

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _____ Комп'ютерних наук _____
(повна назва)

Кафедра _____ Інформаційних управляючих систем _____
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

рівень вищої освіти _____ другий (магістерський) _____
Дослідження методів та моделей управління ІТ-проектом розробки
самоадаптивної інформаційної системи управління запасами компонентів
крові _____
(тема)

Виконав:

здобувач _____ 2 _____ року навчання,
групи _____ УПГІТм-24-1 _____

_____ Максим КАШУБА _____

(власне ім'я, прізвище)

Спеціальність _____ 122 Комп'ютерні науки _____
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми _____ освітньо-наукова _____
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма _____ Управління проектами в
галузі інформаційних технологій _____

Керівник _____ ст. викладач Катерина ЧИРКОВА _____
(посада, власне ім'я, прізвище)

Допускається до захисту

Завідувач кафедри _____ ІУС _____



(підпис)

_____ Костянтин ПЕТРОВ _____

(власне ім'я, прізвище)

2026 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _____ Комп'ютерних наук _____

Кафедра _____ Інформаційних управляючих систем _____

Рівень вищої освіти _____ другий (магістерський) _____

Спеціальність _____ 122 Комп'ютерні науки _____
(код і повна назва)

Тип програми _____ освітньо-наукова _____
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма _____ Управління проектами в галузі інформаційних технологій _____
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____  _____
(підпис)

« 06 » квітня 20 26 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві _____ Кашубі Максиму Дмитровичу _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи _____ Дослідження методів та моделей управління ІТ-проектом розробки самоадаптивної інформаційної системи управління запасами компонентів крові _____

затверджена наказом університету від 23 березня 2026 р. № 231Ст

2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії 20 травня 2026 р.

3. Вихідні дані до роботи _____ науково-технічні публікації, статті та інтернет-джерела що стосуються кваліфікаційної роботи; матеріали передатестаційної практики нормативна документація та стандарти з управління ризиками, вартістю та часом ІТ-проекту правові акти щодо організації роботи служби крові _____

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____ провести аналіз предметної області виконати постановку задач дослідження; дослідити основні методи та етапи управління ІТ-проектом розробки самоадаптивної системи; виконати експериментальну перевірку запропонованого підходу _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз предметної області	06.04.2026 – 10.04.2026	Виконано
2	Огляд існуючих методів та підходів	11.04.2026 – 13.04.2026	Виконано
3	Постановка задачі дослідження	14.04.2026 – 15.04.2026	Виконано
4	Формування вимог	16.04.2026 – 17.04.2026	Виконано
5	Розробка комплексного підходу	18.04.2026 – 24.04.2026	Виконано
6	Апробація результатів дослідження	25.04.2026 – 30.04.2026	Виконано
7	Аналіз результатів та сценарії впровадження	01.05.2026 – 05.05.2026	Виконано
8	Оформлення пояснювальної записки	06.05.2026 – 15.05.2026	Виконано
9	Оформлення графічних матеріалів	16.05.2026 – 20.05.2026	Виконано
10	Захист кваліфікаційної роботи	21.05.2026	Виконано

Дата видачі завдання 06 квітня 2026 р.

Здобувач 
(підпис)

Керівник роботи  ст. викладач Катерина ЧИРКОВА
(підпис) (посада, власне ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 116 с., 9 рис., 23 табл., 17 джерел.

ГІБРИДНИЙ МЕТОД, ЖИТТЄВИЙ ЦИКЛ ІТ-ПРОЄКТУ, ІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА, МЕТРИКИ ЕФЕКТИВНОСТІ, САМОАДАПТИВНА АРХІТЕКТУРА, УПРАВЛІННЯ ЗАПАСАМИ КОМПОНЕНТІВ КРОВІ, УПРАВЛІННЯ ІТ-ПРОЄКТАМИ, МАРЕ-К.

Об'єктом дослідження є процеси управління ІТ-проектами з розробки та впровадження самоадаптивної інформаційної системи (ІС) управління запасами компонентів крові.

Предметом дослідження є методології управління ІТ-проектами на різних стадіях життєвого циклу (ЖЦ) при застосуванні самоадаптивних архітектур.

Метою роботи є розробка гібридного методу управління ІТ-проектом впровадження самоадаптивної ІС управління запасами компонентів крові через визначення критерії успіху та метрик ефективності для кожної стадії ЖЦ ІТ-проекту.

У роботі проведено аналіз існуючих архітектур самоадаптивних систем, огляд підходів управління ІТ-проектами.

Наукова новизна полягає у створенні гібридного методу управління ІТ-проектом впровадження самоадаптивної ІС управління запасами компонентів крові.

Проведено апробацію методу та оцінено його ефективність. Запропоновано реалізацію гібридного методу управління ІТ-проектами.

Практичне значення роботи полягає в можливості впровадження розробленого методу для оптимізації процесів цифровізації служби крові.

ABSTRACT

Explanatory note of the qualification paper contains: 116 p., 9 fig., 23 tabl., 17 sources.

HYBRID METHOD, PROJECT LIFE CYCLE, INFORMATION SYSTEM, PERFORMANCE METRICS, SELF-ADAPTIVE ARCHITECTURE, BLOOD COMPONENT INVENTORY MANAGEMENT, IT PROJECT MANAGEMENT, MAPE-K.

The object of research is the IT project management processes for the development and implementation of a self-adaptive information system for blood component inventory management.

The subject of research is IT project management methodologies at different stages of the project life cycle when applying self-adaptive architectures.

The aim of the work is to develop a hybrid method for managing the IT project of implementing a self-adaptive information system for blood component inventory management by defining success criteria and performance metrics for each stage of the IT project life cycle.

The work includes an analysis of existing self-adaptive system architectures and a review of IT project management approaches.

The scientific novelty consists in the development of a hybrid method for managing the IT project of implementing a self-adaptive information system for blood component inventory management.

The method was validated and its effectiveness was assessed. An implementation of the hybrid IT project management method is proposed.

The practical significance of the work lies in the possibility of implementing the developed method to optimize the digitalization processes of the blood service.

ЗМІСТ

	С.
Скорочення та умовні позначки.....	8
Вступ.....	9
1 Аналіз предметної області та постановка задачі дослідження	10
1.1 Аналіз процесів управління запасами компонентів крові	10
1.2 Аналіз архітектурних підходів побудови ІС управління запасами	13
1.3 Самоадаптивна архітектура та її значення для предметної області	15
1.4 Концепція самоадаптивного підходу на основі патерну MARE-K.....	15
1.5 Порівняльний аналіз архітектурних підходів ІС управління запасами компонентів крові.....	18
1.6 Аналіз підходів управління ІТ-проектами впровадження самоадаптивних систем управління кров'ю.....	22
1.7 Постановка задачі дослідження.....	29
2 Розробка гібридного методу управління ІТ-проектом впровадження самоадаптивної ІС управління запасами компонентів крові.....	31
2.1 Вимоги до ІТ-проекту розробки самоадаптивної системи управління запасами компонентів крові	31
2.2 Управління ризиками, вартістю і часом гібридного методу управління ІТ-проектом впровадження самоадаптивної ІС управління запасами компонентів крові	34
2.3 Метрики оцінювання ефективності ІС управління запасами компонентів крові та розрахунок результативності підходу.....	36
2.4 Особливості управління ІТ-проектом впровадження самоадаптивної ІС на кожній стадії ЖЦ	44
2.5 Розробка методу управління за стадіями ЖЦ ІТ-проекту	48
3 Апробація гібридного методу на прикладі ІТ-проекту впровадження самоадаптивної ІС управління запасами компонентів крові.....	49

3.1 Ієрархічна структура робіт ІТ-проєкту	49
3.2 Функціональна структура системи МАРЕ-К та метод управління ІТ- проєктом	53
3.3 План тестування самоадаптивної ІС управління запасами компонентів крові.....	58
3.4 Календарний план-графік ІТ-проєкту	62
3.5 Застосування гібридного методу управління ІТ-проєктом впровадження самоадаптивної ІС управління запасами компонентів крові за стадіями ЖЦ	63
3.6 Особливості впровадження та експлуатації ІС управління запасами компонентів крові.....	66
4 Апробація результатів дослідження	68
4.1 Проведення апробації	68
4.2 Ітераційне застосування гібридного методу управління ІТ-проєктом впровадження самоадаптивної ІС управління запасами компонентів крові в процесі розробки системи.....	76
4.3 Порівняльний аналіз ефективності гібридного методу управління ІТ- проєктом впровадження самоадаптивної ІС управління запасами компонентів крові.....	77
4.4 Можливості масштабування та адаптації в інших ІТ-проєктах галузі..	80
4.5 Обмеження апробації та напрямки подальшого розвитку.....	82
4.6 Наукова новизна	85
Висновки.....	88
Перелік джерел посилання	90
Додаток А Вихідний код ІТ-проєкту.....	Error! Bookmark not defined.
Додаток Б Графічний матеріал кваліфікаційної роботи	Error! Bookmark not defined.

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

ЕСОЗ – електронна система охорони здоров'я

ЖЦ – життєвий цикл

ІС – інформаційна система

ІТ – інформаційні технології

НДР – науково-дослідна робота

API – Application Programming Interface (програмний інтерфейс застосунку)

EMV – Expected Monetary Value (очікувана грошова вартість)

FHIR – Fast Healthcare Interoperability Resources (стандарт інтероперабельності медичних даних HL7)

IPMA – International Project Management Association (Міжнародна асоціація управління ІТ-проєктами)

KPI – Key Performance Indicators (ключові показники ефективності)

MAPE-K – Monitor-Analyze-Plan-Execute-Knowledge (архітектурний патерн самоадаптивних систем)

ML – Machine Learning (машинне навчання)

PM – Project Manager (керівник ІТ-проєкту)

RUP – Rational Unified Process (раціональний уніфікований процес)

UML – Unified Modeling Language (уніфікована мова моделювання)

WBS – Work Breakdown Structure

ВСТУП

ІС управління запасами компонентів крові є елементом критичної медичної інфраструктури, що безпосередньо впливає на збереження життів пацієнтів при масивних кровотечах та хірургічних втручаннях. Порушення функціонування таких ІС можуть спричинити дефіцит компонентів крові у критичних ситуаціях. Компоненти крові мають суттєво обмежений термін придатності, що робить управління запасами компонентів крові вкрай чутливим до затримок. Автоматизація процесів вимагає підтримання належного рівня запасів компонентів крові. Вирішенням зазначених проблем може бути розробка та впровадження самоадаптивної ІС управління запасами компонентів крові.

Управління ІТ-проєктами із впровадження самоадаптивної ІС управління запасами компонентів крові є складною задачею, що потребує інтеграції традиційних методологій управління ІТ-проєктами зі специфікою інноваційних моделей створення систем з архітектурою самоадаптивних систем та специфічних архітектурних підходів, що забезпечують автономну реакцію системи на зміну умов експлуатації.

Впровадження адаптивних архітектур в структуру ІС управління запасами компонентів крові дозволить суттєво підвищити ефективність управління завдяки автоматизації процесів моніторингу поточного стану запасів, аналізу динаміки використання та планування оптимальних обсягів потреби в компонентах крові.

Кваліфікаційна робота виконується згідно з державними стандартами та методичними вказівками щодо розробки та оформлення кваліфікаційної роботи другого (магістерського) рівня вищої освіти [1, 2]

1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Аналіз процесів управління запасами компонентів крові

Сучасна українська система служби крові, успадкувавши застарілу інформаційну інфраструктуру з низьким рівнем автоматизації, наразі проходить етап трансформації [3]. Впродовж десятиліття система служби крові робить спроби впровадження ефективної масштабованої ІС управління запасами компонентів крові з можливістю інтеграції в національну систему, однак стикається зі складнощами адаптації ІС до діючого законодавства та динамічних умов зміни потреби в компонентах крові, необхідністю миттєвого перерозподілу обмежених запасів в умовах воєнного стану при масових пораненнях та порушеннях логістичних ланцюгів постачання. Дослідження в галузі управління запасами компонентів крові переважно зосереджені на логістичній оптимізації та ресурсозбереженості в системі крові. За даними аналітично-статистичного довідника МОЗ України [4], упродовж 2018–2021 років кількість закладів служби крові скоротилася з 411 до 278 у зв'язку з реформуванням. У 2021 році в Україні заготовлено 225 577,9 л крові – на 8,8% менше, ніж у 2018-му. При цьому обсяг компонентів крові, списаної через закінчення терміну зберігання, становив 6 211,2 л (порівняно з 9 622,9 л у 2018 році), що свідчить про повільне покращення ситуації, але не вирішення проблеми надлишкового виробництва відносно фактичного попиту на компоненти крові. Відсоток браку крові за серологічними маркерами залишається стабільним і становить близько 1,1%, тоді як основні втрати зумовлені саме неточним прогнозуванням, а не якістю заготівлі.

Складна та динамічна природа управління запасами компонентів крові, особливо в умовах воєнного стану, вимагає переходу від традиційних жорстко детермінованих систем до систем, здатних до автономного підлаштування. У цьому контексті доцільним є введення поняття «самоадаптивна ІС».

Самоадаптивна архітектура – це підхід до ІТ-проєктування програмного забезпечення, який наділяє інформаційну систему здатністю автономно змінювати свою поведінку або структуру під час виконання у відповідь на зміни у зовнішньому середовищі (наприклад, раптові сплески попиту на компоненти крові) або у самій системі (наприклад, збої в роботі окремих датчиків чи серверів), з метою підтримки або покращення заданих показників ефективності зокрема, мінімізації списань компонентів крові через сплив терміну придатності при гарантуванні безперервного задоволення медичних потреб.

Біловол та Князькова [5] акцентують на критичному стані інфраструктури системи крові, що потребує модернізації. Звіт МОЗ України щодо стану донорства [6] надає кількісну оцінку зростання потреб у компонентах крові в умовах воєнного стану.

Відповідно до Постанови КМУ №681 від 30 червня 2023 року «Про задоволення потреб сил безпеки та сил оборони у донорській крові та компонентах крові в умовах воєнного стану» [7] медичні підрозділи сил безпеки та оборони повинні мати гарантований доступ до компонентів крові, але нема визначення технологічних механізмів для динамічної адаптації до змін оперативної обстановки, що особливо критично в умовах активних бойових дій та періодичних масових ракетних обстрілів, терористичних атак цивільного населення.

Доцільно розглянути поточний стан процесів управління запасами компонентів крові в Україні. На даний час цей процес включає багаторівневу систему координації між суб'єктами системи крові (центрами крові), регіональними координаторами та медичними установами, що представлена на рисунку 1.1. Типовий процес обробки заявки на компоненти крові починається з формування запиту медичною установою на основі планових операцій, цей запит передається у паперовій формі або через телефонний дзвінок регіональному координатору служби крові, при відсутності необхідних компонентів координатор звертається до Координаційного центру

трансплантації органів, тканин і клітин для пошуку ресурсів в інших регіонах без монолітної бази даних про наявність запасів у реальному часі вручну без автоматичного планування маршрутів та відстеження холодового ланцюга під час транспортування.

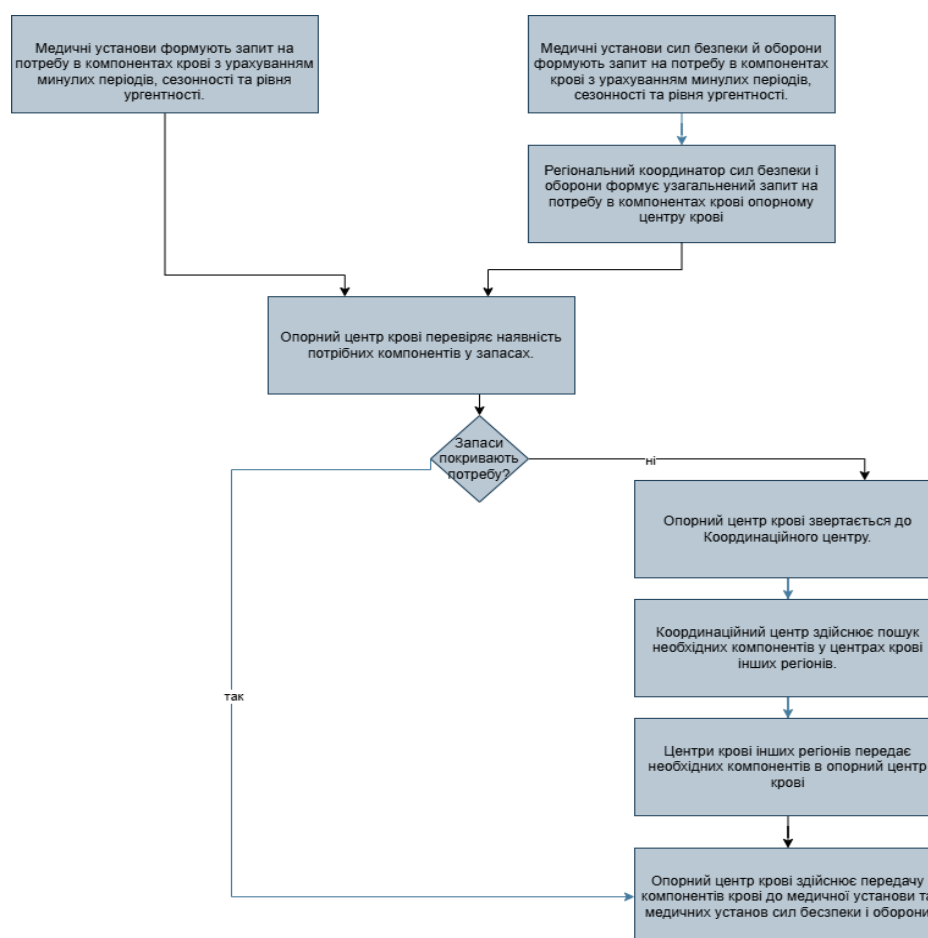


Рисунок 1.1 – Блок-схема процесу управління запасами компоненти крові

З огляду на виявлені недоліки існуючих процесів управління запасами компонентів крові, низка наукових робіт [8] демонструє ефективність застосування автономних обчислювальних методів до управління складними розподіленими системами. Особливу увагу приділяють питанням інтеграції компонентів машинного навчання [9], оснащених передовими алгоритмами ML, здатними забезпечити високу точність прогнозування для короткострокових прогнозів потреби в компонентах крові. Сучасна система

служби крові потребує впровадження автоматизованих самоадаптивних ІС, здатних функціонувати в умовах високої невизначеності динамічного попиту на компоненти крові.

Саме тому актуальною задачею є управління ІТ-проектом створення самоадаптивної ІС управління запасами компонентів крові з чітким визначення архітектурного патерну.

1.2 Аналіз архітектурних підходів побудови ІС управління запасами

Доцільно обґрунтувати вибір архітектурного підходу, здатного забезпечити самоадаптивну поведінку системи в умовах динамічних змін попиту на компоненти крові.

Для служби крові впровадження самоадаптивного підходу є критично важливим, оскільки компоненти крові мають суворо обмежений термін придатності. Статичне планування обсягів компонентів крові призводить до двох крайнощів: або до дефіциту в критичний момент, або до масового списання компонентів через закінчення терміну придатності. Самоадаптивна система здатна вирішити цю проблему шляхом безперервного балансування ресурсів, що дозволяє скоротити рівень списання компонентів майже до нуля без підвищення ризику їх дефіциту для пацієнтів.

Серед поширених архітектурних підходів побудови самоадаптивних ІС управління запасами компонентів крові є реактивна, проактивна архітектура, самоадаптивна архітектура. Порівняльний аналіз зазначених архітектур за характеристиками: час реакції, адаптивність, можливість використання знань, архітектурна гнучкість, прийняття рішень, придатність для критичних умов та еволюція поведінки системи наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Порівняльний аналіз реактивної, проактивної, самоадаптивної архітектур за ключовими критеріями

Характеристика	Реактивна архітектура	Проактивна архітектура	Самоадаптивна архітектура
Час реакції	Після виникнення події	Згідно з наперед заданими сценаріями	Динамічне реагування та прогнозування майбутніх змін
Адаптивність	Низька	Обмежена сценаріями	Висока – безперервний цикл самоаналізу та саомодифікації
Використання знань	Відсутнє	Частково	монолітне сховище знань (Knowledge), машинне навчання
Архітектурна гнучкість	Статична логіка	Залежна від сценаріїв	Розділення обов'язків, вільний зв'язок, висока згуртованість
Прийняття рішень	Монолітне або ручне	Монолітне	Децентралізоване з глобальною координацією через Knowledge
Придатність для критичних умов	Низька	Обмежена	Висока – здатність до автономної адаптації
Еволюція поведінки системи	Відсутня	Обмежена	Постійне вдосконалення на основі історичних даних та ефективності рішень

Порівняльний аналіз засвідчує, що самоадаптивна архітектура є найбільш придатною для побудови ІС управління запасами компонентів крові завдяки здатності до динамічного реагування, використанню централізованого сховища знань та безперервному вдосконаленню на основі історичних даних.

1.3 Самоадаптивна архітектура та її значення для предметної області

Відмінність самоадаптивного підходу від традиційних (реактивних) ІС полягає у наявності замкненого циклу управління, так званого зворотного зв'язку. Замість того, щоб чекати втручання медичної сестри або лікаря для перерозподілу запасів компонентів крові (як це відбувається у існуючих системах), самоадаптивна система постійно моніторить стан запасів, за допомогою алгоритмів машинного навчання аналізує тренди і виявляє аномалії, автономно формує оптимальний план розподілу або замовлення нових компонентів і виконує його через інтегровані Application Programming Interface (API), спираючись на накопичену базу знань.

1.4 Концепція самоадаптивного підходу на основі патерну MAPE-K

Реалізація замкненого циклу управління, описаного у попередньому підрозділі, вимагає чіткої структурної організації компонентів системи та формалізованих правил їх взаємодії. Без такої організації адаптивна поведінка системи залишається непередбачуваною: окремі компоненти можуть реагувати на зміни середовища незалежно одне від одного, що призводить до конфліктних управлінських рішень і нестабільності роботи в умовах динамічного попиту.

Реалізація такої архітектури вимагає структурованого підходу до організації компонентів системи та механізмів їхньої взаємодії. Однією з найбільш перспективних методик є застосування архітектурного патерну MAPE-K, який поєднує централізоване управління знаннями з децентралізованим прийняттям рішень. На відміну від традиційних адаптивних підходів, що зазвичай працюють у межах окремих компонентів,

патерн MAPE-K забезпечує чітко структурований цикл адаптації Monitor – Analyze – Plan – Execute [10, 11], що дозволяє системі реагувати на зміни попиту без втручання оператора.

MAPE-K представляє собою архітектурний патерн, що визначає структурну організацію самоадаптивних систем через виділення п'яти основних компонентів (Monitor, Analyze, Plan, Execute, Knowledge) та їх взаємодію, що показано на рисунку 1.2.

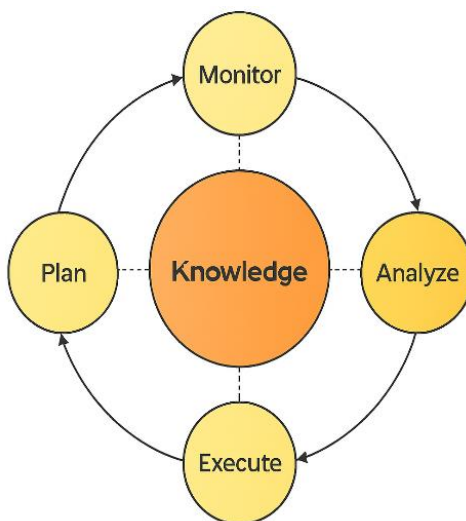


Рисунок 1.2 – Структура архітектурного патерну MAPE-K

Monitor компонент забезпечує безперервний збір даних про стан системи через мережу розподілених точок моніторингу. Компонент відстежує рівні запасів компонентів крові у реальному часі, моніторить швидкість споживання різних типів компонентів, здійснює автоматичну валідацію отриманих даних та фільтрацію аномальних значень. Практична реалізація моніторингу базується на інтеграції з існуючими медичними ІС через стандартні протоколи обміну даними.

Analyze компонент використовує методи машинного навчання та статистичного аналізу для виявлення закономірностей у споживанні компонентів крові. Компонент генерує прогнози потреб на різні часові

горизонти, виявляє аномалії та нетипові патерни споживання, оцінює ймовірність дефіциту або списання компонентів крові та генерує попередження про потенційні проблеми.

Plan компонент генерує оптимальні стратегії управління ресурсами на основі результатів аналізу, використовуючи ієрархічний підхід до планування: стратегічний рівень для довгострокового планування запасів, тактичний – для середньострокового розподілу ресурсів та оперативний – для негайного реагування на критичні ситуації. Компонент інтегрований з модулем управління ризиками, який генерує альтернативні плани для різних сценаріїв розвитку подій.

Execute компонент забезпечує автоматичне виконання запланованих дій через координацію з операційними системами, оптимізує логістичні операції та синхронізує дії між учасниками ланцюга постачання. Компонент використовує механізми робочого процесу для оркестрації багатоетапних процесів та включає модуль управління винятковими ситуаціями, який автоматично активує резервні плани при виявленні проблем. Усі виконані дії фіксуються у структурованому журналі подій і передаються до

Knowledge-бази, що забезпечує повну простежуваність кожного управлінського рішення. Це є необхідною умовою як для аудиту в медичному контексті, так і для подальшого донавчання ML-моделей компонента Analyze. Knowledge база зберігає накопичені знання про поведінку системи, історичні дані, правила прийняття рішень та навчені моделі. База включає онтології предметної області для семантичного розуміння медичних процесів, модуль управління моделями машинного навчання з версіонуванням та модуль пояснення рішень, що генерує зрозумілі обґрунтування для прийнятих рішень – це критично важливо для медичної галузі.

Призначення кожного з розглянутих компонентів узагальнено у таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Функціональні компоненти патерну MAPE-K

Компонент	Функції
Monitor	Збір даних про стан системи та навколишнє середовище
Analyze	Аналіз зібраних даних для виявлення патернів та аномалій
Plan	Розробка стратегій адаптації на основі аналізу
Execute	Реалізація запланованих змін у системі
Knowledge	Зберігання знань, історії адаптацій та підтримка навчання системи

Описані компоненти утворюють замкнений цикл адаптації, що забезпечує автономне реагування системи на зміни попиту на компоненти крові без втручання оператора. Визначені переваги MAPE-K архітектури обґрунтовують доцільність її застосування для побудови самоадаптивної ІС управління запасами компонентів крові.

1.5 Порівняльний аналіз архітектурних підходів ІС управління запасами компонентів крові

Сучасна практика автоматизації управління донорською кров'ю в Україні демонструє перехід від паперового обліку до цифровізації, проте обидва рішення мають суттєві обмеження в контексті самоадаптивних систем.

Інформаційно-комунікаційна система «єКров», попри свою роль як єдиного державного реєстру, наразі функціонує як жорстко детермінована система [12]. Її архітектура не передбачає автономного циклу MAPE-K. Основна проблема самоадаптації «єКров» полягає в інтеграційних бар'єрах: через відсутність повної синхронізації з електронною системою охорони здоров'я (ЕСОЗ) у реальному часі система не може автономно оцінювати стан здоров'я донора або валідність донації без втручання оператора. Це робить систему реактивною – вона лише фіксує події, що вже відбулися, замість того,

щоб адаптувати логістичні ланцюги до раптових змін попиту на компоненти крові (наприклад, масових медичних евакуацій).

Платформа «ДонорUA», хоча й володіє більшою гнучкістю у залученні донорів, стикається з проблемою невизначеності зворотного зв'язку [13]. У термінах самоадаптивних систем це означає неможливість точного моніторингу середовища: система не отримує автоматичного підтвердження факту донації з медичних установ. Як наслідок, алгоритми рекрутингу не можуть самостійно адаптуватися – вони продовжують генерувати запити на кров, навіть якщо критичну потребу вже закрито, що призводить до «перенасичення» інформаційного поля та зниження ефективності відгуку донорів у майбутньому.

Спільним недоліком обох рішень є відсутність інтелектуальних механізмів предиктивного аналізу та динамічної адаптації. У ситуаціях обмежених ресурсів (наприклад, дефіцит рідкісної групи крові при одночасних запитах від цивільних та військових госпіталів) системи не мають закладених алгоритмів самоадаптивної пріоритезації, покладаючись виключно на ручне управління.

Таким чином, існуючі рішення є статичними інструментами обліку та комунікації. Вони не забезпечують комплексної самоадаптивної поведінки, яка б дозволяла системі автономно оптимізувати розподіл ресурсів в умовах динамічного середовища війни, де критично важливим є перехід від ручного адміністрування до автоматизованого інтелектуального реагування. Відсутність механізмів прогнозування попиту, автоматичної оптимізації розподілу ресурсів та самоадаптивної поведінки системи в умовах динамічних змін зумовлює актуальність розробки нового архітектурного рішення. Виявлені недоліки зумовлюють необхідність аналізу існуючих архітектурних рішень ІС управління запасами компонентів крові для визначення можливих шляхів їх подолання. Наведено опис ІС управління запасами компонентів крові з точки зору різних архітектурних рішень: монолітних, мікросервісних, гібридних, а також самоадаптивних підходів на основі патерну MAPE-K [14].

IC BloodNet використовує монолітну архітектуру з єдиною базою даних Oracle та веб-інтерфейсом на базі Java Enterprise Edition. Система обслуговує понад 2600 лікарень у США та обробляє близько 6,8 мільйонів донцій щорічно. Архітектура включає модуль управління донорами, систему обробки замовлень, модуль відстеження якості, систему звітності та логістичний модуль. Перевагами BloodNet є висока надійність завдяки перевіреним технологіям, централізоване управління даними та стандартизовані процеси обробки замовлень. Водночас суттєвими недоліками є відсутність автоматичного прогнозування попиту на компоненти крові, статичні алгоритми розподілу ресурсів та час реакції на зміни попиту 4–6 годин через необхідність ручного втручання операторів. Монолітна архітектура створює єдину точку відмови – при збоях усі підключені лікарні втрачають доступ до координації постачання крові.

IC Hemobank, впроваджена в Бразилії, використовує мікросервісну архітектуру з окремими сервісами для управління донорами, обробки замовлень, логістики та аналітики. Взаємодія між сервісами забезпечується через Apache Kafka та REST API. Система демонструє високу масштабованість (понад 50 000 запитів на годину) та незалежне розгортання компонентів. Проте складність управління розподіленою системою призводить до проблем з консистентністю даних, особливо при обробці критичних замовлень на компоненти крові з коротким терміном придатності.

Німецька система BloodTrack використовує гібридну архітектуру, що поєднує централізовані компоненти для критичних операцій з мікросервісними модулями для аналітики та звітності. Система інтегрована з RFID-технологіями та використовує SAP HANA для обробки великих обсягів даних, забезпечуючи високу продуктивність (до 10 000 операцій на секунду). Однак система не має вбудованих механізмів самоадаптації та вимагає значних інвестицій у SAP-інфраструктуру.

Порівняльний аналіз описаних IC наведено в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Порівняльний аналіз архітектурних систем управління запасами компонентів крові за ключовими критеріями

Критерій	BloodNet (США)	Hemobank (Бразилія)	BloodTrack (Німеччина)
Архітектурний стиль	Монолітна	Мікросервісна	Гібридна
Технологічний стек	Oracle DB, Java EE	Spring Boot, Node.js, Python, Kafka	SAP HANA, RFID
Рівень автоматизації	Середній (60%)	Високий (85%)	Високий (90%)
Адаптивність до змін попиту на компоненти крові	Низька (4-6 год)	Середня (1-2 год)	Середня (1-3 год)
Прогнозування попиту на компоненти крові	Статистичне (історичні дані)	ML-базоване (обмежене)	Аналітичне (SAP HANA)
Інтеграція між пов'язаними установами	Монолітна через єдину БД	API-based асинхронна	Монолітна з розподіленою аналітикою
Відмовостійкість	Низька (SPOF)	Висока (розподілена)	Середня
Вартість впровадження	\$2-3М	\$1.5-2М	\$5-7М
МАРЕ-К патерни	Відсутні	Частково (Monitor, Execute)	Відсутні

Проведений порівняльний аналіз свідчить, що монолітна архітектура BloodNet забезпечує високий рівень контролю даних, але створює критичну залежність від центральної інфраструктури. Мікросервісна архітектура Hemobank підвищує відмовостійкість, проте ускладнює забезпечення консистентності даних. Гібридна архітектура BloodTrack поєднує переваги обох підходів, але не має механізмів самоадаптації. Критичним недоліком усіх розглянутих систем є відсутність повноцінного циклу МАРЕ-К – лише Hemobank частково реалізує компоненти Monitor та Execute. Це обґрунтовує необхідність розробки спеціалізованої архітектури на основі МАРЕ-К для

систем управління запасами компонентів крові.

МАРЕ-К патерн забезпечує динамічну адаптацію системи до змінних умов експлуатації і може бути інтегрований у різні архітектурні стилі інформаційних систем: мікросервісні, монолітні, гібридні доповнюючи їх самоадаптивними можливостями.

Самоадаптивна архітектура вирішує фундаментальну проблему статичного планування, характерну для традиційних систем управління кров'ю. Традиційна монолітна система передбачає, що всі рішення приймаються координаційним органом суб'єктів системи крові та спускаються вниз через ієрархічну структуру до медичних підрозділів сил безпеки і оборони. Навіть при географічному розподілі, коли медичні підрозділи сил безпеки і оборони розкидані по території поряд із суб'єктами системи крові, проблема статичності залишається, якщо маршрути та правила взаємодії не змінюються.

Визначені переваги МАРЕ-К архітектури обґрунтовують доцільність її застосування для побудови самоадаптивної ІС управління запасами компонентів крові.

1.6 Аналіз підходів управління ІТ-проектами впровадження самоадаптивних систем управління кров'ю

Питання застосування самоадаптивних архітектур для автоматизації управління запасами крові, а також специфіка управління ІТ-проектами впровадження МАРЕ-К архітектури в системах управління запасами крові залишаються недостатньо вивченими. Аналіз публікацій свідчить про відсутність комплексних досліджень, що розглядають специфіку управління ІТ-проектами впровадження МАРЕ-К архітектури в системах управління запасами компонентів крові. Існуючі роботи або фокусуються виключно на

технічних аспектах архітектури, або розглядають загальні питання управління ІТ-проектами без урахування особливостей розробки та впровадження самоадаптивних систем. Це свідчить про необхідність формування спеціалізованого підходу, що враховував би одночасно технічну складність системи та організаційні особливості медичної галузі.

Критично важливим є застосування науково обґрунтованої методології управління ІТ-проектами під час створення ІС. У роботах І. Кононенка та А. Харазій [15] доведено, що вибір підходу до управління ІТ-проектом має ґрунтуватися на багатокритеріальній оптимізації за показниками якості, ризику та вартості; водночас технологія синтезу методологій, розроблена І. Кононенком та С. Луценком, дозволяє формувати адаптовані методи до управління ІТ-проектами залежно від специфіки об'єкта розробки [16]. Зазначені підходи підкреслюють, що універсальних рішень у цій сфері не існує – кожен ІТ-проект вимагає індивідуально підібраного інструментарію управління. Це створює базу для формування специфічного підходу в управлінні ІТ-проектами із впровадження самоадаптивних систем. Жодна класична методологія не покриває комплекс вимог до ІТ-проекту впровадження самоадаптивної ІС управління запасами компонентів крові у чистому вигляді [17].

Scrum забезпечує ітеративну розробку зі зворотним зв'язком через спринти тривалістю 1–4 тижні, проте не має обов'язкових регуляторних контрольних точок між стадіями, що є критичним для медичного програмного забезпечення. Kanban ефективний для візуалізації потоку робіт та управління навантаженням, але позбавлений механізмів фазового контролю та формалізованого управління ризиками.

Rational Unified Process (RUP) пропонує структурований підхід з фазами та ітераціями, проте не передбачає ролей медичної верифікації та не адаптований до специфіки прогнозування потреби в компонентах крові в умовах воєнного стану.

Специфіка предметної області висуває вимоги, які виходять за межі

будь-якої окремої методології: критична ціна помилки, вимоги відмовостійкості, регуляторний контроль відповідності медичним стандартам, безпека критичної інфраструктури та обмежений термін придатності компонентів крові. На основі аналізу альтернативних методологій виникає необхідність поєднувати:

- жорсткі механізми контролю якості (контрольні точки між стадіями);
- ітеративну розробку в рамках фіксованого базису за принципами Scrum;
- формалізовані процедури управління ризиками згідно зі стандартом ISO 31000.

Крім цього, управління сучасними ІТ-проєктами базується на декількох провідних методологіях, кожна з яких відображає певну філософію управління та пропонує специфічний інструментарій. Вибір між ними зумовлюється не лише технічними характеристиками проєкту, а й організаційною зрілістю команди, регуляторним середовищем та ступенем невизначеності вимог на початкових стадіях.

Для вибору найбільш відповідних методик необхідно розглянути чотири ключові методи, що домінують у світовій практиці ІТ-управління, виявити їх сильні сторони та обмеження в контексті розробки самоадаптивної медичної ІС.

PMBOK (Project Management Body of Knowledge) – стандарт Американського інституту управління ІТ-проєктами (PMI) 8-го видання. Цей стандарт описує 49 процесів управління ІТ-проєктами, організованих у 10 областях знань: управління інтеграцією, змістом, розкладом, вартістю, якістю, ресурсами, комунікаціями, ризиками, закупівлями та стейкхолдерами. PMBOK є процесно-орієнтованим методом і надає деталізовані методики для кожної з областей. Для управління ризиками PMBOK пропонує структуровану шестиетапну процедуру: планування управління ризиками, ідентифікація, якісний аналіз, кількісний аналіз (у т.ч. EMV-аналіз), планування реагування та моніторинг. Для оцінки вартості – аналогова оцінка, параметрична оцінка

та оцінка знизу-вгору. Для планування часу – підхід критичного шляху, техніку PERT та різні види діаграм розкладу. Сильна сторона PMBOK – найбільш структуровані та систематизовані методики для трьох ключових областей, що критично важливо для медичної ІС. Застосування PMBOK дозволяє мінімізувати ризики відхилення від регуляторних вимог завдяки чітко визначеним процедурам документування та контролю на кожному етапі. Обмеження – порівняно низька адаптивність: зміни вимог потребують перепланування.

PRINCE2 – методологія, розроблена Кабінетом Міністрів Великобританії. PRINCE2 організовує ІТ-проект через 7 тем (бізнес-кейс, організація, якість, плани, ризики, зміни, прогрес) та 7 принципів. Ключовою відмінністю є орієнтація на бізнес-виправдання: ІТ-проект продовжується лише доти, доки він залишається доцільним з точки зору бізнесу. PRINCE2 структурує ІТ-проект у контрольовані стадії з контрольними стадіями – контрольними точками для прийняття рішення про продовження. Сильна сторона – концепція контрольних точок ІТ-проекту, яка ідеально відповідає вимогам регуляторних gate-перевірок між стадіями медичного ІТ-проекту. Обмеження – методологія менш деталізована у питаннях конкретних методик оцінки ризиків та вартості порівняно з PMBOK.

Agile – гнучка методологія ітеративної розробки, що базується на Agile Manifesto та орієнтована на безперервне постачання цінності замовнику через короткі цикли зворотного зв'язку. Scrum організовує роботу у спринти тривалістю 1–4 тижні з фіксованим набором подій: планування спринту, щоденні наради, огляд і ретроспектива. Трудомісткість оцінюється через відносну складність задач, а швидкість команди використовується для прогнозування термінів. Для ІТ-проектів із самоадаптивними системами Agile є природним вибором на рівні організації розробки: ітеративний підхід добре узгоджується з необхідністю поступового налаштування алгоритмів прогнозування та бази знань, які не можна повністю специфікувати наперед. Водночас Agile у чистому вигляді не забезпечує обов'язкових регуляторних

перевірок між стадіями та формалізованих процедур управління ризиками, що є критичною вимогою для медичного програмного забезпечення.

Міжнародна асоціація управління ІТ-проєктами розробила компетентнісний підхід, описаний у четвертому виданні Individual Competence Baseline. На відміну від процесно-орієнтованих методологій, він акцентує увагу не на стандартизованих процесах, а на компетенціях особистості керівника ІТ-проєкту та команди у трьох сферах: люди, практики та перспектива.

Для ІТ-проєктів у медичній галузі особливо цінним є акцент на залученні галузевих експертів як повноправних учасників команди: саме медичний фахівець здатен коректно ідентифікувати клінічні ризики та верифікувати логіку адаптивних алгоритмів системи.

Порівняльний аналіз методологій управління ІТ-проєктами наведено в таблиці 1.4

Таблиця 1.4 – Порівняльний аналіз методологій управління ІТ-проєктами

Критерій	PMBOK	PRINCE2	Agile/Scrum	IPMA
Філософія	Процесно-орієнтований стандарт; детальна регламентація 49 процесів у 10 областях знань	Продуктово-орієнтована методологія; ІТ-проєкт існує лише поки є бізнес-виправдання	Ітеративна гнучка розробка; цінність продукту вище за процеси та документацію	Компетентнісний метод; акцент на знаннях та навичках керівника і команди
Планування	Детальний план на початку ІТ-проєкту (мережеві діаграми, базовий розклад)	Контрольовані стадії зі контрольними точками ІТ-проєкту; планування поетапне	Ітеративне планування спринтів (1–4 тижні); довгостроковий план – Product Backlog	Гнучке адаптивне планування; залежить від компетентності РМ, інструменти не фіксовані

Продовження таблиці 1.4

Управління ризиками	Структурований шестиетапний процес: ідентифікація; якісний аналіз; EMV; реагування; моніторинг; єдиний реєстр ризиків на весь IT-проект	Реєстр ризиків у межах кожної стадії; перегляд при переході через контрольні точки IT-проекту	Ризики вносяться до Product Backlog як окремі елементи; обговорюються на ретроспективах	Ризики оцінюються через компетентності керівник IT-проекту і команди; підхід гнучкий, не стандартизований
Оцінка вартості	Аналогова оцінка, параметрична оцінка, Bottom-Up Estimating, резерв на ризики через EMV	Бізнес-кейс, ТСО-аналіз; орієнтація на обґрунтування витрат перед стейкхолдерами	Story Points і velocity команди; вартість виводиться із швидкості виконання, не є грошовою	Експертна та аналогова оцінка на основі компетентнісного аналізу команди
Оцінка часу	Критичний шлях, PERT (три точки), діаграма Ганта; жорсткі залежності між роботами	Планування по стадіях з ключовими подіями-точками; акцент на терміни виходу зі стадій	Діаграма вигорання завдань, velocity-based прогнозування; тривалість вимірюється у спринтах	Мережеве планування, PERT; інструменти адаптуються під специфіку IT-проекту
Регуляторні перевірки	Через процеси контролю якості та управління	Явні контрольні точки IT-проекту між стадіями	Відсутні формальні механізми; якість забезпечується через критерії готовності	Через компетентності керівник IT-проекту та залучення експертів; форма довільна
Адаптивність	Низька – зміни вимог потребують перегляду базового плану та офіційного схвалення	Середня – зміни можливі через перегляд бізнес-кейсу та планів стадій	Висока – зміни вітаються; кожен спринт може змінити пріоритети	Висока – залежить від компетентності РМ; методологія не обмежує гнучкість

Кінець таблиці 1.4

Залучення експертів	Через процеси управління стейкхолдерами та ресурсами; роль предметних експертів не виділена окремо	Через організаційну тему; передбачена роль Business Assurance	Через роль власник продукту, який представляє інтереси замовника та предметну область	Компетентнісний підхід явно передбачає залучення галузевих експертів до прийняття рішень
---------------------	--	---	---	--

Аналіз таблиці 1.4 дозволяє зробити такі висновки щодо вибору методик. По-перше, PMBOK пропонує найбільш структуровані та систематизовані методики для трьох досліджуваних областей (ризиків, вартість, час), що особливо важливо для ІТ-проєкту в критично важливій медичній галузі. По-друге, Agile/Scrum є оптимальним для організації самого процесу розробки ПЗ, оскільки вимоги до ІС можуть змінюватися під час розробки. По-третє, IPMA надає цінні методи щодо залучення галузевих медичних експертів до оцінки ризиків та визначення компетенцій, необхідних для команди. По-четверте, PRINCE2 пропонує корисну концепцію контрольних точок для перегляду доцільності ІТ-проєкту та відповідності регуляторним вимогам.

На основі проведеного компаративного аналізу провідних методологій управління ІТ-проєктами встановлено, що жодна з них в чистому вигляді не здатна повною мірою задовольнити комплекс специфічних вимог, що висуваються до розробки самоадаптивної ІС управління запасами компонентів крові, які включають:

- критичну ціну помилки в медичній галузі;
- вимоги регуляторної відповідності;
- обмежену ресурсну базу;
- динамічні умови функціонування в умовах воєнного стану.

1.7 Постановка задачі дослідження

На основі проведеного аналізу стану діяльності служби крові, обґрунтування вибору MARE-K архітектури, аналізу існуючих ІС управління запасами компонентів крові, огляду підходів управління ІТ-проєктами актуальною є задача управління ІТ-проєктом впровадження самоадаптивної ІС управління запасами компонентів крові.

Об'єктом дослідження є процеси управління ІТ-проєктами впровадження самоадаптивних архітектур в ІС управління запасами компонентів крові.

Предметом дослідження виступають методології управління ІТ-проєктами на різних стадіях ЖЦ при застосуванні патерну MARE-K, включаючи специфічні вимоги до організаційної структури, компетенцій команди, метрики успіху та метрики ефективності, а також методики обґрунтування вибору конкретних інструментів із провідних методологій управління ІТ-проєктами.

Розробка гібридного методу управління ІТ-проєктом впровадження самоадаптивної ІС управління запасами компонентів крові, через визначення специфічних вимог, метрик успіху та метрик ефективності для кожної стадії ЖЦ ІТ-проєкту.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі основні задачі:

- порівняти особливості управління ІТ-проєктом впровадження MARE-K архітектури з традиційними методологіями управління ІТ-проєктами (Scrum, Kanban, RUP), визначити ключові ризики та стратегії їх мітигації, специфічні для ІТ-проєктів впровадження самоадаптивних систем;
- систематизувати функціональні, технологічні та організаційні вимоги до ІТ-проєкту впровадження MARE-K архітектури;
- розробити та науково обґрунтувати гібридний метод управління ІТ-

проектами впровадження самоадаптивного підходу MAPE-K в ІС управління запасами компонентів крові, що поєднує елементи ризик-орієнтованого планування, ітеративної розробки та жорсткого контролю якості;

- провести апробацію розробленого гібридного методу на прикладі ІТ-проекту впровадження самоадаптивної ІС управління запасами компонентів крові та оцінити його ефективність за визначеними метриками.

2 РОЗРОБКА ГІБРИДНОГО МЕТОДУ УПРАВЛІННЯ ІТ-ПРОЄКТОМ ВПРОВАДЖЕННЯ САМОАДАПТИВНОЇ ІС УПРАВЛІННЯ ЗАПАСАМИ КОМПОНЕНТІВ КРОВІ

2.1 Вимоги до ІТ-проекту розробки самоадаптивної системи управління запасами компонентів крові

Розробка вимог до ІТ-проекту впровадження МАРЕ-К-архітектури є завданням з трьома рівнями складності одночасно. На першому рівні – технологічна нетривіальність: п'ять взаємозалежних компонентів із нелінійними зворотними зв'язками не вкладаються у звичайну Work Breakdown Structure (WBS). На другому – регуляторна жорсткість медичної галузі, яка не залишає місця для «гнучкого підходу до документації». На третьому – операційна критичність: система служби крові в умовах воєнного стану не може дозволити собі простій навіть на кілька годин. Жодна класична методологія сама по собі цих трьох рівнів не закриває: Scrum ігнорує регуляторні gate-перевірки, Kanban не знає, що таке фазовий контроль, а RUP ніколи не передбачав роль медичного аналітика в команді розробки.

Виходячи з цього, вимоги до ІТ-проекту систематизовано у шість груп. Кожна група відповідає окремій управлінській відповідальності й формує власний набір критеріїв, за якими перевіряється проходження контрольних точок ІТ-проекту між стадіями ЖЦ.

Функціональні вимоги визначаються замкненим циклом МАРЕ-К, ядром якого є реалізація замкненого циклу МАРЕ-К – п'яти незалежно розгортуваних компонентів, кожен з яких розробляється окремою feature-командою зі спільними перевітками. Принципова вимога: у штатному режимі система має самостійно завершувати повний прохід по циклу без ручного втручання оператора. Будь-яка залежність від медичної сестри у критичному сценарії – це архітектурний дефект, а не організаційне рішення.

З функціональними вимогами нерозривно пов'язані технологічні,

технологічні вимоги є не менш жорсткими. Інтеграція компонента Monitor із медичними установами здійснюється виключно через протокол HL7 Fast Healthcare Interoperability Resources (FHIR) – стандарт, без якого сумісність із ЕСОЗ юридично неможлива. Analyze не просто видає прогнози: кожне рішення має супроводжуватися журналом пояснення, бо медичний персонал зобов'язаний розуміти, чому система рекомендує скоротити запас тромбоцитного концентрату саме зараз. Knowledge-база розгортається у режимі активної реплікації між двома географічно розподіленими вузлами – втрата єдиного вузла в умовах ракетного обстрілу не повинна зупиняти службу крові.

Найкращі технічні рішення, реалізація яких неможлива без належно сформованої команди – звідси організаційні вимоги. Команда формується за компетентнісним методом IPMA. Її ключова структурна особливість – обов'язкова роль медичного експерта: представника опорного центру крові або координаційного центру трансплантації. Без цього фахівця налаштування Knowledge-бази перетворюється на вгадування клінічної логіки розробниками. Щонайменше два фахівця з аналізу даних з досвідом роботи з часовими рядами.

Водночас жодна команда не застрахована від загроз, тому паралельно опрацьовуються вимоги до управління ризиками. Ризики ідентифікуються та класифікуються за матрицею «ймовірність на вплив» згідно з PMBOK Guide (8-е вид.) у єдиному реєстрі, доступному всім стейкхолдерам. Медичний експерт бере участь у цьому процесі не як спостерігач – він є основним джерелом для категорії клінічних ризиків. Критичні загрози, зокрема хибне прогнозування дефіциту компонентів крові чи витік персональних медичних даних, отримують детальні сценарії мітигації ще до старту фази виконання: реакційне управління ризиками у медичній ІС коштує незрівнянно дорожче за превентивне.

Ідентифікований реєстр ризиків безпосередньо впливає на бюджетне планування, що й визначає логіку вимог до управління вартістю. Бюджет

будується на двох методах залежно від природи робіт. Типові інфраструктурні завдання оцінюються аналоговим методом – досвід цифровізації охорони здоров'я 2023–2024 рр. дає достатньо орієнтирів. Натомість ML-модулі (Analyze, Plan) вимагають деталізованої оцінки «знизу-вгору»: Story Points не можуть обґрунтувати перед державними стейкхолдерами, чому залучення вузькопрофільних аналітичних фахівців коштує саме стільки. Витрати на навчання персоналу закладаються в бюджет через компетентнісний аналіз IPMA – це єдиний спосіб не недооцінити людський фактор у медичному IT-проекті.

Вартість IT-проекту безпосередньо визначається його тривалістю, що обумовлює окремий комплекс вимог до управління часом. Жорсткі технологічні залежності між компонентами MAPE-K диктують підхід критичного шляху як основу календарного планування: компонент Analyze не може стартувати, поки Knowledge-база не сформована, а інтеграційне тестування – поки обидва не готові. Для підетапів із суттєвою невизначеністю, насамперед навчання ML-моделей, застосовується PERT-оцінка з триточковим методом. Безпосередня організація роботи всередині кожного блоку – двотижневі Scrum-ітерації.

Управління часом базується на жорстких технологічних залежностях між компонентами MAPE-K, що визначають метод критичного шляху як основу календарного планування. Жорсткі технологічні залежності між компонентами MAPE-K диктують підхід критичного шляху як основу календарного планування: компонент Analyze не може стартувати, поки Knowledge-база не сформована, а інтеграційне тестування – поки обидва не готові. Для підетапів із суттєвою невизначеністю, насамперед навчання ML-моделей, застосовується PERT-оцінка з триточковим методом. Безпосередня організація роботи всередині кожного блоку – двотижневі Scrum-ітерації. Перехід між стадіями блокується формальними контрольними точками за аналогією з PRINCE2: без виконання кількісних нормативів ефективності IT-проект далі не рухається.

Захист інформації реалізується за принципом вбудованої безпеки персональних даних на рівні схеми даних. Принцип вбудованого захисту персональних даних реалізується на рівні схеми даних, після закінчення нормативних термінів зберігання, закладаються у IT-проектні рішення з першого спринту. Шифрування каналів – TLS 1.3; щоквартальне тестування на проникнення – не рекомендація, а контрактна умова. Цільовий рівень: нуль критичних і нуль високих вразливостей за результатами аудиту.

Завершують систему вимог нормативно-правові зобов'язання. Система кваліфікується як медичний програмний виріб середнього ризику за стандартом ІЕС 62304, що означає повну відстежуваність від вимог до тест-кейсів і пакет технічної документації для регуляторних органів. Обмін даними з ЕСОЗ і локальними медичними ІС – виключно через HL7 FHIR. За Законом України «Про критичну інфраструктуру» система відноситься до об'єктів критичної інформаційної інфраструктури сфери охорони здоров'я, а це автоматично означає: доступність не нижче 99,9% та регулярний незалежний аудит безпеки – без права на виключення.

2.2 Управління ризиками, вартістю і часом гібридного методу управління IT-проектом впровадження самоадаптивної ІС управління запасами компонентів крові

На основі проведеного компаративного аналізу провідних методологій управління IT-проектами встановлено, що жодна з них в ізолюваному вигляді не здатна повною мірою задовольнити комплекс специфічних вимог, які висуваються до розробки медичних самоадаптивних систем. З огляду на це, для реалізації досліджуваного IT-проекту розроблено та обґрунтовано гібридний метод, що синтезує найбільш релевантні інструменти зазначених стандартів.

У площині управління ризиками було свідомо відхилено спрощений підхід гнучких методологій, де загрози розглядаються переважно як стандартні елементи беклогу. Натомість імplementовано підхід якісного та кількісного аналізу ризиків згідно зі стандартом PMBOK, глибоко інтегрований із компетентнісною моделлю IPMA. Застосування стандартизованої матриці «ймовірність та вплив» та ведення формалізованого реєстру ризиків забезпечує необхідну прозорість комунікації критичних загроз на рівні керівництва служби крові. Водночас інтеграція підходу IPMA зумовлює обов'язкове залучення до процесу ідентифікації ризиків нової крос-функціональної ролі – Медичного Експерта. Саме наявність експертної клінічної оцінки виступає безальтернативною запорукою адекватного прогнозування ризиків хибного спрацювання аналітичних модулів системи, зокрема генерації штучного дефіциту компонентів крові.

Процес управління вартістю та формування бюджету IT-проєкту спирається на синергію аналогового оцінювання та підходу «знизу-вгору», що базується на ієрархічній декомпозиції робіт. Використання виключно відносних одиниць вимірювання трудомісткості визнано концептуально недостатнім для фінансового обґрунтування інвестицій перед державними стейкхолдерами. Аналогова оцінка застосовується для типових інфраструктурних завдань, акумулюючи ретроспективний досвід цифровізації вітчизняних закладів охорони здоров'я. На противагу цьому, підхід «знизу-вгору» використовується для фінансового планування найбільш складних та інноваційних компонентів самоадаптивної архітектури, що дозволяє з високою точністю прогнозувати капіталоемність залучення вузькопрофільних спеціалістів у галузі Data Science.

Планування розкладу та управління часовими параметрами IT-проєкту суворо детерміноване технологічними залежностями між функціональними вузлами самоадаптивної системи. У зв'язку з цим фундаментальною основою календарного планування обрано підхід критичного шляху у поєднанні зі

статистичною технікою PERT. Мережеві моделі дозволяють ефективно візуалізувати жорсткі зв'язки, наприклад, неможливість старту розробки модуля Plan до повної формалізації бази знань Knowledge. Враховуючи високий ступінь невизначеності при розробці алгоритмів машинного навчання, застосування триточкової оцінки PERT забезпечує математично обґрунтоване формування часових резервів. При цьому безпосереднє операційне виконання робіт організовано за принципами Scrum через двотижневі ітерації, що гарантує необхідну динамічність та здатність команди до швидкої адаптації алгоритмів за результатами проміжних верифікацій.

Забезпечення якості та контроль переходів між стадіями ЖЦ реалізовано через імплементацію підходу контрольних точок, запозиченого з методології PRINCE2. Оскільки чисті Agile-фреймворки не містять жорстких фазових бар'єрів, впровадження контрольних точок ІТ-проєкту є критичною необхідністю для розробки медичного програмного забезпечення.

Перехід від стадії виконання до етапу дослідної експлуатації суворо блокується системою до моменту досягнення інженерним рішенням цільових нормативних показників, зокрема сумарної латентності циклу адаптації в межах сорока п'яти секунд та похибки прогнозування, що не перевищує п'ятнадцяти відсотків. Такий жорсткий поетапний контроль виступає фундаментальним інструментом гарантування експлуатаційної надійності та безпеки створюваної самоадаптивної ІС.

2.3 Метрики оцінювання ефективності ІС управління запасами компонентів крові та розрахунок результативності підходу

У гібридному методі метрики виконують дві різні ролі, і розмежування між ними важливе. На стадії первинного планування вони фігурують як

нормативи, цільові значення, що вписуються у технічне завдання і визначають, чого система має досягти. На стадіях виконання і закриття виникають питання, на які треба давати відповідь: чи справді гібридний метод досягає мети – скорочення списань компонентів крові без погіршення рівня сервісу. Без цього зв'язку між плануванням і вимірюванням контрольні точки ІТ-проєкту перетворюються на суб'єктивну оцінку керівника.

Система метрик оцінювання успіху визначається кортежем:

$$M = (L_{total}, MAPE, U, Availability, Adaptability_Index, PSS) \quad (2.1)$$

Ключовою операційною характеристикою самоадаптивної системи є час, необхідний для проходження одного повного циклу MAPE-K від моменту фіксації зміни у середовищі експлуатації до моменту реалізації адаптивної дії. Цей показник безпосередньо визначає здатність ІС реагувати на раптові сплески попиту на компоненти крові, що характерні для умов воєнного стану. Загальна латентність циклу адаптації розраховується як сума латентностей окремих компонентів циклу MAPE-K:

$$L_{total} = L_{monitor} + L_{analyze} + L_{plan} + L_{execute} + L_{knowledge} \quad (2.2)$$

де $L_{monitor}$ – час збору даних у реальному часі;

$L_{analyze}$ – час обробки машинного навчання;

L_{plan} – час роботи оптимізаційних алгоритмів;

$L_{execute}$ – час виконання адаптивних дій.

$L_{knowledge}$ – час звернення до бази знань.

Для ІС управління запасами компонентів крові на основі результатів аналізу вимог до самоадаптивних систем встановлено цільові значення латентності окремих компонентів циклу MAPE-K. Латентність підсистеми моніторингу не повинна перевищувати ста мілісекунд, що є необхідною

умовою підтримки операцій у реальному часі та своєчасної реєстрації подій про зміну стану запасів. Для підсистеми аналізу встановлено гранично допустимий час обробки даних на рівні п'яти секунд, що відповідає продуктивності алгоритмів машинного навчання середньої складності, застосовуваних для прогнозування попиту на компоненти крові. Час роботи оптимізаційних алгоритмів підсистеми планування обмежено десятима секундами, що забезпечує оперативне формування виробничого плану та рекомендацій з розподілу запасів. Виконання запланованих адаптивних дій підсистемою Execute має здійснюватися у межах тридцяти секунд з моменту отримання команди на адаптацію. Наведені обмеження враховуються як нефункціональні вимоги до ІС управління запасами компонентів крові та закладаються у технічне завдання на стадії планування ІТ-проєкту, а їх дотримання підлягає верифікації при проходженні контрольних точок між стадіями ЖЦ.

Ефективність роботи компонента Analyze циклу MAPE-K напряду залежить від точності прогнозування попиту на компоненти крові, оскільки саме прогноз є вхідними даними для формування плану адаптивних виробничих дій. Для оцінки точності прогнозування застосовується середня абсолютна відсоткова похибка MAPE, що обчислюється за формулою:

$$\text{MAPE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|A_i - F_i|}{A_i} \cdot 100\% \quad (2.3)$$

де A_i – фактичне споживання;

F_i – прогнозне значення для i -го періоду.

Метрика MAPE має ряд переваг для оцінювання прогнозних моделей медичної предметної області. По-перше, вона є масштабно незалежною, що дозволяє порівнювати точність прогнозів для різних компонентів крові, зокрема компонентів крові, тромбоцитного концентрату та плазми, незважаючи на суттєві відмінності в абсолютних обсягах їх споживання та

виробництва. По-друге, результат обчислення за цією метрикою має зрозумілу інтерпретацію у відсотках, що полегшує сприйняття показника як з боку медичного персоналу, так і з боку управлінців закладів служби крові при прийнятті рішень щодо впровадження самоадаптивного підходу. Для ІС управління запасами компонентів крові встановлено диференційовані цільові значення метрики залежно від горизонту прогнозування. Для короткострокових прогнозів з горизонтом від однієї до двадцяти чотирьох годин прийнято вимогу $MARE$ не більше п'ятнадцяти відсотків, що є критичним для забезпечення оперативного реагування на раптові зміни потреб у компонентах крові, характерні для умов воєнного стану та ситуацій масового надходження поранених. Для середньострокових прогнозів з горизонтом від двох до семи днів, які використовуються для планування виробничих потужностей закладів служби крові та формування графіків донорських здач, прийнято менш жорстку вимогу $MARE$ не більше двадцяти п'яти відсотків, що відображає об'єктивне зростання невизначеності при збільшенні горизонту прогнозування.

Оптимальне використання обмежених ресурсів системи служби крові вимагає балансу між забезпеченням доступності компонентів крові для задоволення попиту на компоненти крові та мінімізацією втрат через закінчення терміну придатності. Ефективність розподілу ресурсів у ІС управління запасами компонентів крові оцінюється коефіцієнтом утилізації U , який визначається як відношення обсягу фактично використаних компонентів крові до обсягу доступних з урахуванням їх придатності:

$$U = \frac{V_{used,i}}{V_{available,i}} \cdot (1 - E_i) \quad (2.4)$$

де $V_{used,i}$ – обсяг використаних компонентів типу i , од.;

$V_{available,i}$ – доступний обсяг компонентів типу i , од.;

E_i – коефіцієнт псування.

Значення, близькі до одиниці, свідчать про ефективне використання всіх доступних ресурсів, коли заготовлені обсяги компонентів крові майже повністю витрачаються на задоволення фактичного попиту, а списання через спливу терміну придатності зведено до мінімуму. Низькі значення показника, навпаки, вказують на надлишкове виробництво відносно реального попиту, коли значна частина заготовлених компонентів крові не встигає бути використаною протягом сорокадвохденного терміну зберігання компонентів крові та списується як непридатна для трансфузії, що являє собою прямий економічний збиток системи служби крові й одночасно втрачену можливість для порятунку життів. Для ІС управління запасами компонентів крові встановлено нормативне значення коефіцієнта утилізації на рівні не нижче вісімдесяти п'яти сотих, що відповідає сучасним стандартам організації служби крові у європейських країнах та закладає достатній запас операційної ефективності. За даними Центру медичної статистики МОЗ України, у 2021 році реальне значення цього показника для компонентів крові становило приблизно сімдесят дві сотих, що суттєво нижче встановленого нормативу та підтверджує актуальність задачі підвищення ефективності управління запасами компонентів крові через впровадження самоадаптивного підходу МАРЕ-К.

Критична інфраструктура охорони здоров'я, до якої належить ІС управління запасами компонентів крові, висуває жорсткі вимоги до надійності функціонування у режимі 24/7. Показник доступності системи визначається як ймовірність того, що у довільно обраний момент часу система перебуває у робочому стані, та розраховується за формулою:

$$\text{Availability} = \frac{\text{MTBF}}{\text{MTBF} + \text{MTTR}} \quad (2.5)$$

де MTBF – середній час між відмовами, год;

MTTR – середній час відновлення, год.

Для ІС управління запасами компонентів крові, яка за класифікацією Закону України «Про критичну інфраструктуру» належить до об'єктів критичної інформаційної інфраструктури у сфері охорони здоров'я, встановлено жорстку вимогу щодо показника доступності системи на рівні не нижче дев'яноста дев'яти цілих дев'яти десятих відсотка для всіх критичних компонентів. Така вимога означає, що сумарний час, коли система перебуває у непрацездатному стані, не повинен перевищувати восьми цілих сімдесяти шести сотих години на рік, тобто близько тридцяти хвилин на місяць у найгірших сценаріях. Дотримання цього показника є не лише технічною, а й юридичною вимогою, невиконання якої може призвести до регуляторних санкцій та безпосередньо загрожувати безперервності надання медичної допомоги.

Реалізація цієї вимоги у межах патерну MAPE-K забезпечується комплексом технічних рішень, закладених на стадії планування ІТ-проєкту. По-перше, застосовується резервування Knowledge-бази через дублювання історичних даних та навчених моделей у географічно розподілених сховищах, що гарантує збереження критичної інформації навіть у разі виходу з ладу основного вузла внаслідок кібератаки або фізичного пошкодження інфраструктури в умовах воєнного стану. По-друге, компоненти Monitor та Execute розгортаються у різних територіальних вузлах за принципом активної реплікації, що унеможливорює виникнення єдиної точки відмови та забезпечує безперервність збору телеметрії й виконання адаптивних дій. По-третє, у систему закладено механізми автоматичного відновлення після збоїв, передбачені самоадаптивним циклом MAPE-K, які дозволяють системі самостійно діагностувати проблеми функціонування своїх компонентів та ініціювати процедури відновлення без необхідності втручання оператора. Сукупність зазначених рішень формує багаторівневий захист від відмов, де кожен наступний рівень компенсує потенційні недоліки попереднього, забезпечуючи загальну стійкість системи до різноманітних сценаріїв порушення штатного функціонування.

Специфічною характеристикою самоадаптивних систем, відсутньою у традиційних ІС із статичною архітектурою, є здатність системи ефективно реагувати на зміни умов експлуатації. Для кількісної оцінки цієї властивості вводиться індекс адаптивності, що визначається як відношення зміни продуктивності системи до масштабу змін середовища з урахуванням часу відновлення:

$$\text{Adaptability_Index} = \frac{P}{EC} \cdot \frac{1}{RT} \quad (2.6)$$

де P – зміна продуктивності;

EC – масштаб змін середовища;

RT – час відновлення, с.

Індекс адаптивності є інтегральним показником, що комплексно характеризує якість роботи циклу МАРЕ-К: високе значення індексу свідчить про здатність системи зберігати або відновлювати задані рівні ефективності при суттєвих змінах навантаження, тоді як низьке значення вказує на недостатню самоадаптивність архітектури. Нормативне значення показника для ІС управління запасами компонентів крові прийнято на рівні 0,8, що є зіставним зі світовими практиками оцінювання самоадаптивних систем у медичній галузі.

Таким чином, розроблений математичний апарат оцінювання ефективності забезпечує комплексну характеристику функціонування ІС управління запасами компонентів крові на всіх стадіях ЖЦ ІТ-проєкту. Наведені метрики інтегруються у гібридний метод управління ІТ-проєктом самоадаптивної ІС управління запасами компонентів крові як через встановлення цільових значень у технічному завданні (стадії ініціації та планування), так і через їх верифікацію при проходженні контрольних точок.

Таблиця 2.1 – Нормативні значення метрик ефективності

№	Метрика (позначення)	Норматив
1	Загальна латентність циклу (L_{total})	≤ 45 с
2	MAPE коротк. прогноз ($MAPE_{short}$)	$\leq 15\%$
3	MAPE середньостр. прогноз ($MAPE_{mid}$)	$\leq 25\%$
4	Коефіцієнт утилізації (U)	$\geq 0,85$
5	Доступність системи (Availability)	$\geq 99,9\%$
6	Індекс адаптивності	$\geq 0,8$

П'ять описаних метрик охоплюють різні аспекти функціонування системи, але управлінці потребують єдиного числа для рішення «пропускати чи блокувати». Таким числом є Project Success Score (PSS) – нормалізована зважена сума управлінських та технічних індексів, що перераховується при кожному Gate:

$$PSS = w_1 \cdot \left(\frac{SPI}{SPI_n}\right) + w_2 \cdot \left(\frac{CPI}{CPI_n}\right) + w_3 \cdot \left(1 - \frac{MAPE}{MAPE_n}\right) + w_4 \cdot \left(\frac{U}{U_n}\right) + w_5 \cdot \left(\frac{AI}{AI_n}\right) \quad (2.7)$$

де SPI – Schedule Performance Index;

CPI – Cost Performance Index;

MAPE, U, AI – поточні значення відповідних метрик;

SPI_n , CPI_n та ін. – нормативні значення метрик ефективності;

w_1 – w_5 – вагові коефіцієнти ($\sum w = 1$), що узгоджуються з пріоритетами стейкхолдерів на стадії первинного планування.

Логіка інтерпретації триколірна. 0,9 – зелений сигнал: Gate пройдено, ІТ-проект переходить на наступну стадію. Діапазон 0,8–0,9 – жовта зона: ІТ-проект не зупиняється, але наступний спринт починається з обов'язкового технічного огляду конкретного показника, що «просів». Якщо значення менше 0,8 – Gate заблоковано: запускається адаптивне перепланування, оновлення

реєстру ризиків і, якщо потрібно, перерозподіл ресурсів команди.

Таким чином, математичний апарат розділу 2.3 забезпечує наскрізну вимірюваність гібридного методу управління ІТ-проєктом впровадження самоадаптивної ІС управління запасами компонентів крові.

2.4 Особливості управління ІТ-проєктом впровадження самоадаптивної ІС на кожній стадії ЖЦ

Проведений аналіз архітектурних рішень та практичних аспектів впровадження МАРЕ-К дозволяє визначити особливості управління відповідним ІТ-проєктом. Специфіка таких ІТ-проєктів полягає в необхідності балансувати між структурованим плануванням та гнучкістю до змін, що зумовлено еволюційною природою самоадаптивних систем, поведінку яких неможливо повністю передбачити на початкових стадіях. Кожна стадія ІТ-проєкту має свої специфічні характеристики: ініціація вимагає глибшого аналізу предметної області та оцінки можливостей організації підтримувати складні системи, виконання передбачає ітеративну розробку з постійним тестуванням алгоритмів, моніторинг потребує нових метрик для оцінки адаптивної поведінки. Кожна з цих стадій висуває до команди проєкту специфічні вимоги як у частині технічних компетенцій, так і в частині організації процесів взаємодії між учасниками. Стадії ІТ-проєкту ІС управління запасами компонентів крові представлено на рисунку 2.1.

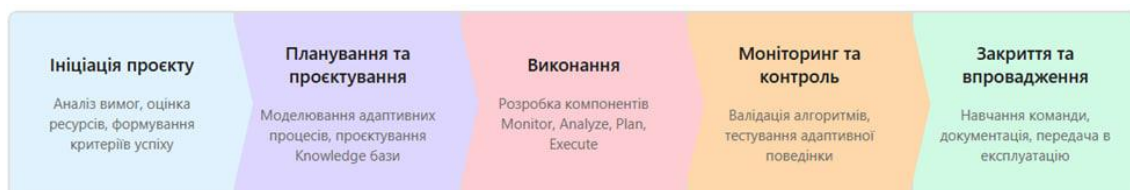


Рисунок 2.1 – Стадії ІТ-проєкту ІС управління запасами компонентів крові

Життєвий цикл такого ІТ-проєкту характеризується високим рівнем взаємозалежності між стадіями, де рішення, прийняті на ранніх етапах, мають каскадний ефект на всі наступні фази. Розуміння цих особливостей на початковому етапі є критично важливим для формування реалістичних очікувань щодо термінів, ресурсів та результатів ІТ-проєкту.

На стадії ініціації ІТ-проєкту архітектурні рішення щодо впровадження МАРЕ-К патерну для реалізації ІС суттєво впливають на формування вимог, оцінку ресурсів та планування терміну реалізації. На цій стадії потребується детальний аналіз складності предметної області, рівня динамічності середовища експлуатації та можливостей організації щодо підтримки складних самоадаптивних систем. Архітектурна стратегія визначає необхідність залучення спеціалістів з машинного навчання, експертів з розподілених систем та фахівців з кібербезпеки, що суттєво впливає на бюджет та ресурсне планування ІТ-проєкту.

Вибір архітектурного патерну МАРЕ-К також впливає на формування критеріїв успіху ІТ-проєкту, оскільки самоадаптивні системи вимагають специфічних метрик для оцінки ефективності адаптації, якості прогнозування та стабільності поведінки. Це потребує розробки додаткових інструментів для тестування та валідації системи, що збільшує складність ІТ-проєкту але забезпечує довгострокові переваги через автоматизацію управління.

Ризики ІТ-проєкту при виборі МАРЕ-К архітектури при створенні ІС включають технічні виклики реалізації складних алгоритмів адаптації, організаційні проблеми навчання персоналу роботі з самоадаптивними системами та регуляторні обмеження щодо використання автономних систем прийняття рішень у критичних галузях. Планування стратегії мітигації цих ризиків на стадії ініціації є критично важливим для успіху ІТ-проєкту.

Використання патерну МАРЕ-К на стадії планування ІТ-проєкту значно розширює традиційний підхід до архітектурного дизайну, вимагаючи детального моделювання адаптивних процесів, ІТ-проєктування монолітної Knowledge бази. Це включає створення детальних моделей поведінки

компонентів. Сам процес розробки вимагає поетапного підходу: спочатку реалізується базова функціональність, а потім поступово додаються адаптивні можливості. Це допомагає мінімізувати IT-проектні ризики та дає команді час освоїти роботу з новою архітектурою. Крім того, планування тестування стає складнішим, оскільки вимагає розробки спеціалізованих методологій для перевірки адаптивної поведінки системи в різних сценаріях. Нарешті, архітектурний вибір MAPE-K також впливає на планування інфраструктури, оскільки самоадаптивні системи потребують значних обчислювальних ресурсів для роботи алгоритмів машинного навчання та аналізу даних, що робить необхідним використання хмарної інфраструктури з функціями автоматичного масштабування та високопродуктивних систем зберігання даних для Knowledge бази.

Стадія виконання IT-проекту є ітеративним процесом, що вимагає тісної співпраці команд, які працюють над різними компонентами. Розробка відбувається з постійним тестуванням адаптивних алгоритмів та їх поступовим навчанням на реальних даних. Зокрема, розробка компонента Monitor передбачає ретельне IT-проектування системи збору даних та її інтеграцію з уже наявними системами моніторингу, включаючи розробку адаптерів, стандартизацію форматів даних та забезпечення масштабованості. Компонент Analyze, у свою чергу, вимагає значної експертизи в галузі машинного навчання та статистичного аналізу.

Моніторинг IT-проекту вимагає специфічного підходу до відстеження прогресу, оскільки традиційні метрики можуть бути недостатніми. Необхідно розробляти нові ключові показники ефективності (KPI) для оцінки реалізації адаптивної поведінки компонентів Monitor, Analyze, Plan та Execute. Контроль якості включає валідацію точності алгоритмів прогнозування, ефективності планування та надійності виконання адаптивних дій. Для цього створюються спеціалізовані тестові середовища, що моделюють різні сценарії для оцінки поведінки системи в умовах невизначеності. Крім того, управління змінами в такому IT-проекті є складним через взаємозалежність між компонентами;

будь-які модифікації у базі знань можуть впливати на всі інші компоненти [18], що вимагає ретельного планування та тестування впливу цих змін.

Завершення ІТ-проєкту включає специфічні етапи підготовки самоадаптивної системи до продуктивної експлуатації. Це включає первинне навчання Knowledge бази на історичних даних та налаштування порогів спрацювання для різних типів адаптивних дій.

Передача системи в дослідну експлуатацію потребує цілеспрямованої підготовки команди до роботи з самоадаптивною системою, яка принципово відрізняється від традиційного програмного забезпечення: персонал взаємодіє не з детермінованою логікою, а з системою, що самостійно приймає рішення на основі поточного стану середовища. Окремою складовою підготовки є тренування у середовищі Sandbox, де медичний персонал відпрацьовує взаємодію з системою в умовах різкого сплеску попиту без ризику для реальних запасів крові. Такий підхід дозволяє сформувати практичні навички роботи в нештатних ситуаціях та підвищити рівень довіри персоналу до автоматизованих рішень системи ще до початку її реального використання.

Документація системи повинна включати детальний опис логіки адаптації, параметрів конфігурації та процедур діагностики проблем у роботі адаптивних компонентів.

Планування довгострокової підтримки включає процедури оновлення моделей машинного навчання, розширення Knowledge бази новими знаннями та адаптації системи до змін у бізнес-процесах або регуляторних вимогах.

Виявлені особливості кожної стадії – підвищена невизначеність при плануванні, міжкомпонентні залежності при виконанні, специфічні метрики при моніторингу – формують конкретні управлінські вимоги, які жодна з розглянутих у підрозділі 2.2 моделей ЖЦ не закриває в повному обсязі. Це обґрунтовує необхідність розробки методу управління, адаптованого до цих особливостей на кожній стадії окремо.

2.5 Розробка методу управління за стадіями ЖЦ ІТ-проєкту

На основі гібридного методу управління ІТ-проєктом впровадження самоадаптивної ІС управління запасами компонентів крові, обґрунтованого у підрозділі 2.2, та особливостей кожної стадії, виявлених у підрозділі 2.4, розроблений метод реалізується через послідовне застосування шести метрик ефективності, визначених у підрозділі 2.3.

Під час стадії виконання та розробки основна увага зосереджується на точності алгоритмів прогнозування, що є ядром аналітичного модуля системи. Для верифікації моделей машинного навчання на проміжних ітераціях використовується метрика середньої абсолютної відсоткової похибки. Ця метрика дозволяє розробникам на етапі тестування окремих модулів оцінити якість короткострокових та середньострокових прогнозів. Встановлення нормативу на рівні не більше п'ятнадцяти відсотків для короткострокових періодів слугує математичним критерієм готовності коду до інтеграції у загальну систему управління запасами.

Стадія моніторингу та контролю передбачає активне застосування методик для оцінки поточної результативності впроваджуваного рішення через механізми контрольних точок. На цьому етапі розраховується коефіцієнт утилізації запасів, який демонструє відношення обсягів виданих за запитами компонентів до загальної кількості доступних ресурсів з урахуванням втрат.

Кінцева стадія закриття та впровадження системи передбачає фінальну перевірку життєздатності архітектури за допомогою індексу адаптивності. Ця інтегральна метрика використовується для оцінки здатності системи зберігати стабільність при різких сплесках попиту на компоненти крові, що характерно для умов воєнного стану.

3 АПРОБАЦІЯ ГІБРИДНОГО МЕТОДУ НА ПРИКЛАДІ ІТ-ПРОЄКТУ ВПРОВАДЖЕННЯ САМОАДАПТИВНОЇ ІС УПРАВЛІННЯ ЗАПАСАМИ КОМПОНЕНТІВ КРОВІ

3.1 Ієрархічна структура робіт ІТ-проєкту

WBS розроблена відповідно до методології PMBOK і відображає повну декомпозицію робіт ІТ-проєкту впровадження самоадаптивної ІС управління запасами компонентів крові на основі патерну MAPE-K. Структурування здійснювалося у два рівні: управлінські стадії (перший рівень) та конкретні пакети робіт (другий рівень). Детальніші підетапи виокремлено для найбільш трудомістких блоків – розробки компонентів Analyze та Plan , оскільки саме ці компоненти реалізують ключову інтелектуальну логіку системи і потребують найбільшої деталізації для коректного управління їх виконанням. WBS-коди та найменування пакетів робіт наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – WBS ІТ-проєкту впровадження самоадаптивної ІС управління запасами компонентів крові

WBS-код	Найменування пакету робіт	Виконавці	Результат
1	Ініціація ІТ-проєкту	Керівник ІТ-проєкту (PM), Медичний експерт	Статут ІТ-проєкту
1.1	Формування статуту ІТ-проєкту	PM	Статут
1.2	Визначення стейкхолдерів та їх вимог	PM, Медичний експерт	Реєстр стейкхолдерів
1.3	Первинна оцінка ризиків	PM, Медичний експерт	Реєстр ризиків

Продовження таблиці 3.1

1.4	Затвердження цільових нормативів метрик ефективності	PM, Медичний експерт	Нормативи
2	Планування	PM, Архітектор, Фахівець з аналізу даних	План IT-проєкту
2.1	Розробка WBS та базового розкладу	PM, Архітектор	WBS, мережева діаграма
2.2	PERT-оцінка ML-підетапів	PM, Фахівець з аналізу даних	Часові резерви
2.3	Бюджетування	PM	Базовий бюджет
2.4	Деталізація реєстру ризиків	PM, Медичний експерт	Реєстр ризиків
2.5	Розробка плану тестування	Архітектор, QA-інженер	Test Plan
2.6	Налаштування CI/CD середовища	DevOps-інженер	CI/CD pipeline
3	Виконання – Блок 1: Knowledge та Monitor	Data Engineers, DevOps	Компоненти Knowledge i Monitor
3.1	Проектування схеми Knowledge-бази та онтологій	Архітектор, Фахівець з аналізу даних	ERD, OWL-онтологія
3.2	Реалізація Knowledge-бази	Розробник серверної частини	Задеплойена Knowledge-база
3.3	Завантаження ретроспективних даних МОЗ 2018–2024	Data Engineers	Заповнена Knowledge-база

Продовження таблиці 3.1

3.4	Розробка HL7 FHIR-адаптерів для Monitor	Розробник серверної частини	FHIR-адаптер
3.5	Розгортання IoT-сенсорів рівнів запасів	DevOps-інженер	Мережа сенсорів
3.6	Інтеграційне тестування Monitor з Knowledge	QA-інженер	Test Report
3.7	Контрольна точка 1	РМ, Медичний експерт	Рішення про перехід до блоку 2
4	Виконання – Блок 2: Analyze та Plan	Фахівець з аналізу даних, Розробник серверної частини	Компоненти Analyze і Plan
4.1	Розробка та навчання ML-моделей прогнозування попиту (короткострок.)	Фахівець з аналізу даних	ML-модель
4.2	Розробка та навчання ML-моделей прогнозування попиту (середньострок.)	Фахівець з аналізу даних	ML-модель
4.3	Реалізація компонента Analyze	Розробник серверної частини	Компонент Analyze
4.4	Розробка оптимізаційного алгоритму для розподілу ресурсів	Фахівець з аналізу даних	Оптимізатор Plan
4.5	Валідація ML-моделей на тестовій вибірці	Фахівець з аналізу даних, QA	Звіт валідації
4.6	Контрольна точка 2	РМ, Медичний експерт	Рішення про перехід до блоку 3

Продовження таблиці 3.1

5	Виконання – Блок 3: Execute та інтеграція	Розробник серверної частини, DevOps	Повний цикл MARE-K
5.1	Розробка компонента Execute	Розробник серверної частини	Компонент Execute
5.2	Інтеграція всіх компонентів MARE-K	Архітектор, Розробник серверної частини	Інтегрована система
5.3	Вимірювання загальної латентності циклу	QA-інженер, DevOps	Звіт
5.4	Стрес-тестування в Sandbox	QA-інженер, Фахівець з аналізу даних	Звіт Sandbox-тестування
5.5	Тестування Graceful Degradation	QA-інженер	Звіт резервних сценаріїв
5.6	Penetration testing	Зовнішній аудитор	Звіт безпеки
5.7	Контрольна точка 3	PM, Медичний експерт	Рішення про передачу в дослідну експлуатацію
6	Завершення та передача в дослідну експлуатацію	PM, Медичний експерт, DevOps	Готова система
6.1	Верифікація доступності системи	DevOps-інженер	Звіт
6.2	Навчання медичного персоналу	Медичний експерт	Навчальні матеріали

Кінець таблиці 3.1

6.3	Підготовка технічної документації	Архітектор, РМ	Пакет документації
6.4	Формальне завершення ІТ-проєкту та архівування	РМ	Звіт про завершення ІТ-проєкту

3.2 Функціональна структура системи МАРЕ-К та метод управління ІТ-проєктом

Розроблена WBS відображає декомпозицію робіт, однак не розкриває механіку управління ІТ-проєктом – яким чином функціональна структура системи МАРЕ-К визначає послідовність рішень керівника. Це потребує окремого опису, оскільки між структурою артефактів і логікою прийняття управлінських рішень існує принциповий розрив: WBS відповідає на питання «що робити», тоді як функціональна модель – «чому саме в такій послідовності і з якими критеріями переходу». Еталонна функціональна структура МАРЕ-К визначає не лише декомпозицію компонентів, але й характер їхньої взаємодії – саме ця структура слугує операційною основою для застосування метрик, визначених у розділі 2. Кожен з чотирьох оперативних компонентів – Monitor, Analyze, Plan та Execute – має власний горизонт відповідальності та власний набір вимірюваних показників, і саме ця диференціація обумовлює архітектуру гібридного методу управління ІТ-проєктом впровадження самоадаптивної ІС управління запасами компонентів крові. Розуміння того, як компоненти системи взаємодіють в операційному режимі, дозволяє керівнику ІТ-проєкту коректно розподілити ресурси між блоками розробки та визначити залежності, які не очевидні з WBS, але критичні для календарного планування. На рисунку 3.1 представлено структуру самоадаптивної ІС управління запасами компонентів крові.

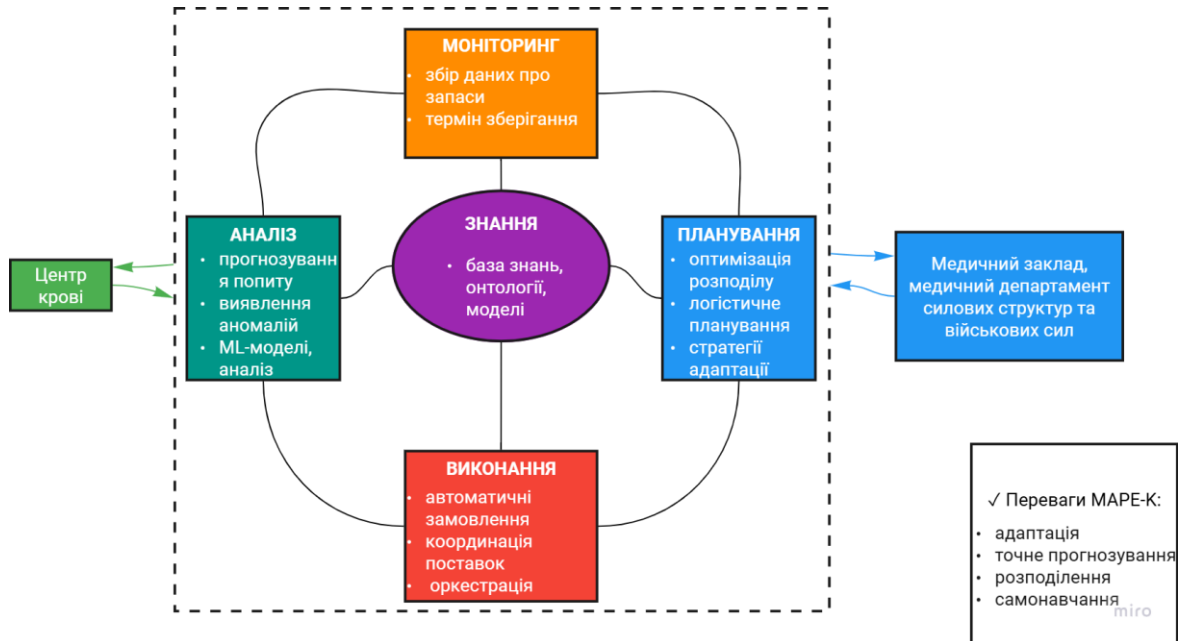


Рисунок 3.1 – Функціональна модель самоадаптивної ІС управління запасами компонентів крові на основі патерну MAPE-K

Monitor збирає телеметрію у реальному часі, одночасно передаючи її і до Analyze, і до Knowledge-бази – щоб архів не чекав на завершення аналітичного циклу і кожна зафіксована подія негайно ставала частиною накопиченого контексту. Analyze виявляє аномалії й будує прогнози попиту на компоненти крові методами машинного навчання; отримані висновки зберігаються у Knowledge і паралельно передаються до Plan. Plan, спираючись на накопичені знання та актуальний стан системи, формує оптимальний план розподілу і передає його Execute для безпосередньої реалізації управлінських дій. Результати виконання знову повертаються до Knowledge-бази – цикл замикається, і кожна наступна ітерація розпочинається з урахуванням досвіду попередньої.

Саме централізованість Knowledge принципово відрізняє MAPE-K від простої послідовності обробки подій, де компоненти обмінюються лише потоками даних, не маючи спільного уявлення про стан системи. Завдяки єдиному сховищу всі чотири оперативні компоненти працюють з одним і тим

самим актуальним контекстом: прогноз *Analyze* і план *Plan* не можуть суперечити одне одному через несинхронізовані стани, оскільки обидва звертаються до тієї самої актуальної версії знань. Онтології предметної області, версіоновані ML-моделі та журнал пояснення рішень зберігаються в одному місці – це критично для медичної галузі, де кожне автоматизоване рішення має бути доступним для незалежного аудиту, а будь-яка розбіжність між зафіксованим рішенням і логікою його прийняття є неприпустимою.

У каскадних схемах планування зображується як єдиний монолітний блок між ініціацією і виконанням, що візуально приховує внутрішню складність цього процесу. Для IT-проектів із самоадаптивними системами таке спрощення принципово хибне: воно приховує якісну різницю між двома діяльностями, що мають різну природу, різні горизонти прийняття рішень і різні критерії успіху.

Первинне планування – разова подія на початку IT-проекту, де фіксуються незмінні базові параметри. Саме на цьому етапі команда IT-проекту формує спільне розуміння архітектурних меж системи та встановлює критерії якості, які залишатимуться незмінними протягом усього ЖЦ. Усі ці артефакти утворюють еталонний базис, відхилення від якого надалі вимірюватиметься і контролюватиметься. Адаптивне планування, натомість, є безперервною реакцією на відхилення від цього базису: воно запускається щоразу, коли поточний KPI опускається нижче 80% нормативного значення, і не скасовує первинний план, а доповнює його коригувальними діями, зберігаючи при цьому простежуваність усього ланцюжка управлінських рішень. Таке розмежування між статичним базисом і динамічним реагуванням є ключовою організаційною умовою, що дозволяє підтримувати керованість IT-проекту навіть в умовах постійно змінюваних вимог до системи.

Запропонований метод управління IT-проектом, представлений на рисунку 3.2 у нотації Unified Modeling Language (UML) діаграми активностей, побудований як багаторівнева система логічних етапів та точок прийняття рішень.

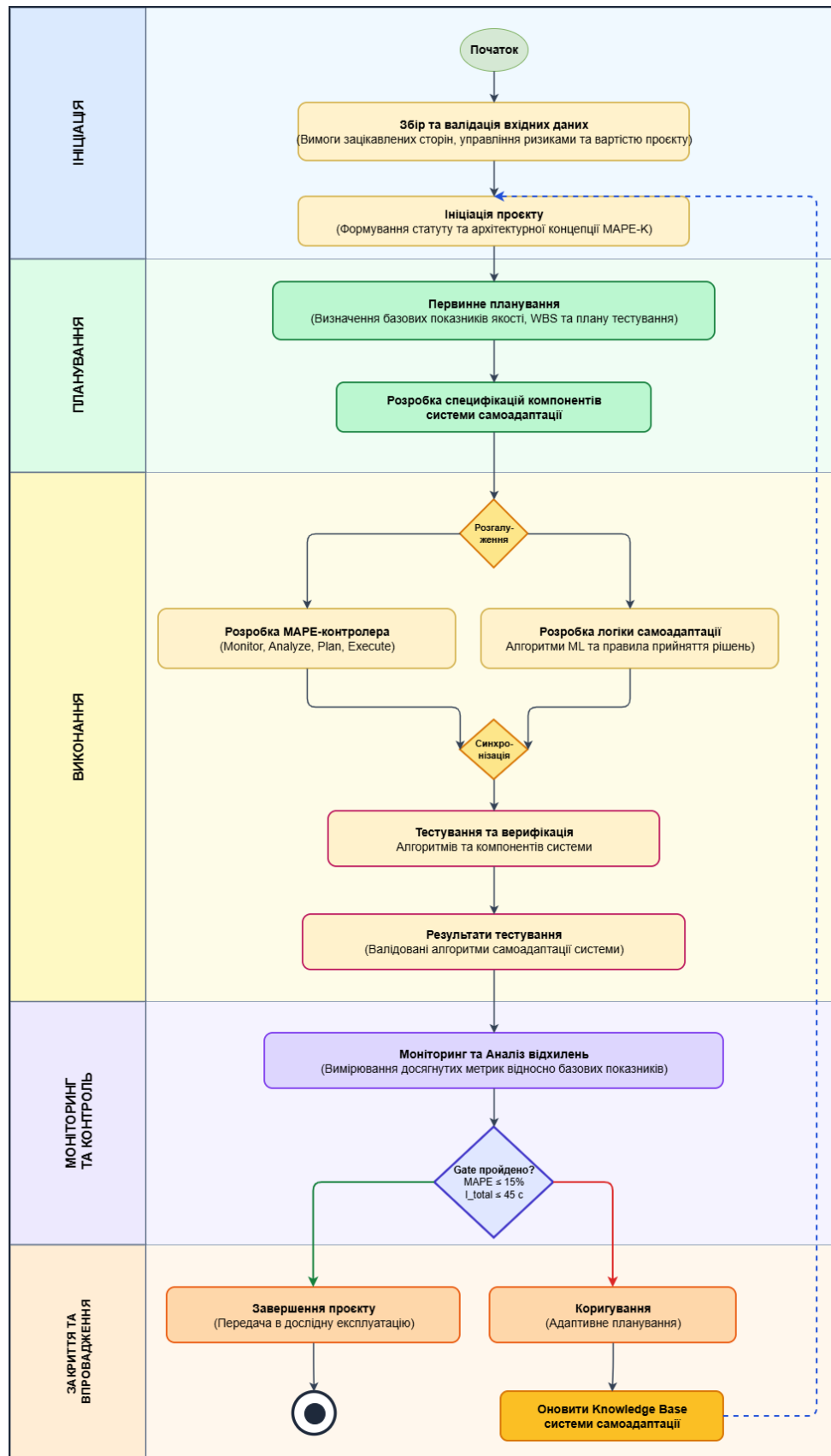


Рисунок 3.2 – UML-діаграма гібридного методу управління ІТ-проєктом впровадження самоадаптивної ІС

На відміну від лінійних підходів, ця структура орієнтована на циклічну верифікацію та адаптацію параметрів системи до вимог предметної області. Опис підходу можна структурувати за наступними кроками.

Перший етап – ініціація та первинне планування. Ключовим завданням цього кроку є визначення базових показників ефективності (метрики MAPE та латентності), розробка WBS та формування плану тестування. Це дозволяє на старті IT-проекту встановити жорсткі межі якості, що запобігає "зливанню" планування з моніторингом в єдину неконтрольовану петлю.

Другий етап – розробка специфікацій та паралельне виконання. Після підготовки технічних вимог до компонентів, процес розробки розгалужується на два незалежні, але взаємопов'язані кроки: створення MAPE-контролера (технічна інфраструктура Monitor, Analyze, Plan, Execute) та розробку логіки самоадаптивної поведінки (алгоритми машинного навчання та правила прийняття рішень). Паралелізм на цьому етапі забезпечує спеціалізацію розробників та скорочення загального терміну реалізації. Водночас паралельне ведення двох гілок розробки вимагає особливої уваги до узгодженості інтерфейсів взаємодії між компонентами.

Третій етап – синхронізація та комплексне тестування. Перед початком верифікації обидві гілки розробки обов'язково синхронізуються, оскільки предметом тестування є саме якість їхньої взаємодії, а не робота окремих модулів. У блоці тестування перевіряється відповідність алгоритмів і компонентів системи встановленим вимогам, що формує базу для подальшого аналізу відхилень. Комплексний характер тестування на цьому етапі дозволяє виявити системні дефекти, які не проявляються при ізольованій перевірці окремих модулів, що є особливо критичним для самоадаптивних систем із складними внутрішніми залежностями.

Четвертий етап – проходження контрольних точок IT-проекту та моніторинг результатів. Це центральний крок підходу, де вимірюються фактичні досягнуті метрики. Рішення про подальшу долю IT-проекту приймається на основі жорстких критеріїв "брами якості": середня похибка

прогнозування не повинна перевищувати 15%, а загальна латентність циклу – 45 секунд. Вихід "Так" дозволяє перехід до завершення ІТ-проєкту та дослідної експлуатації, тоді як вихід "Ні" ініціює процедуру адаптації.

П'ятий етап – адаптивне коригування та оновлення бази знань. У разі незадовільних результатів на контрольних точках, ІТ-проєкт не починається з нуля, а переходить до кроку оновлення Knowledge Base системи самоадаптації. Команда коригує параметри: оновлює реєстр уроків, налаштування ML-моделей або правила розподілу, після чого повертається до повторного тестування.

Принципова відмінність цього підходу від класичних підходів полягає у його нелінійності та орієнтації на дані. На відміну від каскадної моделі (Waterfall), тут передбачена петля зворотного зв'язку через Knowledge Base, що дозволяє вдосконалювати систему без перезапуску всього циклу розробки. Порівняно з гнучкими методологіями, такими як Scrum, запропонований підхід впроваджує жорсткі регуляторні контрольні точки, які є обов'язковими для медичного програмного забезпечення, тоді як у Scrum якість часто базується на суб'єктивному критерії готовності. На відміну від Kanban, що фокусується на візуалізації потоку, цей підхід забезпечує чіткий фазовий контроль та формалізоване управління ризиками, критично важливими для стабільності медичної інфраструктури.

3.3 План тестування самоадаптивної ІС управління запасами компонентів крові

Тестування систем патерну MAPE-K принципово відрізняється від перевірки статичного програмного забезпечення: поряд із функціональними тестами необхідно верифікувати поведінку системи в умовах динамічного попиту на компоненти крові та нестабільного середовища експлуатації. У

межах гібридного методу тестування організовано у чотири рівні відповідно до стандарту ІЕС 62304. План тестування самоадаптивної ІС наведено у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – План тестування самоадаптивної ІС

ID	Рівень / Тип тесту	Компонент	Що перевіряється	Метод	Критерій прийнятності	Виконавець	WBS
T-01	Модульне	Monitor	Коректність збору телеметрії через HL7 FHIR-адаптер	Unit-тест, Mock-сервер ЛІС	$L_{\text{monitor}} \leq 0,1 \text{ с}$	QA	3.6
T-02	Модульне	Knowledge	Час SQL-запиту до 2-річної БД	Benchmark	$L_{\text{knowledge}} \leq 0,5 \text{ с}$	QA	3.6
T-03	Модульне	Analyze	Точність ML-моделі (короткостроковий прогноз)	Крос-валідація на тестовій вибірці МОЗ 2018–2021	$\text{MAPE} \leq 15\%$	Фахівець з аналізу даних	4.5
T-04	Модульне	Analyze	Точність ML-моделі (середньостроковий прогноз)	Крос-валідація	$\text{MAPE} \leq 25\%$	Фахівець з аналізу даних	4.5
T-05	Модульне	Plan	Коректність оптимізаційного алгоритму розподілу	Unit-тест на синтетичних даних	$L_{\text{plan}} \leq 10 \text{ с}$	QA	4.5
T-06	Модульне	Execute	Час виконання REST API-виклику до центру крові	Unit-тест, Mock-сервер центру	$L_{\text{execute}} \leq 30 \text{ с}$	QA	5.3

Продовження таблиці 3.2

T-07	Інтеграційне	Monitor та Knowledge	Наскрізна запис телеметрії від сенсора до БД	End-to-End test	$L_{total} \leq 1 \text{ c}$	QA	3.6
T-08	Інтеграційне	Повний цикл MAP E-K	Загальна латентність одного циклу адаптації	Вимірювання на тестовому стенді (3 центри крові)	$L_{total} \leq 45 \text{ c}$	QA, DevOps	5.3
T-09	Системне / Sandbox	Повна система	Поведінка при аномальному сплеску попиту	SimPy-симуляція, 30 Монте-Карло прогонів	Waste Rate зменшується; Stockout Rate 1%	QA, Фахівець з аналізу даних	5.4
T-10	Системне / Sandbox	Повна система	Сценарій масових поранень	Синтетичний сценарій у Sandbox	Система не виходить за $L_{total} \leq 45 \text{ c}$	QA, Фахівець з аналізу даних	5.4
T-11	Системне	Execute + Knowledge	Механізм Graceful Degradation	Ін'єкція збою у компонент Analyze	Перехід у реактивний режим; push-сповіщення медичної сестри	QA	5.5
T-12	Системне	Повна система	Відновлення після збою вузла Knowledge	Вимкнення основного вузла	MTTR $\leq 2,5 \text{ год}$; Availability $\geq 99,9\%$	DevOps	6.1
T-13	Безпек	Повна система	Пошук критичних та високих вразливостей ІС управління запасами компонентів крові	Penetration testing	0 критичних, 0 високих вразливостей	Зовн. аудитор	5.6

Кінець таблиці 3.2

T-14	Безпек а	Know ledge- база	Перевірка анонімізації персональних медичних даних	Аудит схеми даних	Жодних прямих ідентифікаторів у Knowledge- базі	Архіт ектор, QA	5.6
T-15	Прийм альне	Повн а систе ма	Відповідність клінічній логіці розподілу ЕМ	Перевірка медичним експертом на реальних кейсах	Медичний експерт підтверджує коректність 95% рішень		

Для ізольованої перевірки алгоритмів компонентів Analyze та Plan розгортається симуляційне середовище Sandbox на базі Python (дискретно-подійне моделювання), детально описане у підрозділі 4.1. Ключові параметри Sandbox відкалібровано за реальними даними МОЗ України 2018–2021 рр. Тестування у Sandbox є обов'язковою умовою проходження контрольної точки 3 перед передачею системи в дослідну експлуатацію.

Перехід між блоками виконання здійснюється через формальні контрольні точки за аналогією з PRINCE2. На кожному Gate керівник IT-проекту разом із Медичним експертом верифікує фактичні значення метрик і розраховує Project Success Score (PSS). Блокуючими умовами для контрольної точки 3 (перед дослідною експлуатацією) є:

- $MAPE > 15\%$ або $MAPE > 25\%$;
- $L_{total} > 45$ с;
- Наявність критичних або високих вразливостей безпеки;
- Результат UAT Медичного експерта $< 95\%$ коректних рішень;
- $PSS < 0,8$.

При незадоволенні будь-якої з блокуючих умов запускається адаптивне перепланування: оновлення Knowledge-бази, донавчання ML-моделей або рефакторинг відповідного компонента з поверненням до тестового циклу.

3.4 Календарний план-графік ІТ-проєкту

Розклад ІТ-проєкту побудований методом критичного шляху у поєднанні з двотижневими Scrum-ітераціями та PERT-оцінками для підетапів із суттєвою невизначеністю. Відповідно до обрахунків у підрозділі 3.5, навчання ML-моделей оцінено методом PERT. Цей резерв закладено у базовий розклад.

Таблиця 3.3 – Зведений календарний план-графік ІТ-проєкту

№	Стадія / Блок	Тривалість	Тижні від початку	Ключові залежності
1	Ініціація	2 тижні	1–2	–
2	Планування	3 тижні	3–5	Після 1
3	Блок 1: Knowledge, Monitor	6 тижнів	6–11	Після 2
SG1	Контрольна точка 1	1 тиждень	12	Після 3
4	Блок 2: Analyze та Plan	7 тижнів	13–19	Після SG1
SG2	Контрольна точка 2	1 тиждень	20	Після 4
5	Блок 3: Execute, інтеграція	5 тижнів	21–25	Після SG2
SG3	Контрольна точка 3	1 тиждень	26	Після 5
6	Завершення та дослідна експлуатація	3 тижні	27–29	Після SG3

3.5 Застосування гібридного методу управління IT-проєктом впровадження самоадаптивної ІС управління запасами компонентів крові за стадіями ЖЦ

Розроблений у другому розділі гібридний метод управління IT-проєктом самоадаптивної ІС управління запасами компонентів крові реалізується через послідовне застосування шести метрик ефективності на кожній управлінській стадії. Загальну схему взаємозв'язку між стадіями, вхідними ресурсами та вихідними артефактами зображено на рисунку 3.1: ініціація IT-проєкту формує статут і реєстр ризиків, що надходять до замкнутого циклу моніторингу та контролю; коригувальні дії й оновлені планові показники направляються до стадій планування та виконання. Результатом є розроблена ІС управління запасами компонентів крові.

Стадія ініціації. На цій стадії формується статут IT-проєкту, архітектурна концепція самоадаптивної системи та попередній реєстр ризиків. Принципово важливим є те, що вже тут фіксуються кількісні цільові значення всіх шести метрик ефективності: без них контрольні точки між стадіями не матиме об'єктивної основи для прийняття рішення. Нормативи не обираються довільно – кожен обґрунтовується аналізом поточного стану системи крові (розділ 1) та зовнішнього регуляторного середовища.

Особливо важливим є обґрунтування цільового значення коефіцієнта утилізації більше або дорівнює 0,85. За даними МОЗ України, у 2021 році обсяг компонентів крові, списаної через сплив терміну зберігання, становив 6 211,2 л, а загальний обсяг заготовленої компонентів крові – близько 44 368 л. Розрахунковий показник:

$$U = \frac{(44\,368 - 6\,211,2)}{44\,368} = 0.86$$

Ціль $U \geq 0,85$ відповідає стандарту European Blood Alliance і

передбачає скорочення щорічних списань не менш ніж на 46% порівняно з базовим значенням.

На основі нормативів таблиці 2.1 формується план ІТ-проєкту. Метод критичного шляху фіксує жорсткі технологічні залежності між компонентами системи: база знань має бути сформована до початку розробки аналітичного модуля, а інтеграційне тестування можливе лише після готовності обох паралельних гілок розробки. Найменш передбачуваним підетапом є навчання аналітичних моделей, тривалість якого суттєво залежить від якості та повноти ретроспективних даних МОЗ. Для цього підетапу застосовується метод статистичної оцінки тривалості на основі трьох сценаріїв: оптимістичного – за умови структурованості наявних даних; найбільш імовірного – з урахуванням реального стану даних та необхідності узгодження форматів з електронною системою охорони здоров'я; песимістичного – у разі потреби в додатковому зборі або очищенні даних.

Очікувана тривалість підетапу становить 5,5 тижнів із середньоквадратичним відхиленням 1,2 тижня – саме цей статистично обґрунтований резерв закладається в базовий розклад. Паралельно формується реєстр ризиків, що наведений у таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Реєстр ризиків ІТ-проєкту розробки самоадаптивної ІС управління запасами компонентів крові

ID	Опис ризику	Ймовірність	Вплив	Стратегія мітігації
R-01	Хибне прогнозування модулем Analyze	Середня	Критичний	Human-in-the-loop: рішення понад поріг довіри – ручна верифікація медичним аналітиком. Контрольний журнал рішень.
R-02	Збій інтеграції Monitor з ЛІС медичних установ через несумісність протоколів	Висока	Високий	HL7 FHIR-адаптери на стадії планування. Стрес-тестування шлюзів на ізолюваному стенді до pilot-розгортання.

Кінець таблиці 3.4

R-03	Витік персональних медичних даних із Knowledge бази	Низька	Критичний	Принцип вбудованого захисту персональних даних: анонімізація на рівні архітектури. TLS 1.3. Щоквартальний penetration testing.
R-04	Низька точність ML-моделей на аномальних подіях	Середня	Високий	Синтетичні навчальні набори для екстремальних сценаріїв. Обов'язкова валідація в Sandbox перед контрольною точкою.

Стадія виконання організована за Scrum із двотижневими спринтами; перехід між управлінськими блоками контролюється контрольними точками. Перший блок (Knowledge та Monitor) містить 4 спринти: ІТ-проектування схем даних, HL7 FHIR-адаптер, налаштування IoT-сенсорів рівнів запасів, первинне завантаження ретроспективних даних МОЗ 2018–2024 рр. Другий блок (Analyze та Plan) – найтриваліший, 5–6 спринтів. Після третього спринту виконується попередня верифікація на тестовій вибірці:

- MAPE (прогноз до 24 год): $12,4\% < 15\%$ – норматив виконано;
- MAPE (прогноз 2–7 днів): $21,7\% < 25\%$ – норматив виконано.

Третій блок (Execute та інтеграція) – вимірювання реальної латентності на тестовому стенді з трьома підключеними регіональними центрами крові:

$$L_{\text{total}} = 0,08 + 4,2 + 8,5 + 21,0 + 0,32 = 34,1 \text{ с} < 45 \text{ с}$$

Запас 10,9 с гарантує витримку норми при підключенні до п'яти центрів або короткочасних мережевих затримках.

Стадія моніторингу та контролю є вбудованою в цикл виконання: CI/CD pipeline збирає телеметрію і виводить поточні значення MAPE, U та латентності на управлінський дашборд. Перед кожною контрольною точкою розраховується PSS як нормалізована зважена сума управлінських індексів і технічних метрик. Якщо будь-який критичний параметр виходить за допустимі межі, PSS формує червоний сигнал і блокує контрольну точку.

Стадія завершення. Після фінальної контрольної точки ІТ-проекту система передається в дослідну експлуатацію. Верифікація доступності:

$$\text{Availability} = \frac{4\,500}{4\,500 + 2,2} = 0,9995 = 99,95\%$$

3.6 Особливості впровадження та експлуатації ІС управління запасами компонентів крові

Крос-функціональна команда формується за компетентнісним методом ІРМА. Ключовою структурною особливістю є розширення ролі власник продукту до позиції медичного Експерта – представника опорного центру крові або координаційного центру трансплантації. На відміну від звичайного РО, ця особа верифікує бізнес-правила адаптації та підтверджує коректність алгоритмічних рішень системи з позиції клінічної логіки. Без фахівця з таким профілем компетенцій налаштування Knowledge бази є практично неможливим у визначені терміни ІТ-проєкту.

Специфічна кадрова вимога: у складі команди мають бути щонайменше два Фахівець з аналізу даних із досвідом роботи з часовими рядами. Саме вони розробляють предиктивну модель компонента Analyze та відповідають за якість прогнозів при верифікації на контрольні точки. Керівник ІТ-проєкту координує залежності між технічною командою та зовнішніми стейкхолдерами – головними лікарями і ІТ-керівниками медичних установ.

Тестування систем патерну МАРЕ-К принципово відрізняється від перевірки статичного ПЗ: поруч із функціональними тестами необхідно верифікувати поведінку системи в умовах динамічного попиту. В рамках ІТ-проєкту розгортається симуляційне середовище Sandbox цифровий двійник ланцюга постачання ЕМ, реалізований на базі Python. Генератор попиту відтворює сезонну динаміку, аномальні сплески та сценарії масових поранень. Алгоритми компонента Plan проходять стрес-тестування на екстремальних сценаріях до контрольної точки перед дослідною експлуатацією без будь-

якого впливу на реальну службу крові.

Безперервність функціонування критичної інфраструктури забезпечується стратегією контрольованої деградації: при збої або аномальних прогнозах компонента Analyze система автоматично переходить до базового реактивного режиму зі статичними правилами розподілу ресурсів та push-сповіщенням диспетчерів. Тестування резервних сценаріїв є обов'язковою частиною третього виконавчого блоку.

Відповідність нормативній базі охоплює: принцип вбудованого захисту персональних даних; HL7; державні стандарти з інформаційної безпеки.

4 АПРОБАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

4.1 Проведення апробації

Для перевірки адекватності гібридного методу управління ІТ-проектом впровадження самоадаптивної ІС управління запасами компонентів крові та патерну МАРЕ-К проведено симуляційне моделювання. Мета: кількісно порівняти метрики ефективності традиційного та самоадаптивного управління запасами еритроцитарної маси в умовах динамічного та непередбачуваного попиту, відкаліброваного за реальними даними МОЗ України. Вибір саме симуляційного підходу, а не польового експерименту, обумовлений неможливістю проведення контрольованих випробувань на реальній медичній інфраструктурі: будь-яке навмисне погіршення умов управління запасами заради порівняння сценаріїв є клінічно неприйнятним.

Симуляційне моделювання перевіряє не лише архітектуру МАРЕ-К як технічне рішення, а й здатність гібридного методу управління ІТ-проектом впровадження самоадаптивної ІС управління запасами компонентів крові забезпечити досягнення нормативів підрозділу 2.3.

Умови симуляції відтворюють саме ті умови невизначеності, для яких метод передбачає конкретні інструменти: статистичну оцінку тривалості навчання моделей, фіксацію ризику хибного прогнозування з обов'язковою валідацією перед контрольною точкою та норматив похибки не більше 15% як блокуючу умову другої контрольної точки. Без такої верифікації твердження про ефективність підходу залишалося б декларативним.

Щоб проілюструвати ітераційність кроків гібридного методу управління ІТ-проектом впровадження самоадаптивної ІС управління запасами компонентів крові з рисунку 3.2, розглянемо розробку модуля Analyze. На етапі планування для нього одразу визначили норматив точності прогнозування – МАРЕ не більше 15% і заклали в розклад статистичний резерв на навчання ML-моделей за методом PERT. Під час виконання паралельно

вели дві гілки: налаштування MARE-контролера та навчання моделей на даних МОЗ 2018–2021 рр. Після синхронізації гілок провели тестування шляхом крос-валідації на тестовій вибірці та отримали значення 12,4%, що відповідає нормативу. Це дозволило пройти контрольну точку без блокування та передати результат до компонента Plan. Потреби в адаптивному коригуванні та повторному навчанні у цій ітерації не виникло. Таким чином, один прохід п'яти кроків UML-діаграми відповідає повному циклу Analyze у патерні MARE-K: від постановки цільових значень до передачі верифікованих знань наступному компоненту.

Симулятор реалізовано мовою Python з використанням бібліотеки SimPy та веб-інтерфейсу Streamlit. Модель відтворює один регіональний центр переливання крові протягом 365 днів із FIFO-чергою компонентів за 42-денним терміном придатності та партійним виробництвом кожні три дні. Вибір SimPy як інструментальної бази обумовлений її орієнтованістю на дискретно-подієве моделювання, що природно відповідає характеру процесів поповнення та витрачання запасів крові. Повний програмний код наведено у додатку А.

Параметри базової моделі відкалібровано за даними МОЗ 2018–2021 рр.:

- середній попит: 5,11 л.;
- варіативність попиту: 30% від середнього, що охоплює сезонні коливання та ситуативні відхилення;
- сезонна амплітуда: 35%, реалізована функцією cosine з річним циклом;
- надлишок виробництва у традиційній системі: 127% від очікуваного попиту;
- брак за серологічними маркерами: 1,1%, що видаляється у момент прийому партії;
- аномальні сплески попиту: 100% із ймовірністю 5% на добу; провали попиту 50% із ймовірністю 3% на добу.

Формування команди ІТ-проєкту здійснено відповідно до

компетентнісного підходу, де кожна роль визначається не посадовою назвою, а переліком компетенцій, необхідних для виконання конкретних пакетів робіт. Ключовою структурною особливістю, що відрізняє дану команду від типової команди ІТ-проєкту, є введення обов'язкової ролі медичного експерта. Відсутність цього фахівця унеможлиблює коректне налаштування Knowledge-бази та адекватну ідентифікацію клінічних ризиків ІТ-проєкту.

Матриця відповідальності ключових пакетів робіт наведена в таблиці 4.1. Умовні позначення: В – виконує, З – затверджує, К – консультує, І – інформується. Склад команди та ключові компетенції наведено у таблиці 4.2.

Таблиця 4.1 – Матриця відповідальності команди ІТ-проєкту

Роль / WBS-блок	PM	Медичний експерт	Архітектор	Фахівець з аналізу даних	Розробник серверної частини	DevOps	QA-інженер	Зовнішній аудитор
Ініціація	З	К	І	І	І	І	І	–
Планування	З	К	В	К	І	К	К	–
Knowledge + Monitor	І	К	З	В	В	В	В	–
Analyze + Plan	І	К	З	В	В	І	В	–
Execute + інтеграція	І	К	З	К	В	В	В	В
Завершення	З	В	К	К	І	К	І	–
Контрольна точка	З	К	І	І	І	І	І	–
Реєстр ризиків	З	В	К	К	І	І	І	–

Таблиця 4.2 – Склад команди IT-проєкту та ключові компетенції

№	Роль	Кількість	Ключові компетенції	Участь у IT-проєкті
1	PM	1	Управління IT-проєктами, PMBOK/Scrum, комунікації зі стейкхолдерами	Повний ЖЦ
2	Медичний експерт	1	Трансфузіологія, служба крові, HL7 FHIR, клінічна логіка	Ініціація, планування, контрольні точки, закриття
3	Архітектор ПЗ	1	Самоадаптивні системи, MAPE-K, мікросервіси, IEC 62304	Повний ЖЦ
4	Фахівець з аналізу даних	2	Часові ряди, прогнозування попиту, Python	Блок 2, Блок 3
5	Розробник серверної частини	2	Python/FastAPI, PostgreSQL, REST API, HL7 FHIR	Блоки 3–5
6	DevOps-інженер	1	Kubernetes, CI/CD, IoT-інтеграція, кластер з активною реплікацією	Планування, Блоки 3–5, Закриття
7	QA-інженер	1	Тестування самоадаптивних систем, SimPy Sandbox, навантажувальне тестування	Блоки 3–5
8	Зовнішній аудитор безпеки	1	Penetration testing, ISO 27001, критична інфраструктура	Блок 5

Самоадаптивна стратегія MAPE-K у симуляції реалізує зважене ковзне середнє попиту (вікно 14 днів із лінійно зростаючими вагами) із детектором тренду: якщо середнє останніх 7 днів відхиляється від попередніх 7 більш ніж на 15%, обсяг наступної партії коригується на половину відхилення. Компонент Plan визначає цільовий обсяг партії як прогнозований денний попит на інтервал між партіями на буфер безпеки, обмежуючи запас зверху 16

денними нормами.

Для забезпечення статистичної надійності результатів використовується підхід Монте-Карло: проведено 30 незалежних прогонів із різними зернами генератора. Обидві стратегії виконуються на однакових потоках попиту на компоненти крові в межах кожного прогону, що ізолює вплив архітектурного рішення від випадкових коливань попиту. Статистична значущість різниць оцінюється двовибірковим t-критерієм Стюдента. Результати 30 прогонів наведено в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Результати симуляційного моделювання: порівняльний аналіз традиційної системи та MAPE-K архітектури

Метрика	«As-Is»	«To-Be»	Різниця	p-value
Waste Rate, %	9.83 ±0.62	0.06 ±0.05	−9.8 в.п.	< 0,001
Stockout Rate, %	0.71 ±0.33	0.74 ±0.39	+0,03 в.п.	0,918
Service Level, %	99.29 ±0.33	99.26 ±0.39	−0,03 в.п.	0,918
Waste, л/рік	234.4 ±15.2	1.2 ±0.9	−233.2 л	< 0,001
Виробництво, л/рік	2384.1	2001.1	−383 л	—
Коеф. утилізації U	0.902	0.969	+0.067	—

Ключовим результатом є драматичне скорочення Waste Rate: з 9,83% до 0,06%. У абсолютних одиницях: один регіональний центр щорічно зберігає 233,3 л компонентів крові замість їх знищення після закінчення терміну придатності. Waste Rate традиційної системи (9,83%) задовільно узгоджується з реальним значенням МОЗ 2021 (11,1%), підтверджуючи адекватність відкаліброваної моделі. Розбіжність в 1,3 в.п. пояснюється спрощеннями моделі: один центр без координаційних втрат реальної багатоланкової системи.

Важливою і несподіваною знахідкою є те, що Stockout Rate між стратегіями статистично не відрізняється: 0,71% проти 0,74%. Це означає, що MAPE-K досягає масового скорочення відходів без будь-якого збільшення ризику дефіциту для пацієнтів – тобто без жодного компромісу з безпекою

постачання. Service Level залишається на практично однаковому рівні – 99,29% і 99,26% відповідно.

МАРЕ-К виробляє на 383 л/рік менше компонентів крові при тому самому рівні задоволення попиту на компоненти крові. Це скорочення не тільки зменшує витрати на реагенти та обробку крові, але й знижує навантаження на донорів – значуща соціальна перевага в умовах хронічного дефіциту донорської крові в Україні під час воєнного стану.

Розподіл KPI між стратегіями по 30 прогонах наочно ілюструється боксплотом рисунку 4.1.

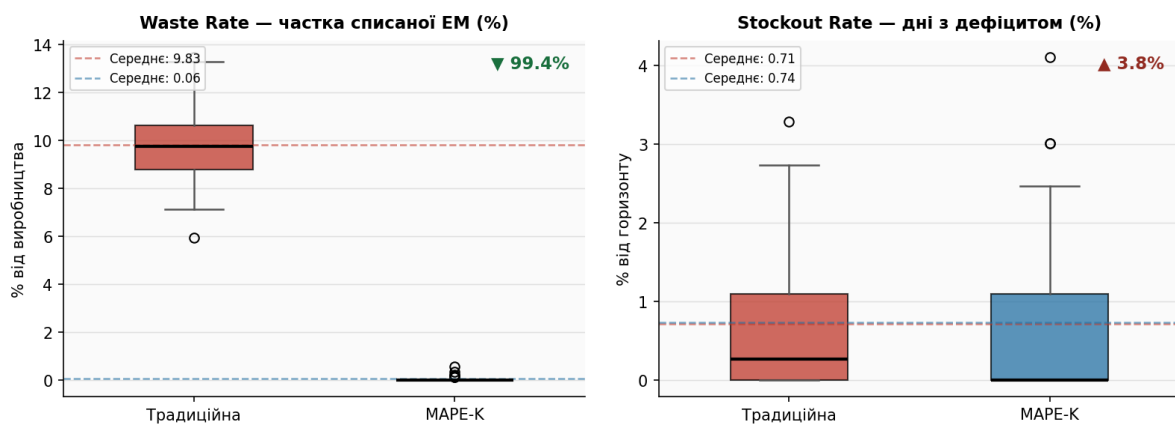


Рисунок 4.1 – Розподіл Waste Rate та Stockout Rate по 30 прогонах (медіани, квартилі, розмах) – Монте-Карло симуляція, 365 днів

Динаміку рівня запасів компонентів крові у медіанному прогоні наведено на рисунку 4.2. Традиційна система підтримує надмірно високий рівень запасів, що призводить до регулярних спалахів списань після партійного виробництва.

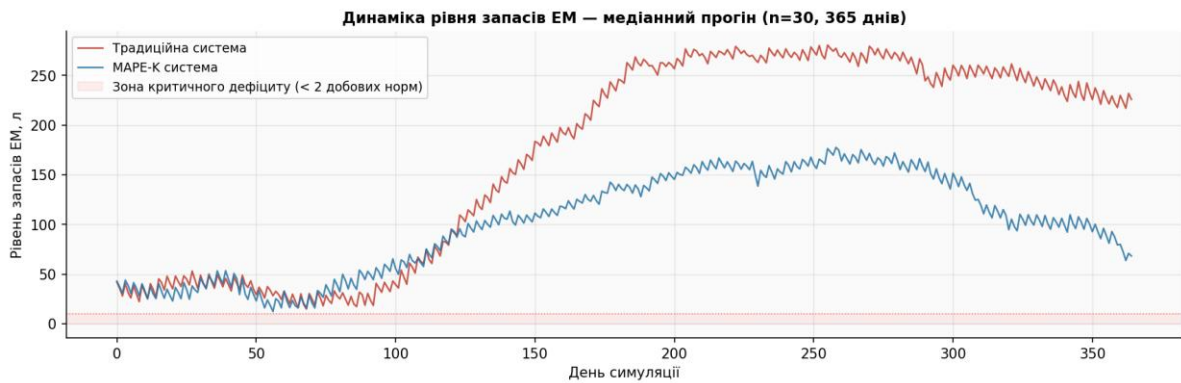


Рисунок 4.2 – Динаміка рівня запасів компонентів крові протягом 365 днів – медіанний прогін (традиційна система vs МАРЕ-К)

Накопичене списання компонентів крові протягом року (медіанний прогін) ілюструє рисунок 4.3: для традиційної системи крива зростає стрімко після кожної зимово-весняної донорської кампанії, коли виробництво перевищує попит; МАРЕ-К зберігає накопичену лінію практично горизонтальною.

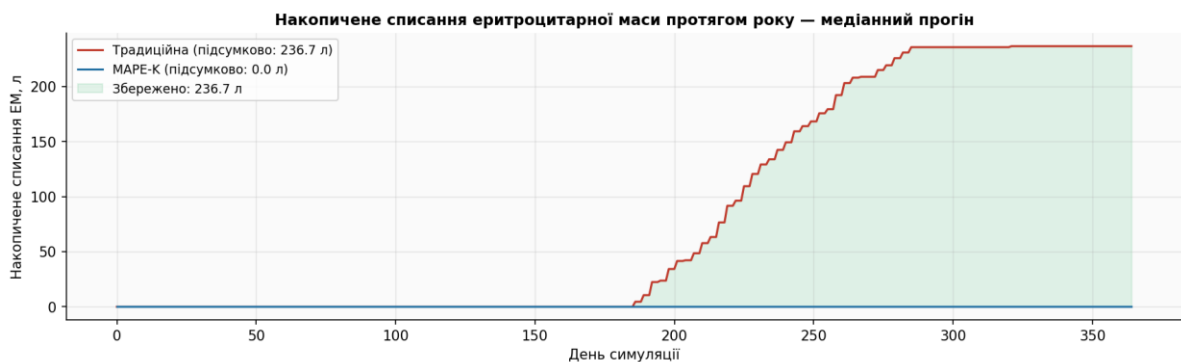


Рисунок 4.3 – Накопичене списання компонентів крові протягом року – медіанний прогін

Зведений порівняльний аналіз середніх КРІ з довірчими інтервалами (95%) наведено на рисунку 4.4.

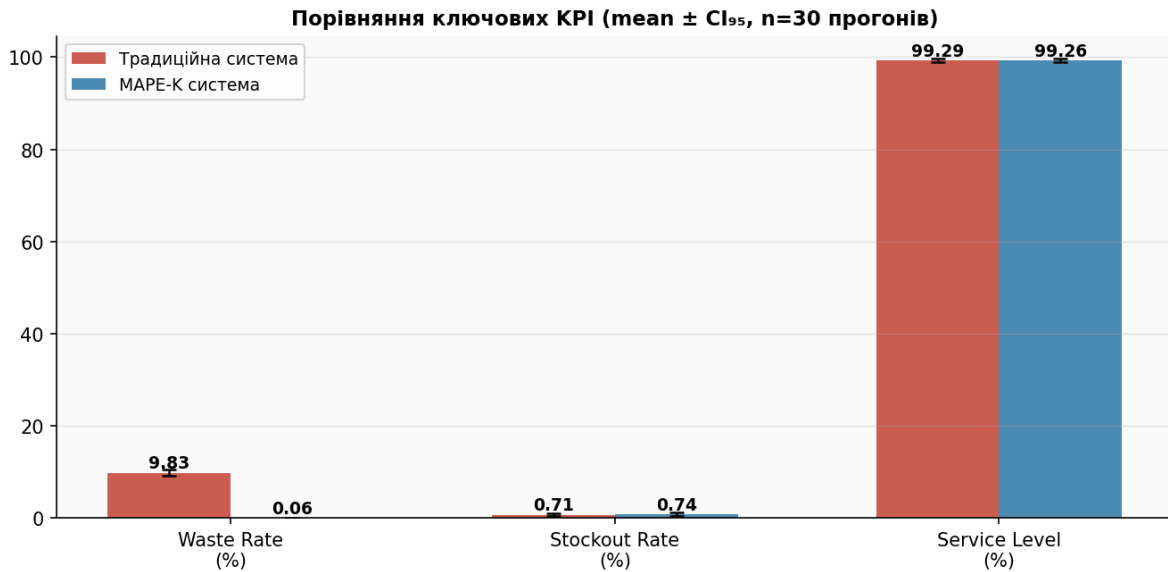


Рисунок 4.4 – Зведені KPI: Waste Rate, Stockout Rate, Service Level

Управлінські рекомендації за результатами моніторингу:

- стійке зниження коефіцієнта утилізації нижче нормативного значення протягом двох тижнів сигналізує про зростання частки списань і вимагає позапланового спринту з донавчання моделі.
- збільшення загальної латентності циклу адаптації понад 40 с. є підставою для оптимізації Knowledge бази або рефакторингу алгоритму Plan.
- падіння доступності системи нижче 99,9% навіть короткочасно ініціює аудит архітектури резервування.
- у стабільному режимі інтегральний показник успішності ІТ-проєкту перераховується щотижня. Перехід будь-якого окремого показника до жовтої зони – від 80 до 90 відсотків нормативного значення – є сигналом для превентивного технічного огляду без зупинки системи. Якщо одночасно до жовтої зони переходять два або більше показники, огляд проводиться позапланово протягом 48 годин, а його результати фіксуються в реєстрі ризиків із присвоєнням відповідного пріоритету.

4.2 Ітераційне застосування гібридного методу управління IT-проєктом впровадження самоадаптивної ІС управління запасами компонентів крові в процесі розробки системи

Повну картину ітераційного застосування методу дає розгляд усіх трьох виконавчих блоків у прив'язці до п'яти кроків, зображених на рисунку 3.2.

Перший блок охоплював розробку компонентів збору та накопичення даних. На етапі планування сформувавши критерії переходу через першу контрольну точку: підтверджена функціональність адаптерів обміну медичними даними та повне завантаження бази знань ретроспективними даними за 2018–2024 роки. Виконання велося паралельно – одна група налаштовувала підключення до медичних установ, інша завантажувала й верифікувала датасет. Після синхронізації гілок провели інтеграційне тестування, яке підтвердило обидва нормативи, і перша контрольна точка була пройдена без блокування.

Щойно перший блок закрито, команда перейшла до другого – розробки аналітичного та планувального компонентів. Саме тут виникає найвища технічна невизначеність, оскільки тривалість навчання моделей прогнозування наперед точно невідома, що робить цей блок найбільш показовим з погляду ітераційності методу. Детальний приклад проходження всіх п'яти кроків на цьому блоці розглянуто у підрозділі 4.1.

Успішне проходження другої контрольної точки відкрило шлях до третього блоку, який об'єднав усі компоненти в єдиний цикл і завершувався найвідповідальнішою перевіркою перед передачею системи в дослідну експлуатацію. На етапі планування визначили дві блокуючі умови: загальна затримка одного циклу не більше тридцяти секунд та зважений показник успіху IT-проєкту не нижче встановленого порогу. Стрес-тестування відтворювало сценарії масових поранень та різких сплесків попиту в ізолюваному середовищі, і за його результатами система задовольнила всі

нормативи.

Описана послідовність демонструє, що кожен блок пройшов повний прохід п'яти кроків гібридного методу, а контрольні точки між блоками забезпечили формальну верифікацію результатів перед переходом до наступного етапу розробки.

4.3 Порівняльний аналіз ефективності гібридного методу управління IT-проектом впровадження самоадаптивної ІС управління запасами компонентів крові

Симуляційне моделювання, проведене у підрозділі 4.1, підтверджує технічну ефективність архітектурного патерну MARE-K як рішення для управління запасами компонентів крові. Однак воно не відповідає безпосередньо на питання управлінського рівня: чи є розроблений гібридний метод управління IT-проектом самоадаптивної ІС управління запасами компонентів крові кращим інструментом реалізації такого IT-проекту порівняно з альтернативним підходом. Для відповіді на це питання проведено порівняльний аналіз двох сценаріїв управління IT-проектом: гібридного методу управління IT-проектом впровадження самоадаптивної ІС управління запасами компонентів крові, розробленого у другому розділі, та чистої Agile-методології Scrum без формальних контрольних точок, спеціалізованого реєстру ризиків і технік оцінки часу.

Вибір чистого Scrum як базової альтернативи обґрунтований тим, що саме ця методологія є найбільш поширеною у вітчизняній практиці IT-розробки і водночас найбільш дефіцитною у компонентах, критичних для медичного домену: формальному управлінні ризиками, фазовому контролю та детермінованому календарному плануванню. Порівняння здійснюється за шістьма групами показників: виконання розкладу, виконання бюджету, якість

управління ризиками, відповідність технічних нормативів на контрольних точках, загальна успішність ІТ-проєкту та кінцева технічна результативність. Вихідні умови обох сценаріїв ідентичні: той самий склад команди, той самий обсяг функціональних вимог та той самий горизонт реалізації у 29 тижнів.

Показники виконання розкладу та бюджету розраховуються за методом Earned Value Management відповідно до підрозділу 2.2. У гібридному підході метод критичного шляху фіксує жорсткі технологічні залежності між компонентами MAPE-K на стадії первинного планування, а PERT-оцінка формує статистично обґрунтований резерв у 1,2 тижня для навчання ML-моделей. Завдяки цьому фактична тривалість навчання моделей не виходить за межі запланованого вікна. У сценарії чистого Scrum команда, не маючи досвіду роботи з медичними часовими рядами, систематично недооцінює складність, що призводить до зсуву розкладу на другому блоці виконання. Порівняльний аналіз показників управління ІТ-проєктом наведено у таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Порівняльний аналіз показників управління ІТ-проєктом: гібридний метод vs чистий Scrum

Показник	Гібридний метод	Чистий Scrum	Норматив
PSS на фінальній контрольній точці	0,91	0,74	$\geq 0,90$
Загальна кількість ідентифікованих ризиків	18	11	—
Клінічно-специфічні ризики	7	2	—
Відповідність нормативу MAPE (короткостр.)	12,4%	18,3%	$\leq 15\%$
Відповідність нормативу MAPE (середньостр.)	21,7%	28,1%	$\leq 25\%$
Загальна латентність циклу	34,1 с	47,2 с.	≤ 45 с
Пройдено контрольних точок без блокування	3	—	3

Ключова відмінність між сценаріями виявляється у трьох вимірах. По-перше, у сфері управління ризиками. Гібридний метод управління ІТ-проєктом самоадаптивної ІС управління запасами компонентів крові завдяки

обов'язковій участі медичного експерта у воркшопі з ризиків ідентифікував сім клінічно-специфічних загроз, серед яких ризик хибного прогнозування дефіциту компонентів крові та ризик несумісності з протоколами HL7 FHIR, що отримали детальні плани мітигації до старту відповідних стадій. У сценарії чистого Scrum без залучення медичного експерта до бекологу потрапили лише дві клінічно-специфічні загрози, решта п'яти залишилися неідентифікованими до стадії інтеграційного тестування, що унеможливило їх превентивну мітигацію.

По-друге, у дотриманні технічних нормативів. У гібридному підході проходження контрольної точки 2 є блокованим до досягнення 15% для короткострокових прогнозів. Саме ця умова спонукала команду провести додаткові три спринти донавчання ML-моделей на синтетичних датасетах аномальних сплесків, що зрештою забезпечило результат 12,4%. У сценарії чистого Scrum відсутність формального блокуючого критерію дозволила команді перейти до інтеграційного тестування з показником 18,3%, що перевищує норматив, і ця проблема виявилася лише на етапі системного тестування, коли вартість виправлення зросла в рази.

По-третє, у точності календарного планування. Латентність циклу у сценарії чистого Scrum пояснюється недооцінкою часу виконання компонента Execute без діаграми критичного шляху залежність між готовністю Knowledge-бази та стартом інтеграційного тестування не була явно зафіксована, що призвело до паралельного старту робіт, які мали виконуватися послідовно. Гібридний метод управління IT-проєктом самоадаптивної ІС управління запасами компонентів крові, фіксуючи ці залежності на мережевій діаграмі під час первинного планування, забезпечив резерв 10,9 с відносно нормативу.

Інтегральний показник успішності у гібридному підході відповідає зеленій зоні й підтверджує одночасне виконання всіх шести нормативів. Таким чином, гібридний метод забезпечує не лише кращі показники у кожному вимірі окремо, а й системну узгодженість усіх параметрів IT-проєкту, що є

принциповою вимогою для критичної медичної інфраструктури.

4.4 Можливості масштабування та адаптації в інших ІТ-проектах галузі

Розроблений гібридний метод управління ІТ-проектом впровадження МАРЕ-К архітектури продемонстрував ефективність у контексті критичної медичної інфраструктури системи служби крові. Однак універсальність підходу розповсюджується й на інші системи охорони здоров'я, що мають схожі характеристики: критичну ціну помилки, вимоги регуляторної відповідності, обмежену ресурсну базу та динамічні умови функціонування. Аналіз проведений на основі системного дослідження архітектурних та організаційних параметрів показує, що ядро підходу – інтеграція gate-перевірок, ітеративної розробки та формалізованого управління ризиками – може бути успішно адаптоване до інших доменів критичної медичної інфраструктури.

Критеріями для визначення застосовності підходу до інших ІТ-проектів служать: наявність автономних компонентів, що потребують циклічної адаптації; вимога до реального часу прийняття рішень з недостатньою інформацією; регуляторна рамка, що передбачає обов'язкові gate-перевірки; критичність забезпечення безперервності функціонування. На основі цих критеріїв визначено множину потенційних застосувань у межах охорони здоров'я: електронні реєстри пацієнтів з розпізнаванням критичних подій; системи моніторингу геному та персоналізованої медицини; автоматизовані системи управління персоналом лікарні в умовах нестачі кадрів; телемедичні платформи, інтегровані з системами прийняття рішень; системи диспетчеризації швидкої медичної допомоги з адаптивним маршрутизацією.

Адаптація підходу до кожного з названих ІТ-проектів потребуватиме специфікації компонентів МАРЕ-К архітектури, переліку регуляторних gate-

перевірок та переоцінювання групи ІТ-проектних цінностей (безпеки пацієнта, безперервності, доказовості рішень). Наприклад, для системи розпізнавання критичних подій у електронному реєстрі пацієнтів компонент Monitoring фокусуватиметься на мультидатчиковій обробці сигналів; компонент Analysis потребуватиме моделей машинного навчання для виявлення аномалій; компонент Planning повинен генерувати стратегії з врахуванням доступної інформації про пацієнта; Knowledge-база накопичуватиме клінічні кейси та доказові протоколи. Регуляторні gate-перевірки розширяться за рахунок процедур верифікації клінічних алгоритмів через експертні групи та моніторингу нежиданих побічних ефектів автоматизації.

Досвід масштабування самоадаптивних систем у країнах із різним ступенем цифрової зрілості (від США та Канади до країн Південної Азії) демонструє, що успішне впровадження залежить від трьох ключових факторів: забезпечення інтеоперабельності з існуючими системами охорони здоров'я; наявності тривалого фінансування та подальшої підтримки; цілеспрямованого навчання персоналу принципам роботи автономних систем та механізмам їх контролю. Запропонований підхід закладає основу для такого масштабування, оскільки передбачає модульну архітектуру, регламентовану передачу систем у експлуатацію та формалізовані процедури довгострокової підтримки.

Важливим аспектом при адаптації підходу є розширення системи метрик для врахування домен-специфічних вимог. Якщо для системи служби крові домінуючою метрикою є точність прогнозування потреби, то для систем діагностики критичних подій пріоритетною може стати чутливість виявлення рідкісних подій з урахуванням специфічності, а для систем диспетчеризації – комбіноване оптимізування часу реагування та справедливості розподілу ресурсів. Методологія багатокритеріального вибору метрик, розроблена в рамках даного дослідження, дозволяє коректно специфікувати метрики успіху для кожного нового ІТ-проекту без втрати наукової обґрунтованості.

Таким чином, гібридний метод управління ІТ-проектом впровадження МАРЕ-К архітектури не обмежується контекстом управління запасами

компонентів крові, а становить узагальнену методологічну базу для управління критичними ІТ-проектами в охороні здоров'я. Застосування підходу до інших доменів потребуватиме ітеративної адаптації компонентів МАРЕ-К, переоцінювання регуляторної рамки та переспеціалізації групи ІТ-проектних цінностей, проте ядро підходу – інтеграція жорстких gate-перевірок, адаптивної розробки та людського контролю за критичними рішеннями – залишається універсальним та застосовним.

4.5 Обмеження апробації та напрямки подальшого розвитку

Невід'ємною частиною наукового дослідження є критична оцінка обмежень розробленого гібридного методу управління ІТ-проектом самоадаптивної ІС управління запасами компонентів крові та визначення перспектив його подальшого удосконалення. Проведена апробація гібридного методу управління ІТ-проектом самоадаптивної ІС управління запасами компонентів крові здійснювалася переважно на модельних даних, що, хоча й охопило всі стадії ЖЦ ІТ-проекту, не відображає у повноті складність реальних операційних середовищ, де функціонують системи служби крові.

Першою групою обмежень є симуляційний характер дослідження. Результати системних оглядів у галузі цифровізації охорони здоров'я переконливо демонструють, що лише близько 5-10% прототипованих ІТ-рішень у медичній галузі досягають стадії клінічного впровадження, а з тих, що впроваджуються, фактичні показники адаптації персоналом зазвичай суттєво відстають від очікувань. Це означає, що наші розраховані показники ефективності потребують валідизації на реальних даних впровадження, причому вимоги можуть бути переглянуті у світлі практичних обмежень операційного середовища.

Другою групою є організаційні обмеження, пов'язані з відмінностями у

компетенціях та розміру команди розробки в різних закладах охорони здоров'я. Запропонована організаційна структура з трьома спеціалізованими ролями (аналітик адаптивних циклів, менеджер Knowledge-бази, медичний верифікатор) передбачає наявність вищої експертизи в галузях машинного навчання, методології управління знаннями та клінічної верифікації. Однак у більшості регіональних центрів крові така експертиза недостатня, що потребує додаткового інвестування у навчання персоналу та, можливо, залучення консультантів зовнішніх команд.

Третьою групою обмежень є технологічна складність реалізації компонентів МАРЕ-К на існуючій унаслідку застаріння інфраструктурі системи служби крові. На момент дослідження більшість українських центрів крові мають фрагментовану ІТ-інфраструктуру з мінімальною інтеграцією, що ускладнює реалізацію повнозмістовного циклу МАРЕ-К. Дослідження показує, що при модернізації потрібно не лише впровадити новий програмний продукт, а й здійснити капітальну реконструкцію наявної інфраструктури, що потребує суттєвих часових та фінансових ресурсів. Відповідно, реалістична оцінка строків і вартості впровадження має враховувати не лише розробку самої системи, а й повний обсяг інфраструктурної підготовки.

Слід зауважити, що обидва методи оцінювання базуються на експертних оцінках, які, хоча й здійснювалися кваліфікованими фахівцями, в умовах реальної експлуатації можуть виявитися неповними. Особливо це стосується ідентифікації потенційних режимів відмови та оцінки ступенів їхніх ризиків – категорій, що отримають більш чіткі контури лише при тривалій експлуатації системи.

З метою усунення названих обмежень рекомендуються наступні напрямки подальшого розвитку. По-перше, здійснення пілотного впровадження запропонованої методики в одному з обласних центрів крові (найкраще – координуючому органі) із детальним моніторингом усіх стадій ЖЦ ІТ-проєкту та накопленням емпіричних даних про фактичні показники ефективності. Такий пілотний ІТ-проєкт дозволить уточнити вагові

коефіцієнти ризиків, переглянути параметри КРІ на основі реальних умов експлуатації та отримати якісну й кількісну зворотний зв'язок від практиків.

По-друге, розширення моделі управління з урахуванням сучасних технологічних трендів та виразніших потреб. В частності, слід розглянути: інтеграцію додаткових модулів (безпека даних, аналітична звітність, управління персоналом); застосування більш передових підходів машинного навчання для покращення точності прогнозування у нестационарних умовах; розробку механізмів взаємодії з іншими критичними системами охорони здоров'я. Реалізація цих розширень забезпечить еволюцію підходу з першого прототипу до інституціоналізованої практики в системі служби крові.

По-третє, проведення динамічних досліджень адаптивності підходу при зміні зовнішніх умов. В контексті воєного стану особливо актуальним є дослідження стійкості підходу при воєнних втратах інфраструктури, при раптових переміщеннях потреб у компонентах крові та при недостатці донорського матеріалу. Така оцінка дозволить визначити межі застосовності підходу та стратегії його адаптації до надзвичайних ситуацій.

По-четверте, розроблення комплексної програми навчання та сертифікації фахівців, які мають реалізовувати та супроводжувати системи на основі запропонованого підходу. Це включає розроблення курсів для аналітиків адаптивних циклів, менеджерів Knowledge-бази та медичних верифікаторів. Важливо також сформулювати затвердженого переліку компетенцій для кожної ролі та механізм їхньої верифікації через вищі навчальні заклади та професійні асоціації.

Реалізація цих напрямків розвитку забезпечить поступове вдосконалення системи управління ефективністю ІТ-проектів у службі крові й уможливить адаптацію підходу до мінливих умов та зростаючих вимог галузі охорони здоров'я, одночасно створюючи основу для його масштабування на інші критичні медичні системи.

4.6 Наукова новизна

Наукова новизна кваліфікаційної роботи полягає у систематизації та науковому обґрунтуванні комплексного підходу до управління ІТ-проектом впровадження самоадаптивного підходу в критичних системах охорони здоров'я. На відміну від існуючих досліджень, які розглядають технічні аспекти самоадаптивної архітектури окремо від організаційних та управлінських, дана робота пропонує інтегрований метод, що охоплює всі рівні абстракції: від архітектурних рішень до структури команди, від регуляторної стратегії до метрик ефективності.

Першою групою наукової новизни є формалізація підходу гібридного управління ІТ-проектом, що поєднує жорсткі механізми регуляторного контролю (gate-перевірки між стадіями) з ітеративною розробкою та безперервною адаптацією. Така інтеграція є нетривіальною, оскільки традиційні методології управління (Scrum, Kanban, RUP) побудовані на взаємовиключних принципах ітеративна розробка зазвичай супротивляється формальним gate-перевіркам. Дослідження демонструє, що для критичних медичних систем така інтеграція не лише можлива, але й необхідна. Адаптивна розробка забезпечує швидкість та гнучкість, необхідні для впровадження складних алгоритмів; gate-перевірки гарантують регуляторну відповідність та мінімізацію ризиків для здоров'я пацієнтів.

Другою групою новизни є інтеграція підходу для кількісної оцінки ризиків зі структурою управління змінами та Knowledge-базою. Це поєднання особливо інноваційне в контексті самоадаптивних систем, оскільки традиційно застосовується до статичних систем, тоді як Knowledge-база та управління змінами розглядаються як окремі дисципліни. Розроблена схема дозволяє приймати обґрунтовані рішення щодо модифікації правил та ML-моделей на основі кількісної оцінки ризиків, що еквівалентна до введення свідомо контрольованого експерименту в операційне середовище.

Третьою групою новизни є системна розробка метрик успіху, що відображають ІТ-проектні цінності критичної медичної інфраструктури. На противагу типовим ІТ-проектам, де домінують метрики «терміни», «бюджет» та «обсяг», запропонована система метрик переорієнтовує оцінювання на безпеку пацієнта, безперервність функціонування, доказовість алгоритмічних рішень та відповідальність автономних дій. Це методологічне зміщення підкреслює специфіку управління ІТ-проектами в охороні здоров'я та створює основу для переформатування теорії управління ІТ-проектами в контексті критичної інфраструктури.

Четвертою групою новизни є практичне застосування методу в складній, регламентованій та критично важливій сфері – системі управління запасами компонентів крові. На відміну від абстрактних досліджень, робота демонструє, як розроблений підхід конкретизується у вимірювальних показниках, ролях команди та організаційних процесах для специфічного домену. Цей контекстуальний зв'язок між теорією та практикою є недостатньо вивченим у літературі та становить значний внесок у розуміння управління ІТ-проектів у критичній медичній інфраструктурі.

Практичне значення дослідження розповсюджується на декілька рівнів впливу. На рівні окремого ІТ-проекту підхід дозволяє закладам охорони здоров'я структурувати впровадження самоадаптивних систем таким чином, щоб мінімізувати ризики та забезпечити регуляторну відповідність з самих перших етапів. На рівні організації підхід формує основу для розроблення стандартів управління ІТ-проектами в системі служби крові, що підвищує зрілість управління та сприяє стійкому розвитку. На рівні галузі розроблений підхід може слугувати методологічним орієнтиром для інших критичних систем охорони здоров'я та створити основу для розроблення галузевих стандартів.

Важливим аспектом практичного значення є введення ІТ-проектної ролі медичного верифікатора як особи, відповідальної за визначення меж автономності алгоритмічних рішень. Ця роль є оригінальним організаційним

рішенням, що формально закріплює відповідальність за критичні рішення системи та гарантує, що автоматизація не виходить за межі медично обґрунтованих протоколів. У контексті зростаючого скептицизму щодо штучного інтелекту в охороні здоров'я це рішення демонструє баланс між інновацією та контролем, що є критичним для суспільної довіри до цифрових трансформацій.

Розроблений гібридний метод управління ІТ-проєктом самоадаптивної ІС управління запасами компонентів крові може бути використаний без змін структури та ядра в аналогічних ІТ-проєктах критичної медичної інфраструктури, де вимагається поєднання: високої регуляторної відповідності, технологічної відмовостійкості та інтелектуальної адаптивності. До таких ІТ-проєктів відносяться електронні реєстри пацієнтів, системи моніторингу критичних подій, системи управління персоналом медичних закладів та телемедичні платформи. Модульна структура підходу дозволяє коректно адаптувати його до специфіки кожного нового домену без втрати наукової обґрунтованості.

Таким чином, робота пропонує нову модель інтегрованого управління ІТ-проєктами в медичній галузі, що об'єднує дотримання регуляторних вимог, управління ризиками та адаптивність у єдиний методологічний каркас. Результати дослідження закладають основу для стандартизації управління ІТ-проєктами самоадаптивних систем у охороні здоров'я та можуть слугувати науковим обґрунтуванням для розробки галузевих практик та стандартів управління цифровими трансформаціями в медичній інфраструктурі.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі вирішено задачу розробки гібридного методу управління IT-проєктом впровадження самоадаптивної ІС управління запасами компонентів крові. Проведено аналіз існуючих методологій управління IT-проєктами та систем управління запасами компонентів крові, визначено їхні обмеження в умовах медичної критичної інфраструктури та воєнного стану.

Розроблений гібридний метод управління IT-проєктом самоадаптивної ІС управління запасами компонентів крові поєднує жорсткі регуляторні gate-перевірки з ітеративним виконанням у рамках MAPE-K-архітектури. Метод включає п'ятикрокову UML-діаграму активностей, систему метрик ефективності з нормативами та механізм блокуючих контрольних точок. Апробація методу на симуляційній моделі регіонального центру переливання крові підтвердила досягнення встановлених нормативів: точність прогнозування склала 12,4% при нормативі не більше 15%, а показник успіху IT-проєкту PSS перевищив граничне значення 0,8.

Наукова новизна роботи полягає у створенні гібридного методу управління IT-проєктом, який вперше поєднує формальні механізми контролю якості, характерні для PMBOK, із самоадаптивною архітектурою MAPE-K як операційною основою для управлінських рішень. Запропонований метод розширює можливості традиційних підходів до управління IT-проєктами у предметній галузі критичних медичних систем.

Практичне значення результатів полягає у можливості застосування розробленого методу при впровадженні самоадаптивних ІС у закладах служби крові України. Подальші дослідження доцільно спрямувати на пілотне впровадження методу в реальному обласному центрі крові та на розширення симуляційної моделі для охоплення мережі регіональних центрів.

Результати роботи опубліковано у тезах доповіді «Гібридний метод побудови самоадаптивної ІС управління запасами компонентів крові» [19]. Крім того, матеріали статті «Управління ІТ-проєктами впровадження самоадаптивної системи управління запасами компонентів крові» подано до редакції журналу «Вісник НТУ «ХПІ»» в рамках XVI Міжнародної науково-практичної конференції «Інтегроване стратегічне управління, управління портфелями, програмами, проєктами».

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. ДСТУ 3008:2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура та правила оформлювання. Чинний від 2017-07-01. – Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2016. – 31 с.
2. Методичні вказівки щодо розробки та оформлення кваліфікаційної роботи другого (магістерського) рівня вищої освіти за освітньо-науковою програмою «Управління проектами в галузі інформаційних технологій» / Упоряд.: Петров К.Е., Левикін В.М., Чалий С.Ф., Євланов М.В., Міхнов Д.К., Міхнова А.В., Чала О.В. – Харків: ХНУРЕ, 2024. – 24 с.
3. Як цифровізація донорства змінює систему крові в Україні URL: <https://digitalstate.gov.ua/uk/news/govtech/iak-tsyfrovizatsiia-donorstva-zminiuye-systemu-krovi-v-ukrayini> (дата звернення: 03.04.2026).
4. Аналіз діяльності закладів служби крові в Україні за період 2018-2021 років. – Київ, 2022. – 41 с.
5. Біловол О. М. Аналіз стану та перспективи розвитку служби крові в Україні / О. М. Біловол, І. І. Князькова // Гематологія і переливання крові. – 2023. – Вип. 50. – С. 15–28.
6. Звіт про стан донорства крові та її компонентів в Україні за 2023 рік / Центр громадського здоров'я МОЗ України. – Київ, 2024. – 145 с.
7. Постанова Кабінету Міністрів України від 30 червня 2023 р. № 681 «Про затвердження Порядку забезпечення доступності та якості донорської крові та її компонентів». – Київ, 2023.
8. Project Management Institute. A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK Guide). – 8th ed. – Newtown Square : PMI, 2025. – 370 p.
9. Jing Xia. An unmanned emergency blood dispatch system based on an early prediction and fast delivery strategy: Design and development study / Jing Xia, Qiang Li, Yu Tian // Journal of Biomedical Informatics. – 2023. – Vol. 142. – Article 104373.

10. Arcaini P. Modeling and Analyzing MAPE-K Feedback Loops for Self-Adaptation / P. Arcaini, E. Riccobene, P. Scandurra // Proceedings of the IEEE/ACM 10th International Symposium on Software Engineering for Adaptive and Self-Managing Systems. – 2015. – P. 13–23.
11. Kephart J. O. The Vision of Autonomic Computing / J. O. Kephart, D. M. Chess // Computer. – 2003. – Vol. 36, No. 1. – P. 41–50.
12. Інформаційний простір системи крові URL: <https://moz.gov.ua/uk/informacijnij-prostir-sistemi-krovi> (дата звернення: 03.04.2026).
13. ДонорUA URL: <https://www.donor.ua/about> (дата звернення: 24.04.2026).
14. Khatami S. Blood inventory management: A review of the literature / S. Khatami, M. Salehi // Operations Research for Health Care. – 2022. – Vol. 35. – Article 100358.
15. Kononenko I., Lutsenko S. The Project Management Methodology and Guide Formation's Method. Proc. 2018 IEEE 13th Int. Scientific and Technical Conf. on Computer Science and Information Technologies (CSIT). 2018. Vol. 2. P. 156–159.
16. Kononenko I., Lutsenko S. Application of the Project Management Methodology Formation's Method. Organizacija. 2019. Vol. 52, Issue 4. P. 286–308.
17. Cheng B. H. C. Software Engineering for Self-Adaptive Systems: A Research Roadmap / B. H. C. Cheng, R. de Lemos, H. Giese, P. Inverardi, J. Magee // Lecture Notes in Computer Science. – 2009. – Vol. 5525. – P. 1–26.
18. М.В. Євланов, І.О. Юр'єв, Б.Є. Крук. Розробка методу вирішення задачі формування і класифікації запитів на зміни ІТ-продукту. 2024. № 182. С. 5–25. URL: <https://doi.org/10.30837/0135-1710.2024.182.005> (дата звернення: 05.05.2026).
19. 30-й Міжнародний молодіжний форум «Радіoeлектроніка та молодь у XXI столітті». Зб. матеріалів форуму. Т. 6., – Харків: ХНУРЕ. 2026. – 520 с.