhlou A., Al-Hamid D. Z., Zandi S., Cato J. A Comprehensive Analysis of Security Challenges in ZigBee 3.0 Networks. *Sensors*. 2025. Vol. 25(15). p. 4606.
  17. Gentile L., Aruffo E., Mascitelli A., Chiacchieretta P., Di Carlo P. Characterization of low-cost sensors via simultaneous field measurements: a case study. In *EGU General Assembly Conference Abstracts*. 2025. pp. EGU25-12322.
  18. Siemens C. H., Guaita-Martinez J. M., Puertas R., Calafat-Marzal C. Innovation, decarbonization and economic security: sustainability and productivity in the EU-27. *European Planning Studies*. 2026. Pp. 1-21.

19. Reddy C. S. K. Scalable AI Framework Using SAP, Oracle Cloud, SDN, and BMS Upgrades for Intelligent and Sustainable Healthcare. *International Journal of Humanities and Information Technology*. 2025. №7(03).
20. Heric S., Bobek S., Zabukovšek S. S. Artificial Intelligence in ERP Quality Management Modules: A Comparative Analysis of SAP and Infor. *Naše gospodarstvo/Our economy*. 2025. Vol. 71(3). Pp. 15-28.
21. Nilsson J., Sandin F. Semantic interoperability in Індустрія 4.0: Survey of recent developments and outlook. In *2018 IEEE 16th international conference on industrial informatics (INDIN)*. 2018. pp. 127-132. IEEE.
22. Bodisco T. A., Palmer S. (2020). Presentation and Evaluation of a New Graduate Unit of Study in Engineering Product Development. *Sustainability*, 2020. Vol. 12(14). p. 5749. <https://doi.org/10.3390/su12145749>.
23. Sascha Kraus, Francesco Schiavone, Anna Pluzhnikova, Anna Chiara Invernizzi Digital transformation in healthcare: Analyzing the current state-of-research. *Journal of Business Research*. 2021. Volume 123. Pages 557-567. ISSN 0148-2963.
24. Hai-Yang Cheng, Cheng-Wei Chiang, Zhi-Qing Zhang. Two- and three-body hadronic decays of charmed mesons involving a tensor meson. *Physical Review D*. 2022. Vol. 105. P. 093006.
25. Judijanto Loso. IoT Research for Розумна роздрібна торгівля: Global Mapping 2000 – 2025. *West Science Interdisciplinary Studies*. 2026. Vol. 4. Pp. 237-245. 10.58812/wsis.v4i01.2620.
26. Roldán-Porta C., Roldán-Blay C., Dasí-Crespo D., Escrivá-Escrivá G. Optimising a Biogas and Photovoltaic Hybrid System for Sustainable Power Supply in Rural Areas. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13(4). P. 2155. <https://doi.org/10.3390/app13042155>.
27. Huang J., Long Y., Zhao X. Driver Glance Behavior Modeling Based on Semi-Supervised Clustering and Piecewise Aggregate Representation. In *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2022. Vol. 23. № 7. pp. 8396-8411. doi: 10.1109/TITS.2021.3080322.

28. Rana A., Gawish M., Fernández-Veiga M. Improving recommendations for online retail markets based on ontology evolution. *Electronics*. 2021. Vol. 10(14). P. 1650. DOI: 10.3390/electronics10141650.
29. Pala Naresh. Digital Twins in Retail: Optimizing Store Operations and Enhancing Customer Experience. *International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology*. 2025. Pp. 409-422.
30. Pereira E., Júnior S., Silva L. F. V., Batista M., Santos E., Araújo Í., Araújo J., Barboza E., Gomes F., Fraga I. T., Dos Santos D. O., Davanso R. RFID Tags for On-Metal Applications: A Brief Survey. *Technologies*, 2024. Vol. 12(5). P. 58. <https://doi.org/10.3390/technologies12050058>.
31. SAPKOTA Ranjan, KARKEE Manoj. Ultralytics YOLO evolution: An overview of YOLO26, YOLO11, YOLOv8 and YOLOv5 object detectors for computer vision and pattern recognition. *arXiv preprint arXiv:2510.09653*. 2025.
32. Adhikari B., Li J., Michel E. S., Dykes J., Tseng T. M., Tagert M. L., Chen D. A Comprehensive Evaluation of YOLO-Based Deer Detection Performance on Edge Devices. *Electronics*. 2026. Vol. 15(5). P. 1026.
33. Arvind V. R., Shrinidhi R. M., Deepa T., Maheedhar M. Intelligent Warehousing: A Machine Learning and IoT Framework for Precision Inventory Optimization. 2025. *IEEE Access*.
34. Ding H., Tian J., Yu W., Wilson D. I., Young B. R., Cui X., Li W. The application of artificial intelligence and big data in the food industry. *Foods*. 2023. Vol. 12(24). P. 4511.
35. Kaur G., Qureshi I., Bagde A., Zade S. Artificial Intelligence in Sensor-Free Real-Time 3D Human Pose Motion Tracking for Exercise Supervision: A Comprehensive Scoping Review. In *2025 International Conference on Sustainable Communication Networks and Application (ICSCN)*. 2025. pp. 1841-1846. IEEE.
36. Wang A., Chen H., Liu L., Chen K., Lin Z., Han J., Ding G. Yolov10: Real-time end-to-end object detection. *Advances in neural information processing systems*. 2024. Vol. 37. Pp. 107984-108011.

37. Haxhibeqiri J., De Poorter E., Moerman I., Hoebeke J. A survey of LoRaWAN for IoT: From technology to application. *Sensors*. 2018. Vol. 18(11). P. 3995.
38. Almuhaya M. A., Jabbar W. A., Sulaiman N., Abdulmalek S. A survey on Lorawan technology: Recent trends, opportunities, simulation tools and future directions. *Electronics*. 2022. Vol. 11(1). P. 164.
39. IEEE SA Standards Board Approvals : вебсайт. URL: <https://standards.ieee.org/about/sasb/sba/15feb2024/> (дата звернення: 09.03.2026).
40. Stocker M., Brunner H., Schuh M., Boano C. A., Römer K. On the performance of IEEE 802.15. 4z-compliant ultra-wideband devices. In *2022 Workshop on Benchmarking Cyber-Physical Systems and Internet of Things (CPS-IoTBench)*. 2022. pp. 28-33. IEEE.
41. Tiemann J., Friedrich J., Wietfeld C. Experimental evaluation of IEEE 802.15. 4z UWB ranging performance under interference. *Sensors*. 2022. Vol. 22(4). P. 1643.
42. Connectivity Standards Alliance (2025). ZigBee 3.0 and Matter: The Future of Adaptive Retail Lighting. *Zigbee Complete IOT Solution - CSA-IOT* : вебсайт. URL: <https://csa-iot.org/all-solutions/zigbee/> (дата звернення: 09.03.2026).
43. Moloudian G., Hosseinifard M., Kumar S., Simorangkir R. B., Buckley J. L., Song C., O'Flynn B. RF energy harvesting techniques for battery-less wireless sensing, Індустрія 4.0, and Internet of Things: A review. *IEEE Sensors Journal*. 2024. Vol. 24(5). Pp. 5732-5745.
44. Gajo J. D., Merales G. P., Escarcha J., Molina B. A., Nartea G., Maminta E. G., Atienza R. O. Sari Sandbox: A Virtual Retail Store Environment for Embodied AI Agents. In *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision*. 2025. pp. 2369-2378.
45. El Hussein F., Noura H. N., Salman O., Chahine K. (2025). Machine learning in smart buildings: A review of methods, challenges, and future trends. *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15(14). P. 7682.

46. International Organization for Standardization (2023). ISO 13374-1:2023 Condition monitoring and diagnostics of machines. URL: [ISO.org](https://www.iso.org). (дата звернення 9.03.2026).
47. Jia Z., Dong J., Li S., Wang H., Wang Y., Zhang J., Ren L. A Digital Twin System for Predictive Maintenance of Complex Equipment. *In 2024 IEEE Smart World Congress (SWC)*. 2024. pp. 2039-2044. IEEE.
48. Peltokorpi J. Who Saw It Last, and Where? Materials Identification and Tracking for Efficient Production and Intralogistics. *In Asia-Pacific Industrial Engineering and Management Systems Conference*. 2024. pp. 752-757. Chiang Mai University.
49. How blockchain and IoT is making supply chain smarter. URL: [Blockchain for Supply Chain | IBM](#) (дата звернення: 13.03.2026).
50. Imo F. U., Nwabueze C. A. Performance analysis of long-short memory prediction of device to device communication in LoRa based network. *International Journal of Research Publication and Reviews (IJRPR)*. 2023. Vol. 4(8). Pp. 2388-2405.
51. Kumar S. T., Sree V. S., Praveen V., Chandrika V. V., Naveendra T., Sekhar P. C. ECHOSHIELD: 'Turning Sound into Safety' An AI-Powered Sound Detection and Safety Alert System. *International Journal of Human Computations and Intelligence*. 2023. Vol. 4(3). Pp. 465-475.
52. Stadnicka D., Bonci A., Longhi S., Pirani M., Dec G. A Concept of an SME Focused Edge Computing Self-managing Cyber-physical System. *Management and Production Engineering Review*. 2023. Vol. 14. №3. Pp.3 – 15.
53. Bayhan H., Meißner M., Kaiser P., Meyer M., Hompel M. T. Presentation of a novel real-time production supply concept with cyber-physical systems and efficiency validation by process status indicators. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2020. Vol. 108(1). Pp. 527-537.
54. De Oliveira E., Schreiber D., Froehlich C. Innovation in operational processes and adherence to Індустрія 4.0 technologies in a network of supermarket stores. *Journal of Business and Retail Management Research*. 2024. Vol. 18(02).
55. Bijsterveld K. Eavesdropping by the eye: detecting sound events and the

culture of acoustic intelligence. *Sound Studies*. 2023. Vol. 9(2). Pp. 233-252.

56. Pishdad-Bozorgi P., Gao X., Shelden D. R. Introduction to cyber-physical systems in the built environment. *In Construction 4.0*. 2020. pp. 23-41. Routledge.

57. Akasaka F., Mitake Y., Watanabe K., Nishikawa Y., Ozawa J., Shimomura Y. Designing a digital service system for sustainable social value creation: A holistic design method based on socio-cyber-physical system perspectives. *Sustainability*. 2024. Vol. 16(21). P. 9532.

58. Li S. A., Chou L. H., Chang T. H., Wong C. C., Feng H. M. Design and implementation of an autonomous service robot based on cyber physical modeling systems. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2025. Vol. 239(12). Pp. 1721-1735.

59. Lakshmiranganatha S., Manjunatha K. A. Machine Learning and Deep Learning Approaches in Cyber-Physical Systems. *In Secure and Smart Cyber-Physical Systems*. 2024. pp. 1-29. CRC Press.

60. Yue T., Arcaini P., Ali S. Understanding digital twins for cyber-physical systems: A conceptual model. *In International Symposium on Leveraging Applications of Formal Methods*. 2020. pp. 54-71. Cham: Springer International Publishing.

61. Abosuliman S. S. Deep learning techniques for securing cyber-physical systems in supply chain 4.0. *Computers and Electrical Engineering*. 2023. №107. P. 108637.

62. Niggemann O., Zimmering B., Steude H., Augustin J. L., Windmann A., Multaheb S. Machine learning for cyber-physical systems. *In Digital Transformation: Core Technologies and Emerging Topics from a Computer Science Perspective*. 2023. pp. 415-446). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

63. Maru V., Nannapaneni S., Krishnan K., Arishi A. Deep-learning-based cyber-physical system framework for real-time industrial operations. *Machines*. 2022. Vol. 10(11). P. 1001.

64. Xu L. D., Duan L. Big data for cyber physical systems in Індустрія 4.0: a survey. *Enterprise Information Systems*. 2019. Vol. 13(2). Pp. 148-169.

65. Atiquzzaman M., Yen N., Xu, Z. (Eds.). Big data analytics for cyber-

physical system in smart city. *BDCPS 2019, 28-29 December 2019*. Shenyang, China. Springer Nature.

66. Hussain A., Tordera E. M., Masip-Bruin X., Leligou H. C. Rule-based with machine learning IDS for DDoS attack detection in cyber-physical production systems (CPPS) *IEEE access*. 2024. Vol. 12. Pp. 114894-114911.

67. Ahmed U., Srivastava G., Lin J. C. W. A federated learning approach to frequent itemset mining in cyber-physical systems. *Journal of Network and Systems Management*. 2021. Vol. 29(4). P. 42.

68. Das S., Balmiki A. K., Mazumdar K. A Review on AI-ML Based Cyber-Physical Systems Security for Індустрія 4.0. *Intelligent Cyber-Physical Systems Security for Індустрія 4.0*. 2022. Pp. 203-216.

69. Peyvandi A., Majidi B., Peyvandi S., Patra J. C., Moshiri B. Location-aware hazardous litter management for smart emergency governance in urban eco-cyber-physical systems. *Multimedia Tools and Applications*. 2022. Vol. 81(16). pp. 22185-22214.

70. Suguna M., Prakash D., Kumar C. O., Revathi M., Dhanaraj R. K. AI-based pest detection and recovery model for cyber-physical agricultural systems. *In Agri 4.0 and the Future of Cyber-Physical Agricultural Systems*. 2024. pp. 237-256. Academic Press.

71. Sugandh U., Panwar A., Yadav S., Sharma A. Bridging the present and future: Emerging trends in smart cyber-physical systems. *In Cognitive Cloud Computing*. pp. 264-288. CRC Press.

72. Gaba S., Budhiraja I., Kumar V., Martha S., Khurmi J., Singh A., Abouhawwash M. A systematic analysis of enhancing cyber security using deep learning for cyber physical systems. *IEEE Access*. 2024. №12. Pp. 6017-6035.

73. Wickramasinghe C. S., Marino D. L., Amarasinghe K., Manic M. Generalization of deep learning for cyber-physical system security: A survey. *In IECON 2018-44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. 2018. pp. 745-751. IEEE.

74. Zhang J., Pan L., Han Q. L., Chen C., Wen S., Xiang Y. Deep learning based

attack detection for cyber-physical system cybersecurity: A survey. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*. 2021. Vol. 9(3). Pp. 377-391.

75. Rathore S., Park J. H. A blockchain-based deep learning approach for cyber security in next generation industrial cyber-physical systems. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2020. Vol. 17(8). Pp. 5522-5532.

76. Sagar M., Vanmathi C. A comprehensive review on deep learning techniques on cyber attacks on cyber physical systems. *SN Computer Science*. 2024. Vol. 5(7). P. 891.

77. Somers R. J., Douthwaite J. A., Wagg D. J., Walkinshaw N., Hierons R. M. Digital-twin-based testing for cyber-physical systems: A systematic literature review. *Information and Software Technology*. 2023. №156. P. 107145.

78. Biesinger F., Meike D., Kraß B., Weyrich M. A digital twin for production planning based on cyber-physical systems: A Case Study for a Cyber-Physical System-Based Creation of a Digital Twin. *Procedia CIRP*. 2019. Vol. 79. Pp. 355-360.

79. Saad A., Faddel S., Mohammed O. IoT-based digital twin for energy cyber-physical systems: design and implementation. *Energies*. 2020. Vol. 13(18). P. 4762.

80. Пустовіт О.Р., Саченко С.І. Кіберфізична система моніторингу та контролю функціонування супермаркету. *Збірник наукових праць за матеріалами XIX Всеукраїнської науково практичної WEB конференції аспірантів, студентів та молодих вчених «Комп'ютерні інтелектуальні системи та мережі» (25-27 березня 2026 р.)*. Кривий Ріг: Криворізький національний університет. 2026. 432 с.

ДОДАТОК А  
(обов'язковий)

Тези доповіді

МІНІСТЕРСТВО  
ОСВІТИ І НАУКИ  
УКРАЇНИ

ІНСТИТУТ  
ІНФОРМАЦІЙНИХ  
СИСТЕМ ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ  
СИСТЕМ

НАУКОВЕ  
ІНСТИТУТІВСТВО  
ІНФОРМАЦІЙНИХ  
СИСТЕМ ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ  
СИСТЕМ

ХІХ ВСЕУКРАЇНСЬКА НАУКОВО-ПРАКТИЧНА WEB-КОНФЕРЕНЦІЯ  
АСПІРАНТІВ, СТУДЕНТІВ ТА МОЛОДИХ ВЧЕНИХ

**МАТЕРІАЛИ  
КОНФЕРЕНЦІЇ**  
*CONFERENCE PROCEEDINGS*

**КОМП'ЮТЕРНІ  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ  
СИСТЕМИ ТА МЕРЕЖІ**  
*COMPUTER INTELLIGENT SYSTEMS  
AND NETWORKS*

**КІСМ-2026**  
**CISN-2026**

КАФЕДРА КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ ТА МЕРЕЖ

**25-27 БЕРЕЗНЯ 2026**  
КРИВИЙ РІГ / KRYVYI RIH

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
КАФЕДРА КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ ТА МЕРЕЖ

**ХІХ ВСЕУКРАЇНСЬКА НАУКОВО-ПРАКТИЧНА  
WEB КОНФЕРЕНЦІЯ АСПІРАНТІВ,  
СТУДЕНТІВ ТА МОЛОДИХ ВЧЕНИХ**

**КОМП'ЮТЕРНІ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ  
СИСТЕМИ ТА МЕРЕЖІ**

Матеріали конференції  
25-27 березня 2026 р.

Видавничий центр  
Криворізький національний університет  
Кривий Ріг 2026

УДК 681.3.06  
К60

Відповідальний за випуск д-р техн. наук,  
професор Купін А. І.

Друкується згідно з рекомендацією Вченої Ради ФІТ Криворізького національного університету (протокол №12 від 30.03.2026 р.).

Змістова частина друкованого матеріалу збірки викладена згідно з електронними носіями, поданими авторами.

**К60 Комп'ютерні інтелектуальні системи та мережі. Матеріали XIX Всеукраїнської науково-практичної WEB конференції аспірантів, студентів та молодих вчених (25-27 березня 2026 р.). – Кривий Ріг: Криворізький національний університет, 2026. – 370 с.**

Містить матеріали науково-практичної WEB конференції аспірантів, студентів та молодих вчених з питань розробки, проектування, діагностики та моделювання комп'ютерних систем та мереж, розробки програмного та апаратного забезпечення; розглядаються проблеми створення та використання систем паралельних і розподілених обчислень, штучного інтелекту, а також питання захисту інформації.

УДК 681.3.06  
Криворізький національний університет, 2026

централізований контроль, зручний доступ через вебінтерфейс та можливість інтеграції з іншими інформаційними системами. Підхід має низку обмежень, пов'язаних з відсутністю вбудованої слайсачії, ризиком втрати налаштувань принтера та підвищеними вимогами до інформаційної безпеки.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Офіційний сайт BambuLab: <https://shop.bambulab.com.ua/bambu-connect>

*Пустовіт О. Р.*

*Хмельницький національний університет*

*Саченко С.І.*

*к.е.н., доцент, Західноукраїнський національний університет*

#### **КІБЕРФІЗИЧНА СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ ТА КОНТРОЛЮ ФУНКЦІОНУВАННЯ СУПЕРМАРКЕТУ**

*У роботі розглянуто підхід до побудови кіберфізичної системи моніторингу та контролю функціонування супермаркету на основі інтеграції сенсорних пристроїв, систем обробки даних та адаптивних алгоритмів керування. Запропонована система забезпечує збір, аналіз і використання даних у реальному часі та сприяє оптимізації використання ресурсів і покращенню якості обслуговування покупців.*

Актуальність дослідження зумовлена активною цифровою трансформацією сфери роздрібною торгівлі та поступовим переходом супермаркетів до концепції «розумного магазину», у межах якої ключову роль відіграють дані, що збираються та обробляються в режимі реального часу. Використання великої кількості сенсорів, відеокамер, електронних цінників, а також автоматизованих виконавчих пристроїв призводить до накопичення значних обсягів різномірної інформації. Ефективне використання цих даних потребує їх оперативної обробки та інтеграції в єдину систему підтримки прийняття рішень. За відсутності узгоджених моделей та адаптивних алгоритмів керування накопичені дані не лише не підвищують ефективність функціонування торгового об'єкта, але й можуть ускладнювати процес управління. Додатковою складністю є високий рівень невизначеності процесів, що відбуваються у торговому просторі. Потіки покупців мають стохастичний характер і залежать від багатьох чинників, зокрема часу доби, днів тижня, сезонних коливань попиту, маркетингових кампаній та зовнішніх соціально-економічних умов. Поведінкові моделі відвідувачів часто є непередбачуваними, а дані, отримані від сенсорних систем, можуть містити шуми, затримки або неповні вимірювання. За таких умов використання традиційних статичних алгоритмів керування або спрощених моделей масового обслуговування не забезпечує необхідної точності прогнозування та ефективності управлінських рішень.

Особливої актуальності набуває проблема інтеграції різних функціональних підсистем супермаркету в єдину інформаційно-керуючу структуру. На практиці системи аналізу потоків покупців, керування освітленням, кліматичними параметрами, системами ціноутворення та логістики часто функціонують незалежно одна від одної. Така фрагментарність призводить до оптимізації окремих процесів без урахування їх взаємозв'язків і впливу на загальну ефективність функціонування торгового об'єкта. Відсутність інтегрованого моніторингового середовища ускладнює комплексний аналіз стану системи та знижує можливості автоматизованого управління.

Для ефективного функціонування супермаркету доцільно розглядати його як кіберфізичну систему, у якій фізичні процеси взаємодіють з інформаційними технологіями збору, обробки та аналізу даних. Структурна модель такої системи може бути представлена у вигляді кількох взаємопов'язаних рівнів.

1. Сенсорний рівень (рівень збору даних). На цьому рівні здійснюється отримання первинної інформації про стан торгового середовища. Джерелами даних виступають різноманітні технічні пристрої: сенсори руху, відеокамери, датчики температури та освітлення, електронні цінники, системи контролю доступу та інші елементи інфраструктури. Основним завданням цього рівня є безперервний моніторинг параметрів середовища та передача отриманих даних до системи обробки.

2. Рівень передавання та інтеграції даних. На цьому етапі здійснюється передавання інформації від сенсорних пристроїв до центральної системи обробки. Дані можуть передаватися через локальні мережі або бездротові канали зв'язку. Важливою функцією цього рівня є інтеграція різнорідних потоків інформації та їх підготовка до подальшого аналізу.

3. Рівень обробки та аналізу даних. На цьому рівні відбувається обробка отриманої інформації, її фільтрація, агрегація та аналітичний аналіз. Тут можуть використовуватися методи статистичного аналізу, алгоритми прогнозування та адаптивні моделі, що дозволяють оцінювати поточний стан системи, виявляти аномалії та прогнозувати зміну потоків покупців.

4. Рівень керування та прийняття рішень. На основі результатів аналізу формується керуючий вплив на технічні підсистеми супермаркету. Система може автоматично змінювати параметри роботи освітлення, клімат-контролю, інформаційних панелей або інших елементів інфраструктури. Також на цьому рівні формується аналітична інформація для персоналу та адміністрації.

5. Рівень управління та взаємодії з користувачем. Верхній рівень системи забезпечує візуалізацію даних, моніторинг стану об'єкта та підтримку прийняття управлінських рішень. Інтерфейси системи дозволяють операторам контролювати роботу супермаркету, аналізувати статистичні показники та коригувати режими функціонування окремих підсистем.

#### ВИСНОВКИ

Таким чином, запропонована структурна модель кіберфізичної системи забезпечує узгоджену взаємодію сенсорних пристроїв, інформаційних технологій та керуючих механізмів, що створює передумови для підвищення

**ДОДАТОК Б**  
(обов'язковий)

Презентація

# Кіберфізична система моніторингу та контролю функціонування супермаркету

Виконав: магістр гр. КІ2М-24-2  
Пустовіт О.Р.

Керівник: к.е.н., доцент Саченко С.І.

## Актуальність

Актуальність дослідження обумовлена стрімкою цифровізацією роздрібною торгівлі та переходом супермаркетів до моделей «розумного магазину», де ключову роль відіграють дані, отримані в реальному часі. Зростання кількості сенсорів, камер, електронних цінників та автоматизованих виконавчих пристроїв призводить до формування великих обсягів різномірних даних, які необхідно обробляти з мінімальними затримками. За відсутності узгоджених моделей та адаптивних алгоритмів керування такі дані не лише не підвищують ефективність роботи, але й можуть ускладнювати прийняття рішень.

- ▶ Мета дослідження полягає в забезпечення узгодженої роботи кіберфізичної системи супермаркету та покращення якості обслуговування покупців при оптимізація енергетичних і експлуатаційних витрат шляхом інтеграції реального та прогнозного моніторингу всіх підсистем.
- ▶ Об'єктом дослідження процеси моніторингу та контролю функціонування супермаркету як кіберфізичної системи.
- ▶ Предметом дослідження є методи, моделі та алгоритми адаптивного багаторівневого моніторингу і керування кіберфізичною системою супермаркету.

## Задачі дослідження

- ▶ проаналізувати сучасні підходи до моніторингу та контролю кіберфізичних систем у сфері роздрібної торгівлі та визначити їхні переваги й обмеження;
- ▶ формалізувати супермаркет як кіберфізичну систему, виділивши структурні компоненти, інформаційні потоки та контури управління;
- ▶ сформувати математичні моделі потоків відвідувачів, адаптивного керування освітленням та обробки сенсорних даних;
- ▶ забезпечити інтеграцію даних із різномірних підсистем у єдиний моніторинговий стан для оцінки поточного та прогнозного стану системи;

## Наукова новизна

- ▶ набув подальшого розвитку метод адаптивного багаторівневого моніторингу та контролю кіберфізичної системи супермаркету, який базується на використанні єдиного моніторингового стану  $M(t)$  для всіх підсистем та поєднанні реального моніторингу з прогнозними моделями для превентивного управління ресурсами;
- ▶ набула подальшого розвитку модель адаптивного зонного керування освітленням торгового залу, що використовує графове представлення та предиктивний механізм активації суміжних зон залежно від ймовірності переміщення покупців.

## ▶ Практична цінність отриманих результатів

- ▶ Практична значимість отриманих результатів полягає у створенні інструментарію для оцінки роботи об'єкта в режимі реального часу через інтегральний показник  $M(t)$ , що дозволяє знизити витрати на модернізацію та забезпечити стабільне функціонування систем навіть за умов зашумленості даних або пікових навантажень.

### Порівняльна характеристика методів моніторингу та контролю

Критерій	Методи моніторингу	Методи контролю
Мета	Спостереження, збір даних	Вплив на стан об'єкта для підтримки або корекції
Дія на об'єкт	Пасивна	Активна
Час реакції	Відображає стан у <u>реальному</u> часі або періодично	Миттєвий або близький до <u>реального</u> час реагування
Функція у системі	Джерело інформації для аналізу	Використання інформації для управління процесом
Тип реалізації	Автоматизований, ручний	Автоматизований, ручний, комбінований
Взаємозв'язок	Необхідний <u>для</u> контролю	Базується на результатах моніторингу
Приклади	Датчики температури, відеоспостереження, RFID, <u>облік</u> потоків покупців	Регулювання температури, управління освітленням, відкриття додаткових кас, сигналізація про відхилення

### Формалізація об'єкта моніторингу та контролю як кіберфізичної системи

З точки зору теорії систем супермаркет як КФС доцільно представити у вигляді кортежу виду 1:

$$CPS = \langle P, S, A, C, U \rangle, \quad (1)$$

де  $P$  – множина фізичних процесів (зберігання товарів, рух покупців, енергоспоживання);

$S$  – множина сенсорів і засобів збору даних;

$A$  – алгоритми обробки, аналізу та прогнозування;

$C$  – комунікаційна інфраструктура;

$U$  – підсистема управління та прийняття рішень.

## Потоки інформації в графі процесу моніторингу



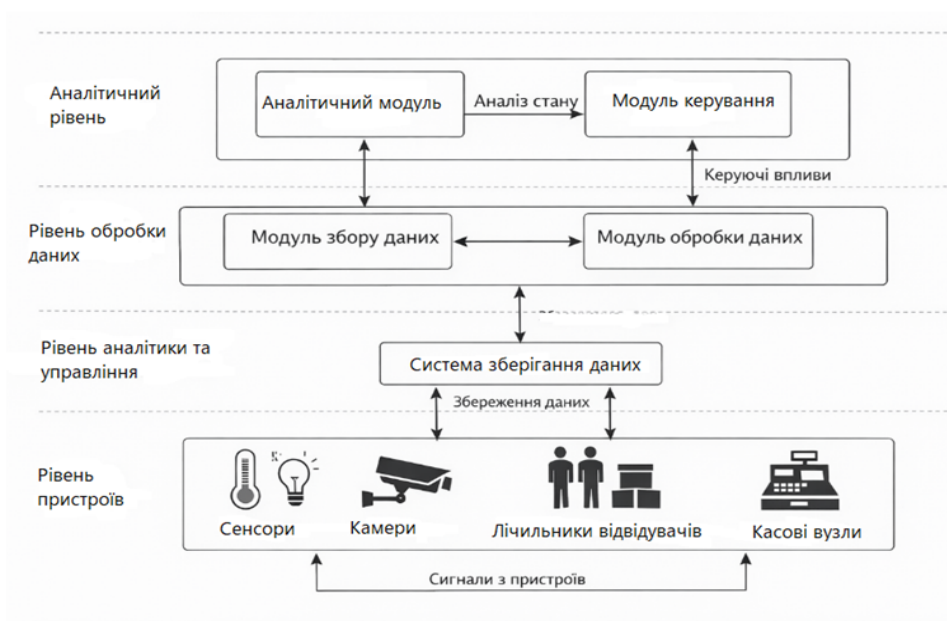
### Метод моніторингу й контролю системи супермаркету

1. Збір даних із сенсорних підсистем таких, як трафік покупців, температура в холодильних і складських зонах, рівень освітлення, наявність товарів на полицях та стан касових вузлів.
2. Обробка та фільтрація даних для усунення шумів, аномалій та затримок, що забезпечує отримання надійного оціненого стану.
3. Прогнозування стану на майбутній горизонт часу  $\Delta t$  на основі моделей потоків покупців та динаміки теплообміну, що формує прогностичний стан.
4. Формування єдиного моніторингового стану  $M(t)$ , який інтегрує реальні та прогностичні дані для всіх підсистем.
5. Адаптивне формування вагових коефіцієнтів для багатокритеріальної цільової функції залежно від прогностичного навантаження та поточного режиму супермаркету.
6. Прийняття керуючих рішень на основі оптимізації цільової функції та поширення керуючих впливів на підсистеми (освітлення, робота кас, ESL, температурний контроль).
7. Повторна оцінка стану у режимі реального часу та коригування керування відповідно до змін у середовищі.

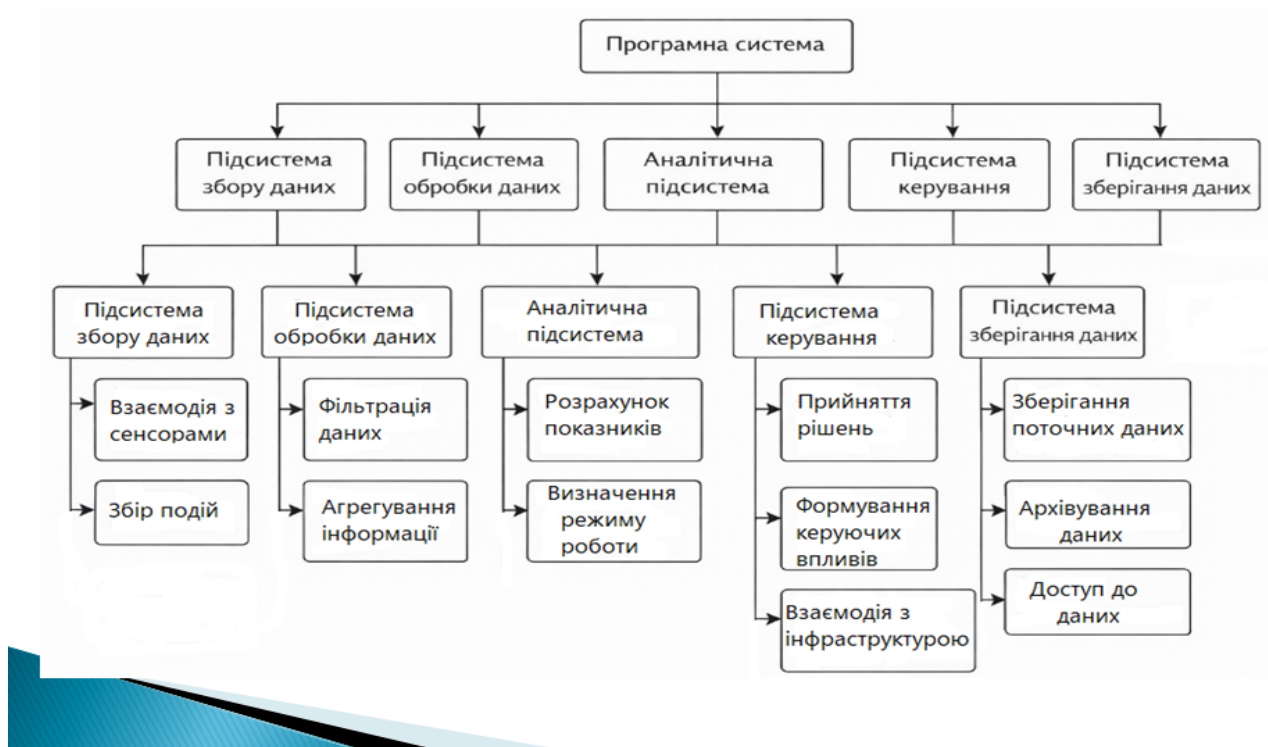
## Опис режимів функціонування системи

<u>Режим</u>	<u>Характеристика</u>	<u>Умова активації</u>	<u>Перехід до інших режимів</u>
<u>Нормальний</u>	Стабільна робота системи з передбачуваним навантаженням	Стандартні умови функціонування, допустимі значення всіх параметрів	<u>Піковий</u> (зростання навантаження) <u>Аварійний</u> (збій/відмова)
<u>Піковий</u>	Підвищене навантаження на підсистеми, інтенсивні потоки відвідувачів	Стійке зростання потоку покупців або перевищення порогів навантаження	<u>Нормальний</u> (стабілізація) <u>Аварійний</u> (критичні перевантаження)
<u>Аварійний</u>	Порушення функціонування, деградація або втрата даних, відмови обладнання	Збої сенсорів, відмова пристроїв, різке зростання невизначеності	<u>Нормальний</u> (після відновлення та перевірки)

## Архітектурна схема кіберфізичної системи моніторингу та контролю функціонування супермаркету



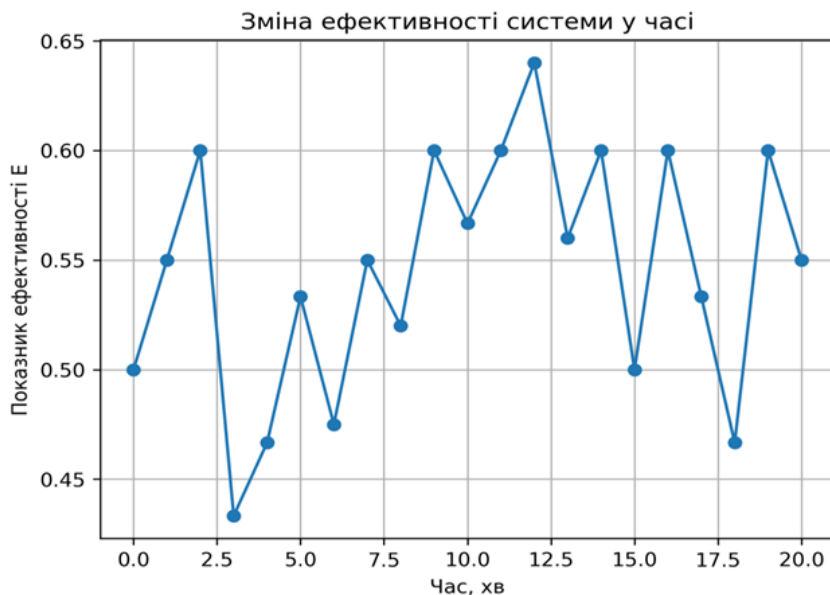
## Структура програмного забезпечення КФС моніторингу та контролю функціонування супермаркету



Таблиця 2 – Параметри експериментального моделювання

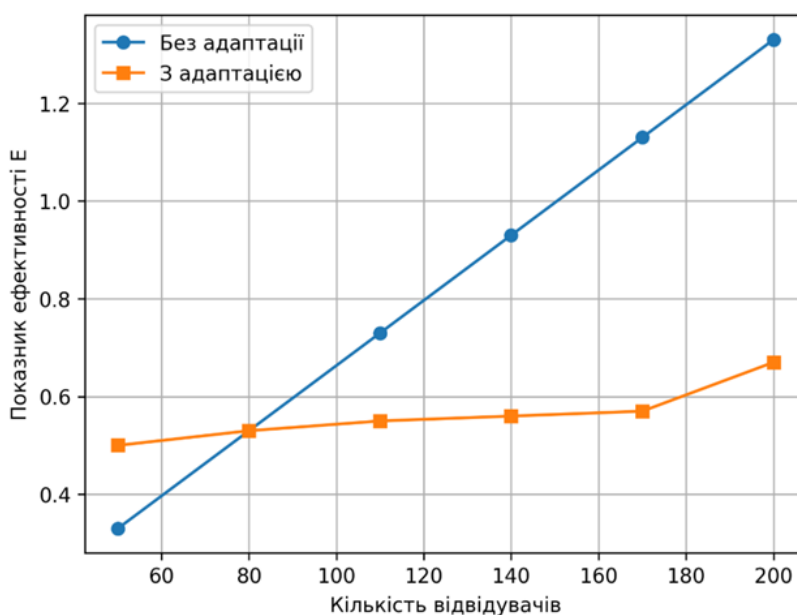
Параметр	Позначення	Діапазон значень
Кількість відвідувачів	$N$	50 – 80 осіб
Інтенсивність потоку	$\lambda$	0.5 – 2.5 осіб/хв
Кількість касових вузлів	$K$	2 – 6
Температура	$T$	18 – 25 °C
Освітленість	$L$	300 – 800 лк
Час реакції системи	$\tau$	1 – 5 с

## Динаміка зміни інтегрального показника ефективності функціонування кіберфізичної системи супермаркету у часі



Активация Wind

## Порівняння ефективності функціонування кіберфізичної системи супермаркету за умов відсутності адаптивного керування та при використанні запропонованого методу



- ▶ Запропонована архітектура забезпечує модульність, масштабованість та гнучкість системи, що дозволяє адаптувати її до змінних умов функціонування.
- ▶ Було сформовано інтегральний показник ефективності функціонування системи, який визначається як відношення корисного результату до витрат ресурсів. Це дозволило здійснити кількісну оцінку ефективності роботи системи у різних режимах.
- ▶ Проведені експериментальні дослідження, що включали моделювання нормального, пікового та аномального режимів роботи, показали, що запропонований метод забезпечує стабільне функціонування системи навіть за умов змінного навантаження. Отримані результати підтвердили здатність системи адаптивно реагувати на зміну кількості відвідувачів шляхом регулювання кількості активних касових вузлів.



Дякую за увагу!



**Протокол аналізу звіту подібності експертом**

Заявляю, що я ознайомився (-лась) з Повним звітом подібності, який був згенерований Системою виявлення і запобігання плагіату щодо роботи:

**Автор:** Олег ПУСТОВІТ

**Співавтор:**

**Назва:** Кіберфізична система моніторингу та контролю функціонування супермаркету

**Експерт:** Світлана САЧЕНКО

**Підрозділ:** Кафедра комп'ютерної інженерії та інформаційних систем

**Коефіцієнт подібності 1:**4.6%

**Коефіцієнт подібності 2:**2.2%

**Мікропробіли:** 135

**Заміна букв:** 1

**Інтервали:** 0

**Білі знаки:** 1

**Дата створення звіту:** 2026-04-01 20:30:50.0

**Після аналізу Звіту подібності констатую наступне:**

Запозичення, виявлені в роботі є законними і не є плагіатом. Рівень подібності не перевищує допустимої межі. Таким чином робота незалежна і приймається.

Запозичення не є плагіатом, але перевищено граничне значення рівня подібностей. Таким чином робота повертається на доопрацювання.

Виявлено запозичення і плагіат або навмисні текстові спотворення (маніпуляції), як передбачувані спроби укриття плагіату, які роблять роботу невідповідною вимогам законодавства (Ст. 32. ЗУ Про вищу освіту, пункт 3.1, Ст. 42. ЗУ Про освіту) та вимог НАЗЯВО (Критерій 5), а також кодексу етики і процедурам. Таким чином робота не приймається.

Обґрунтування:

2026-04-02

Дата

Доцент Андрій Нічепорук

експерт

**Anti-Plagiarism (<http://ap.km.ua>) v-15.701****Максимальне співпадіння з одним документом 0.0%****Словники перевірки: en\_US, ru\_RU, ua\_UA. Помилки в документах: 8%**

ID: 270146 Назва: МКР Кіберфізична система моніторингу та контролю функціонування супермаркету Додано в БД: 2026-04-02 Автора: Олег ПУСТОВІТ Керівники: Світлана САЧЕНКО Консультанти: Опоненти:	Документ		Сумарний збіг по Базі Даних	
	Символи	Лексеми	Символи	Лексеми
	157784	1076	1347 (1%)	18 (2%)

## Джерело плагіату

ID	Опис	Наявність плагіату в документі	
		Символи	Лексеми

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Здобувач: Олег ПУСТОВІТ

Тема: Кіберфізична система моніторингу та контролю функціонування супермаркету

Спеціальність: 123 «Комп'ютерна інженерія»

Обсяг кваліфікаційної роботи магістра:

Кількість листів креслень —; кількість сторінок записки 92

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень У роботі запропоновано кіберфізичну систему моніторингу та контролю функціонування супермаркету

2. Висновок про відповідність роботи дипломному завданню Кваліфікаційна робота магістра відповідає виданому завданню

3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень науки і техніки і передових методів роботи: У першому розділі проведено аналіз концепцій Industry 4.0 та Smart Infrastructure у ритейлі, виявлено обмеження існуючих рішень («інформаційні острови») та обґрунтовано необхідність КФС. У другому розділі формалізовано супермаркет як КФС, розроблено математичні моделі потоків покупців та адаптивного освітлення, описано інформаційні контури керування. У третьому розділі запропоновано метод адаптивного моніторингу з використанням трьох режимів роботи (нормальний, піковий, аварійний) та описано механізми обробки невизначеності даних. У четвертому розділі розроблено архітектурну схему ПЗ, проведено експериментальні дослідження, які підтвердили підвищення ефективності системи (середній показник  $M(t) = 0.86$ ) при використанні адаптивного підходу.

4. Позитивні сторони роботи: Запропонована система забезпечує узгоджену роботу супермаркету та покращення якості обслуговування покупців при оптимізації

енергетичних і експлуатаційних витрат шляхом інтеграції реального та прогнозного моніторингу всіх підсистем.

5. Негативні сторони роботи: В роботі не приділено достатньо уваги деталізації інтерфейсу для адміністративних користувачів

6. Оцінка графічного оформлення та пояснювальної записки роботи: =

7. Відгук про роботу в цілому: В загальному робота виконана на достатньому науково-професійному рівні.

8. Інші зауваження: =

9. Оцінка кваліфікаційної роботи магістра:

Розглянувши позитивні та негативні сторони представленої кваліфікаційної роботи магістра вважаю, що робота заслуговує оцінки «добре» 85.00 (В)

Рецензент (прізвище, ім'я, по батькові, посада, місце роботи) Мертвиш Валерія Володимирівна, д.т.н., проф., проф. каф. АІІТ та Р

"1" 05 2026р.



Зав. кафедри КПС  
д-р. філософії Ользі ПАВЛОВІЙ

Олег ПУСТОВІТ

ПІБ здобувача вищої освіти

ФІТ, 2 курсу, групи КІ2М-24-2

#### ЗАЯВА

З правилами чинного Положення про систему забезпечення академічної доброчесності у Хмельницькому національному університеті, згідно з яким виявлення академічного плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту і застосування заходів академічної відповідальності, ознайомлений (а). Про використання спеціалізованих програмних засобів (СПЗ) StrikePlagiarism та Anti-Plagiarism для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на наявність академічного плагіату оповіщений (а). Надаю університету право на передачу моєї роботи для обробки та збереження в базах даних СПЗ і використання роботи для виявлення академічного плагіату в інших роботах, які перевіряються СПЗ.

Також надаю свою згоду на обробку й збереження університетом моєї роботи в Інституційному репозитарії Хмельницького національного університету.

Робота надається для перевірки в електронному варіанті. Електронна версія моєї роботи збігається (ідентична) з друкованою.

1 травня 2026 року



РІШЕННЯ ЕКСПЕРТНОЇ КОМІСІЇ  
КАФЕДРИ КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ  
ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ

Підтверджуємо ознайомлення з результатом звіту подібності щодо роботи, генерованого системою виявлення текстових збігів/ідентичності/схожості:

Назва: Кіберфізична система моніторингу та контролю функціонування супермаркету

Автор: Пустовіт Олег Русланович

Спеціальність: 123 – Комп'ютерна інженерія

Освітня програма: освітньо-наукова

Науковий керівник: Саченко Світлана Іванівна, к.е.н, доцент

Після аналізу звіту подібності зроблено такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом. Робота приймається до захисту.	відповідає
2	Виявлені запозичення не є плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована. Відкоригований варіант має бути поданий на кафедру за 2 дні до захисту, разом із заявою щодо самостійності виконання письмової роботи та ідентичності друкованої та електронної версії роботи.	
3	Виявлені запозичення не є плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. В зв'язку з цим мета роботи та поставлені завдання не були досягнені. Робота може бути допущена до захисту (наступного року) після того як буде відкоригована та дорацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	
4	Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укриття запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	

Підтвердження:

Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом, оскільки:

- 1) усі запозичення фрагментарні, або мають належним чином оформленні посилання;
- 2) окремі виявлені збіги є загальноживаними фразами або виразами, про що свідчить посилання системи на збіг з джерелами на один фрагмент речення;
- 3) всі зафіксовані системою ознаки модифікації тексту відносяться до комбінування латинських символів із латинськомовними позначеннями в математичних формулах, що не є модифікацією тексту.

Сумарний обсяг всіх запозичень, визначений системою виявлення збігів/ідентичності/схожості StrikePlagiarism, складає 4.59% і адресується до 18 першоджерела; та системою Anti-Plagiarism складає 8%, що, з урахуванням наведених обґрунтувань, відповідає характеру наукового дослідження і свідчить на користь кваліфікаційної роботи.

Керівник роботи

С

Світлана САЧЕНКО

Гарант ОП

С

Олег САВЕНКО

Завідувач кафедри КІС

С

Ольга ПАВЛОВА