

НАЦІОНАЛЬНИЙ АЕРОКОСМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ АВІАЦІЙНИЙ ІНСТИТУТ»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АЕРОКОСМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ АВІАЦІЙНИЙ ІНСТИТУТ»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Канарський Євгеній Олександрович

УДК 004.5:004.94:519.217:629.7.014-519(043)

ДИСЕРТАЦІЯ

**МЕТОДИ ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ЛЮДИНО-МАШИНИХ
ІНТЕРФЕЙСІВ НА ОСНОВІ ДОПОВНЕНОЇ РЕАЛЬНОСТІ
ДЛЯ БЕЗПЛОТНИХ СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ
ПОТЕНЦІЙНО НЕБЕЗПЕЧНИХ ТЕРИТОРІЙ**

Спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія

Галузь знань 12 Інформаційні технології

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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

_____ Є. О. Канарський

Науковий керівник Орехов Олександр Олександрович, к.т.н., доцент

Харків – 2026

АНОТАЦІЯ

Канарський Євгеній Олександрович. Методи оцінювання якості людино-машинних інтерфейсів на основі доповненої реальності для безпілотних систем моніторингу потенційно небезпечних територій – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 123 Комп'ютерна інженерія. – Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Харків, 2026.

Дисертаційна робота присвячена розробленню методів і програмних засобів оцінювання якості людино-машинних інтерфейсів на основі доповненої реальності для безпілотних систем моніторингу потенційно небезпечних територій.

Об'єктом дослідження є процеси оцінювання якості людино-машинних інтерфейсів на основі доповненої реальності для безпілотних систем моніторингу потенційно небезпечних територій.

Предметом дослідження являються моделі, методи та засоби забезпечення якості людино-машинних інтерфейсів на основі доповненої реальності для безпілотних систем моніторингу потенційно небезпечних територій.

У роботі було удосконалено теоретико-множинну модель і архітектуру системи моніторингу потенційно небезпечних територій, де керування безпілотними літальними апаратами здійснюється з використанням інтерфейсів людино-машинної взаємодії на основі доповненої реальності, що дає змогу обґрунтовувати функціональні та нефункціональні вимоги, а також модифікувати модель життєвого циклу таких систем.

Удосконалено метод оцінювання якості інтерфейсів людино-машинної взаємодії на основі доповненої реальності для систем моніторингу шляхом формування профілю вимог та множини відповідних евристик, експертного оцінювання значень спеціальних метрик та визначення інтегрованого показника якості, що забезпечує підвищення достовірності оцінки.

Вперше запропоновано метод оцінювання готовності систем моніторингу потенційно небезпечних територій з інтерфейсами людино-машинної взаємодії на основі доповненої реальності, що, на відміну від відомих, базується на одно- та мультифрагментних марковських моделях, які враховують характеристики реактивності та безпомилковості дій операторів, часткові відмови та наявність резервних безпілотних літальних апаратів, що надає змогу аналізувати вплив значень параметрів при розрахунку функції готовності системи та здійснювати їх вибір для забезпечення відповідності вимогам.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що була розроблена структура інформаційної технології та програмні засоби для проведення оцінювання та вибору параметрів інтерфейсів людино-машинної взаємодії на основі доповненої реальності для систем моніторингу.

Ключові слова: Інтернет речей, комп'ютерна система, система моніторингу, система моніторингу довкілля, безпілотна авіація, безпілотні літальні апарати, людино-машинні інтерфейси, доповнена реальність, оцінювання якості, моделювання, об'єктивний фактор, суб'єктивний фактор, ланцюги Маркова, багатофрагментна модель, інформаційна технологія, якість програмного забезпечення.

Список публікацій здобувача:

1. Канарський Є. О., Орехов О. О., Стадник А. О. Оцінювання якості систем доповненої реальності: аналіз стану досліджень. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2022. Вип. 4 (70), С. 79–87. DOI: 10.26906/SUNZ.2022.4.079 (Категорія Б)
2. Kanarskyi Y., Kharchenko V., Orekhov O., Ponochovnyi Y. Markov modelling of human-machine interaction in an augmented reality environment for UAV/UGV-based hazardous area monitoring systems. *Radioelectronic and Computer Systems*. 2025. № 4 (116). P. 35–54. DOI: 10.32620/reks.2025.4.03 (Scopus, Q2)
3. Канарський Є. О., Орехов О. О. Експертне оцінювання критеріїв якості людино-машинних інтерфейсів доповненої реальності. *Автоматизовані системи управління та прилади автоматики*. 2025. №187, С. 87–102. DOI: 10.30837/0135-1710.2025.187.087 (Категорія Б)

4. Канарський Є. О., Орехов О. О. Інформаційна технологія оцінювання якості інтерфейсів людино-машинної взаємодії на основі доповненої реальності безпілотних систем моніторингу. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2026. №1, С. 70–76. DOI: 10.31891/2219-9365-2026-85-9 (Категорія Б)

5. Канарський Є. О., Орехов О. О., Стадник А. О. Методи оцінювання якості систем доповненої реальності // Методи та технології забезпечення якості та безпеки інтелектуальних систем: колективна монографія. Харків: Юстон, 2023. С. 57–73.

6. Kanarskyi Y., Kharchenko V., Kliushnikov I., Orehov O., Ponochovnyy Y., Stadnyk, A. Models of Availability Assessing UAV-based Systems for Monitoring Dangerous Space Considering Human Machine Interface with Embedded AR. *2025 IEEE 13th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS)*. 2025. P. 1421–1426. DOI: 10.1109/IDAACS68557.2025.11322273 (Scopus)

7. Kanarskyi Y., Orehov O., Kharchenko V., Stadnyk A. UAV/UGV-based system of unexploded ordnance detection: architecture and augmented reality interface // *ICTM-2025: Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering*, Kharkiv, 2025.

8. Канарський Є. О. Проблеми визначень поняття доповненої та інших видів реальності [Електронний ресурс] : відеозапис семінару // Гарантоздатні Інформаційні Технології. 2025.

9. Канарський Є. О. Огляд концепції зменшеної реальності [Електронний ресурс] : відеозапис семінару // Гарантоздатні Інформаційні Технології. 2024.

10. Канарський Є. О. IEEE P2048.101 Проект стандарту для доповненої реальності на мобільних пристроях [Електронний ресурс] : відеозапис семінару // Гарантоздатні Інформаційні Технології. 2024.

11. Канарський Є. О. Система моніторингу небезпечних середовищ [Електронний ресурс] // Перспективні мережні та комп'ютерні технології (ПерСиК): матеріали конференції, Харків, 2025. Усна доповідь.

12. Канарський Є. О. Методи та засоби оцінювання якості систем доповненої реальності [Електронний ресурс] // Критичні комп'ютерні технології та системи (КриКТехС): матеріали семінару, Харків, 2022. Усна доповідь.

ABSTRACT

Kanarskyi Yevhenii. Methods for quality assessment of augmented reality-based human-machine interfaces in unmanned monitoring systems for monitoring potentially dangerous areas.

Dissertation on competition for scientific degree of Doctor of Philosophy by specialty 123 Computer Engineering. – National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, 2026.

The dissertation is devoted to the development of methods and software tools for evaluating the quality of augmented reality-based human-machine interfaces for unmanned systems used in monitoring potentially dangerous areas.

The object of the research is the processes of evaluating the quality of augmented reality-based human-machine interfaces for unmanned systems used in monitoring potentially dangerous areas.

The subject of the research comprises models, methods, and tools for ensuring the quality of augmented reality-based human-machine interfaces for unmanned systems for monitoring potentially dangerous areas.

The study improves the set-theoretic model and system architecture of a monitoring system for potentially dangerous areas, where unmanned aerial vehicles are controlled using augmented reality-based human-machine interaction interfaces. This enables the justification of functional and non-functional requirements and the modification of the system lifecycle model.

A method for evaluating the quality of augmented reality-based human-machine interaction interfaces for monitoring systems has been improved through the formation of a requirements profile and a set of corresponding heuristics, expert evaluation of specialized metric values, and the computation of an integrated quality indicator, which increases the reliability of the assessment.

For the first time, a method for evaluating the readiness of monitoring systems for potentially dangerous areas with augmented reality-based human-machine interfaces has been proposed. Unlike existing approaches, it is based on single- and multi-fragment

Markov models that take into account operator reactivity and correctness, partial failures, and the presence of redundant unmanned aerial vehicles. This enables the analysis of parameter influence on system availability and supports parameter selection to ensure compliance with requirements.

The practical significance of the obtained results lies in the development of an information technology architecture and software tools for evaluating and selecting parameters of augmented reality-based human–machine interfaces in monitoring systems.

Keywords: Internet of Things, computer system, monitoring system, environmental monitoring system, unmanned aviation, unmanned aerial vehicles, human-machine interfaces, augmented reality, quality assessment, modelling, objective factor, subjective factor, Markov chains, multi-fragmental model, information technology, software quality.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	11
ВСТУП.....	12
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ЛЮДИНО-МАШИННИХ ІНТЕРФЕЙСІВ НА ОСНОВІ ДОПОВНЕНОЇ РЕАЛЬНОСТІ. ЗАДАЧІ І МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕННЯ	17
1.1 Аналіз тенденцій використання технології доповненої реальності	17
1.2 Аналіз існуючих методів оцінювання якості людино-машинних інтерфейсів на основі доповненої реальності	20
1.3 Використання інтерфейсів людино-машинної взаємодії на основі доповненої реальності в системах моніторингу потенційно небезпечних територій	40
1.4 Постановка задачі і обґрунтування методики досліджень	44
1.4.1 Постановка загального та часткових завдань дослідження	44
1.4.2 Обґрунтування методики та математичного апарату дослідження.....	45
1.5 Висновок до першого розділу	47
РОЗДІЛ 2 РОЗРОБЛЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДУ ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ЛЮДИНО-МАШИННИХ ІНТЕРФЕЙСІВ НА ОСНОВІ ДОПОВНЕНОЇ РЕАЛЬНОСТІ	49
2.1 Розроблення архітектури системи моніторингу потенційно небезпечних територій	49
2.1.1 Розроблення теоретико-множинної моделі системи моніторингу потенційно небезпечних територій	49
2.1.2 Розроблення архітектури системи моніторингу потенційно небезпечних територій.....	57
2.1.3 Розроблення інтерфейсу людино-машинної взаємодії на основі доповненої реальності для оператора системи моніторингу потенційно небезпечних територій.....	61
2.2 Формування нормативних профілів вимог до інтерфейсів людино-машинної взаємодії	65
2.3 Розроблення та дослідження методики оцінювання якості інтерфейсів людино-машинної взаємодії на основі доповненої реальності	68
2.4 Оцінювання якості інтерфейсів людино-машинної взаємодії на основі доповненої реальності	73

2.5 Формування групи експертів.....	76
2.6 Результати експертного оцінювання.....	77
2.8 Висновки до другого розділу	81
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБЛЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛЕЙ ГОТОВНОСТІ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ПОТЕНЦІЙНО НЕБЕЗПЕЧНИХ ТЕРИТОРІЙ.....	83
3.1 Класифікатор моделей готовності	83
3.2 Параметризація моделей готовності	85
3.3 Розроблення та дослідження моделей	90
3.3.1 Розроблення та дослідження однофрагментної моделі без відмов і помилок оператора, з повним відновленням	90
3.3.2 Розроблення та дослідження однофрагментної моделі без відмов, з помилками оператора і повним відновленням	93
3.3.3 Розроблення та дослідження однофрагментної моделі без помилок оператора, з відмовами і повним відновленням	96
3.3.4 Розроблення та дослідження однофрагментної моделі з відмовами і помилками оператора та повним відновленням.....	99
3.3.5 Розроблення та дослідження мультифрагментної моделі без відмов та з помилками оператора і повним відновленням.....	102
3.4 Оцінка результатів симуляції моделей готовності	106
3.5 Перевірка марковських моделей готовності.....	108
3.6 Висновок до третього розділу	109
РОЗДІЛ 4 РОЗРОБЛЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ЛЮДИНО-МАШИННИХ ІНТЕРФЕЙСІВ НА ОСНОВІ ДОПОВНЕНОЇ РЕАЛЬНОСТІ.....	111
4.1 Інформаційної технології оцінювання якості людино-машинних інтерфейсів на основі доповненої реальності	111
4.2 Опис інформаційної технології оцінювання якості людино-машинних інтерфейсів на основі доповненої реальності за допомогою IDEF0	112
4.3 Програмні засоби симуляції марковських моделей готовності	120
4.4 Програмний засіб проведення експертного оцінювання якості людино-машинних систем доповненої реальності «Survey Insight AI Web-App»	122
4.5 Аналіз результатів впровадження розроблених методів та засобів	129
4.6 Висновок за четвертим розділом	130
ВИСНОВКИ.....	132

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	135
ДОДАТОК А	146
ДОДАТОК Б	151

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

БПЛА – Безпілотний Літальний Апарат

БСМ – Безпілотна Система Моніторингу

ВНП – Вибухонебезпечні Предмети

ЛМВ – Людино-Машинна Взаємодія

ЛМІ – Людино-Машинний Інтерфейс

НРК – Наземний Роботизований Комплекс

ПНТ – Потенційно Небезпечна Територія

AI – Artificial Intelligence

AR – Augmented Reality

API – Application Programming Interface

SUS – System Usability Scale

UX – User Experience

WEM – Walkthrough Evaluation Method

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. Закономірним етапом розвитку доповненої реальності (англ. Augmented Reality, AR) являється намагання впровадити дану технологію як один з варіантів людино-машинного інтерфейсу (ЛМІ) в різноманітних інтелектуальних системах, зокрема в безпілотних системах моніторингу (БСМ) потенційно небезпечних територій (ПНТ). Подібне рішення спрямоване на скорочення часу прийняття рішень операторами БСМ та підвищення якості використання.

Водночас застосування AR вимагає розроблення та впровадження нових підходів до оцінювання якості ЛМІ, оскільки традиційні методи не враховують специфіку взаємодії та впливу, який здійснюється на користувача в процесі отримання подібного досвіду людино-машинної взаємодії (ЛМВ). Існуючі підходи до оцінювання якості ЛМІ на основі AR переважно мають суб'єктивний або фрагментарний характер і недостатньо враховують взаємозв'язок між характеристиками ЛМІ оператора та надійністю системи в умовах невизначеності й можливих відмов, що обумовлює необхідність розроблення методів оцінювання, здатних комплексно враховувати технічні й людські чинники та підвищувати загальну ефективність функціонування безпілотних систем.

Об'єкт дослідження – процеси оцінювання якості людино-машинних інтерфейсів на основі доповненої реальності для безпілотних систем моніторингу потенційно небезпечних територій.

Предмет дослідження – моделі, методи та засоби забезпечення якості людино-машинних інтерфейсів на основі доповненої реальності для безпілотних систем моніторингу потенційно небезпечних територій.

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є підвищення якості інтерфейсів людино-машинної взаємодії на основі доповненої реальності та готовності безпілотних систем моніторингу потенційно небезпечних територій з урахуванням впливу характеристик реактивності та безпомилковості роботи операторів.

Для досягнення мети дослідження необхідно вирішити наступні завдання:

- провести аналіз існуючих безпілотних систем моніторингу та методів оцінювання якості ЛМІ на основі AR. Обґрунтувати задачі і методики дослідження;
- розробити архітектуру системи з вбудованими засобами відображення AR для моніторингу ПНТ на основі безпілотних літальних апаратів (БПЛА);
- розробити метод оцінювання якості ЛМІ на основі AR для БСМ;
- дослідити вплив характеристик операторів на готовність БСМ з ЛМІ на основі AR;
- розробити програмні засоби інформаційної технології для оцінювання якості ЛМІ на основі AR для БСМ;
- впровадити отримані в ході виконання дисертаційного дослідження результати.

Методи дослідження. У дисертаційній роботі використовувались методи системного аналізу, математичне моделювання, експертне оцінювання.

Наукова новизна отриманих результатів:

- **удосконалено** теоретико-множинну модель і архітектуру системи моніторингу потенційно небезпечних територій, де керування безпілотними літальними апаратами здійснюється з використанням інтерфейсів людино-машинної взаємодії на основі доповненої реальності, що дає змогу обґрунтувати функціональні та нефункціональні вимоги, а також модифікувати модель життєвого циклу таких систем;
- **удосконалено** метод оцінювання якості інтерфейсів людино-машинної взаємодії на основі доповненої реальності для систем моніторингу шляхом формування профілю вимог та множини відповідних евристик, експертного оцінювання значень спеціальних метрик та визначення інтегрованого показника якості, що забезпечує підвищення достовірності оцінки;
- **вперше запропоновано** метод оцінювання готовності систем моніторингу потенційно небезпечних територій з інтерфейсами людино-машинної взаємодії на основі доповненої реальності, що, на відміну від відомих, базується на одно-

багатофрагментних марковських моделях, які враховують характеристики реактивності та безпомилковості дій операторів, часткові відмови та наявність резервних безпілотних літальних апаратів, що надає змогу аналізувати вплив значень параметрів при розрахунку функції готовності системи та здійснювати їх вибір для забезпечення відповідності вимогам.

Особистий внесок здобувача представлено у фахових публікаціях [1–4].

У статті [1] виконано системний огляд сучасних підходів до оцінювання якості ЛМІ на основі AR, проаналізовано існуючі методи оцінювання ЛМВ, визначено ключові фактори, що впливають на ефективність і зручність використання AR, а також виявлено основні недоліки наявних підходів.

У статті [2] було виконано розробку та дослідження підходу до експертного оцінювання якості ЛМІ на основі AR для безпілотних систем, зокрема сформовано систему критеріїв якості (керованість, захист від помилок, узгодженість, надійність тощо), створено прототип ЛМІ на основі AR, розроблено анкету на основі цих критеріїв і проведено експертне опитування, результати якого подано у вигляді радіальної діаграми для виявлення переваг і недоліків інтерфейсу та визначення напрямів його вдосконалення.

У статті [3] виконано формалізацію ЛМВ в БСМ з використанням AR, розроблено низку марковських моделей, що враховують відмови технічних засобів і помилки оператора, проведено імітаційне моделювання різних сценаріїв функціонування. Отримані результати дозволяють оцінити вплив ЛМІ на основі AR на реактивність оператора та готовність системи загалом.

У статті [4] здобувачем виконано розробку інформаційної технології оцінювання якості ЛМІ на основі AR для БСМ, що поєднує експертне оцінювання характеристик ЛМІ з формалізованим моделюванням готовності системи на основі одно- та мультифрагментних марковських моделей. Запропоновану методику формалізовано у вигляді функціональної моделі IDEF0, яка охоплює процеси аналізу архітектурних рішень, формування критеріїв якості, обчислення узагальненого показника та розробки рекомендацій, що дозволяє кількісно

оцінювати вплив параметрів ЛМІ на основі AR на надійність і ефективність функціонування системи.

Апробація матеріалів дисертації. Основні положення та ідеї дисертаційної роботи обговорено на міжнародних науково-технічних конференціях: "The 13th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS 2025)" (Gliwice, Poland, 2025); "Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering (ICTM-2025)" (м. Харків, Україна, 2025р.); "Матеріали НТК "Перспективні Мережеві і Комп'ютерні технології (ПерСиК)" (м. Харків, Україна, 2024-2025 рр.).

Зв'язок з науковими програмами, темами. Представлені в роботі результати дослідження застосовувались при виконанні науково-дослідницької роботи «Наукові засади і методи забезпечення гарантоздатності флотів БПЛА інтелектуальних систем моніторингу потенційно небезпечних і військових об'єктів» (№ Д/Р 0121U112172, 2022–2023 рр.).

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості використання розроблених методів та інформаційної технології для проектування, аналізу та вдосконалення ЛМІ на основі AR для БСМ, підвищення якості операторської діяльності та зменшення ймовірності помилок у реальних умовах експлуатації. Результати можуть бути застосовані у системах екологічного моніторингу, цивільного захисту, військових і рятувальних операціях, інфраструктурному нагляді, а також у навчальних і тренажерних комплексах для підготовки операторів безпілотних платформ.

Результати дисертаційної роботи впроваджено (додаток А):

– у навчальному процесі кафедри кібербезпеки та інтелектуальних інформаційних технологій ХАІ у вигляді методичного забезпечення для проведення лабораторних занять в навчальних дисциплінах «Розробка проєктів доповненої реальності» та «Технології віртуальної та доповненої реальності», а також при виконанні кваліфікаційних робіт магістрів кафедри за спеціальністю «Комп'ютерна інженерія»;

– при виконанні науково-дослідницької роботи «Наукові засади і методи забезпечення гарантоздатності флотів БПЛА інтелектуальних систем моніторингу потенційно небезпечних і військових об'єктів» (№ Д/Р 0121U112172 впродовж 2022–2023 рр.);

– при тестуванні оновленої версії порталу «Ліси України» в Українському ордена "Знак пошани" науково-дослідному інституті лісового господарства та агролісомеліорації ім. Г. М. Висоцького Державного агентства лісових ресурсів України та Національної академії наук України.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновку, списку виконаних джерел і додатків. Загальний обсяг дисертації складає 185 сторінок, з яких анотація двома мовами на 6 сторінках, зміст на 3 сторінках, перелік умовних позначень на 1 сторінці, основний текст на 117 сторінках, список використаних джерел із 92 найменування на 10 сторінках, додатки на 39 сторінках. Робота містить 11 таблиць та 30 рисунків.

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 6 наукових публікацій, у тому числі:

– три статті в наукових фахових виданнях України категорії «Б» за спеціальністю;

– одна стаття в фаховому виданні України категорії «А», проіндексована в базі Scopus (Q2);

– один розділ в колективній монографії;

– одна доповідь на міжнародній науковій конференції.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ЛЮДИНО-МАШИННИХ ІНТЕРФЕЙСІВ НА ОСНОВІ ДОПОВНЕНОЇ РЕАЛЬНОСТІ. ЗАДАЧІ І МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Аналіз тенденцій використання технології доповненої реальності

Розвиток інформаційних технологій за останні десятиліття дозволив значною мірою розширити перелік способів взаємодії людини з цифровими об'єктами. Окрім стандартних засобів взаємодії людини з обчислювальними пристроями за допомогою використання таких засобів, як маніпулятор типу «миша» та клавіатура, стали можливими використання голосу, жестів, засобів тактильного зв'язку тощо. Одним з таких способів взаємодії являється технологія доповненої реальності.

Доповнена реальність за визначення являється технологією, що надає можливість поєднувати просторово зареєстрований цифровий контент з реальним світом в режимі реального часу [5]. Разом з технологіями доповненої віртуальності та віртуальної реальності, вони формують реально-віртуальний континуум [6] під загальним терміном «розширена реальність».

Для забезпечення можливості використання AR необхідно мати пристрої зі складною програмно-апаратною архітектурою. Вони повинні включати обчислювальний модуль (процесор), засоби відображення інформації (дисплей), та набір сенсорів (акселерометри, цифрові компаси, системи глобального позиціонування) для відстеження їх положення в просторі.

Програмна складова технології базується на системах розпізнавання, які виконують ідентифікацію об'єктів і людей у режимі реального часу, обчислення геолокаційних параметрів, визначення просторового положення віртуальних об'єктів та відстеження змін їх характеристик. Такі системи поділяються на локаційно-залежні та об'єктно-залежні. Останні, у свою чергу, реалізуються із застосуванням штучних маркерів або без них.

Першою реалізацією такого пристрою вважається розроблена у 1968 році Айваном Сазерлендом разом з його студентом Бобом Спрауллом система на основі носимого на голові дисплея. Через значну масу пристрою він кріпився до стелі, а користувачеві демонструвалося просте стереоскопічне зображення, що змінювалося відповідно до рухів голови.

Подальшим етапом стало усунення обмежень, пов'язаних із громіздкістю обладнання. У 1978 році Стів Манн створив пристрій, який поєднував камеру та дисплей для накладання віртуальної інформації на реальне середовище в режимі реального часу [7]. У 1982 році Ден Рейтон застосував поєднання радарних і відеоданих для візуалізації руху повітряних мас у телевізійних прогнозах погоди, що стало одним із перших прикладів масового використання елементів AR [8].

У 1990-х роках, завдяки стрімкому розвитку мікропроцесорних технологій, відбулося суттєве розширення можливостей AR. У 1992 році інженер компанії Boeing Том Коделл розробив спеціалізований шолом для виробничих потреб і вперше запропонував термін «доповнена реальність» [9]. У 1993 році Стів Файнер представив інтерактивну систему інструкцій для обслуговування обладнання з використанням AR. У 1996 році Джун Рекимото та Юджі Аятцука розробили один із перших підходів до маркерної доповненої реальності – матричний метод [10].

У 1999 році національне управління з авіації і дослідження космічного простору (англ. National Aeronautics and Space Administration, NASA) застосувало AR у системі відображення даних для космічного апарата X-38, що дозволило відображати об'єкти на поверхні Землі незалежно від погодних умов. У тому ж році Хіроказу Като створив бібліотеку ARToolKit, яка стала основою для подальшого розвитку програмних засобів створення додатків на основі AR і започаткувала сучасний етап активного розвитку технології.

Значну роль у популяризації технології відіграла поява на початку 2010-х років достатньо потужних та доступних мобільних пристроїв. Наявність у смартфонах всіх необхідних апаратних компонентів дозволила AR перейти від статусу переважно ізольованої науково-дослідної технології до широко інтегрованого інструменту забезпечення людино-машинної взаємодії (ЛМВ).

Суттєво змінилися як технічні, так і функціональні характеристики AR. Розвиток програмних платформ і інструментів розробки сприяв зниженню бар'єру входу для створення додатків на основі AR, що, призвело до стрімкого зростання їх кількості та різноманітності. Інтеграція з такими технологіями, як штучний інтелект, Інтернет речей і хмарні обчислення, розширила функціональні можливості AR і дозволила перейти від простого накладання інформації до контекстно-орієнтованої підтримки діяльності користувача.

Здатність AR поєднувати віртуальні об'єкти з реальним світом відкриває численні переваги у повсякденному житті, роботі та освіті. Вже зараз вона використовується у менеджменті [11], виробництві [12, 13, 14], освітньому процесі [15, 16, 17], медицині [18, 19, 20], будівництві [21, 22], комерції [23], індустрії розваг [24] тощо. Обсяг світового ринку AR у поточному році оцінюється приблизно у 169.9 мільярдів доларів Сполучених Штатів Америки, а до 2033 року, за прогнозами, він досягне 1 050.56 мільярда доларів (рисунок 1.1) [25].

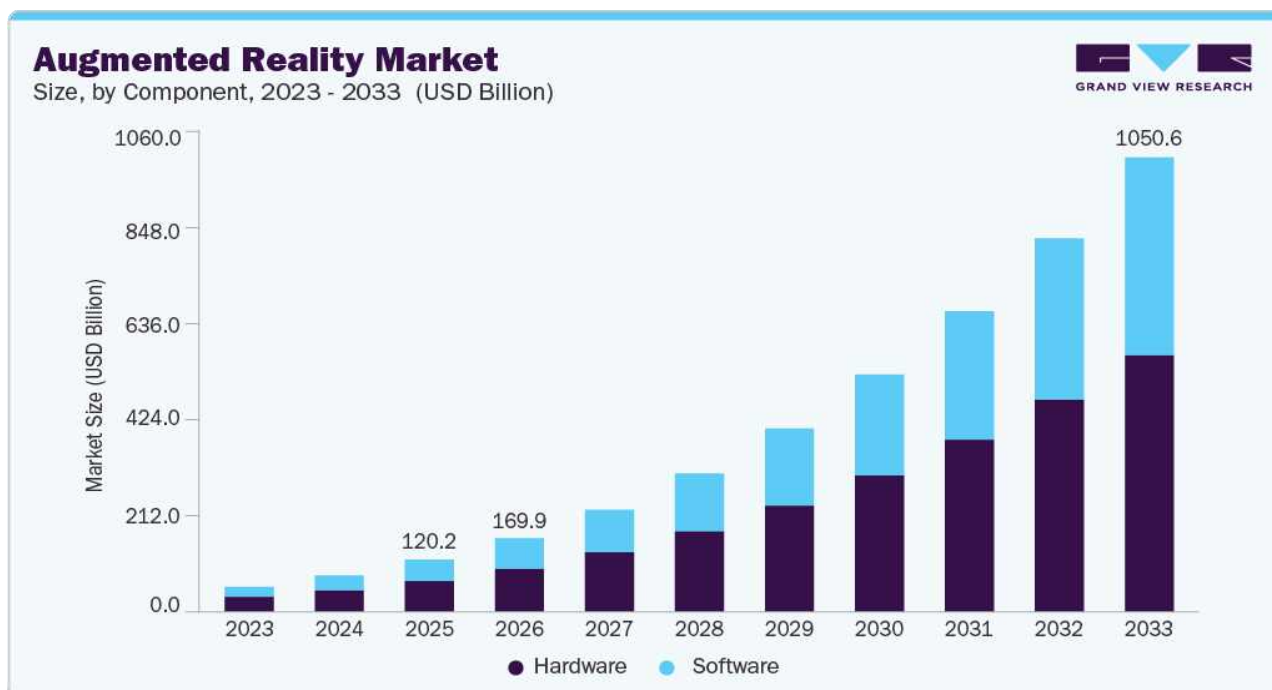


Рисунок 1.1 – Обсяг світового ринку доповненої реальності [25]

Таким чином, популяризація доповненої реальності стала переломним етапом у її розвитку, що зумовив перехід від експериментальних і

вузькоспеціалізованих рішень до масштабного впровадження у різні сфери людської діяльності. Вирішальну роль у цьому процесі відіграли мобільні пристрої, які забезпечили доступність AR без необхідності використання спеціалізованого дорогого обладнання.

Разом із позитивними змінами виник і ряд нових викликів. До них належать технічні обмеження мобільних і носимих пристроїв, питання стандартизації та сумісності рішень, забезпечення точності та надійності роботи в різних умовах, а також проблеми захисту персональних даних та інформаційна безпека. Крім того, актуальною залишається проблема оцінювання якості людино-машинних інтерфейсів на основі AR, зокрема з точки зору їх ергономічності, ефективності та впливу на користувача.

1.2 Аналіз існуючих методів оцінювання якості людино-машинних інтерфейсів на основі доповненої реальності

Більша частина досліджень якості ЛМІ на основі AR присвячена оцінюванню якості використання даного засобу взаємодії людиною з віртуальними елементами. Перші дослідження стосувались оцінки якості використання віртуальних середовищ в цілому і представляли собою просте опитування користувачів розширеної або доповненої реальності. При цьому відзначалися поширені проблеми, пов'язані зі зручністю використання та уявленням користувачів про роботу системи [26]:

- оманливі ознаки дій;
- очікування дії, яка неможлива;
- прихований функціонал;
- відсутній або неоднозначний зворотній зв'язок.

У дослідженні ці проблеми пов'язують з розташуванням елементів інтерфейсу та сприйняттям користувачами елементів розширеної реальності для орієнтування у віртуальному просторі. Одним з таких результатів став

представлений у роботі [27] покроковий метод оцінювання (англ. Walkthrough Evaluation Method, WEM). Даний метод являється вдосконаленою покроковою перевіркою на відповідність до поставлених вимог і включає наступні основні кроки:

- 1) підготовка сценаріїв та контрольних списків для користувачів;
- 2) проходження кожного сценарію з використання відповідних моделей;
- 3) критика дизайну системи;
- 4) реєстрація виявлених проблем;
- 5) об'єднання проблем, виявлених в кожному сценарії, в загальних список;
- 6) розстановка пріоритетів вирішення проблем на основі суб'єктивної оцінки.

Такий підхід характеризується відносною простотою реалізації та не потребує залучення висококваліфікованого персоналу, що робить його доступним для широкого кола учасників процесу оцінювання. Зокрема, до проведення аналізу можуть бути залучені користувачі або персонал із базовим рівнем підготовки, що суттєво знижує витрати часу і ресурсів на організацію експерименту. Водночас для підвищення достовірності та відтворюваності результатів доцільним є проведення повторних оцінювань із розширенням вибірки оцінювачів, що дозволяє мінімізувати вплив суб'єктивних факторів і підвищити достовірність отриманих результатів.

За результатами перевірки, WEM може правильно визначити до 80.4% спостережуваних проблем. При цьому більшість упущених недоліків стосуються аспектів навігації у віртуальному середовищі та, як правило, не мають критичного впливу на загальну ефективність взаємодії користувача із системою. Це свідчить про достатньо високий рівень ефективності методу при відносно низьких витратах на його застосування.

Загалом у сфері оцінювання якості використання віртуальних середовищ було запропоновано значну кількість методів, що відрізняються за підходами, складністю реалізації, вимогами до ресурсів та точністю результатів. Їх класифікація стала предметом окремого дослідження (рисунок 1.2) [28]. Проте, не зважаючи на великий перелік доступних методів та їх ефективність при проведенні

аналізу, залишалась актуальною потреба в більш економічно-доцільних методах інженерії якості використання [29] і адаптація їх до майбутніх вимог галузі [30].



Рисунок 1.2 – Класифікація методів дослідження якості використання віртуальних середовищ [28]

Відокремлювати розширену реальність від віртуального середовища як самостійне явище для аналізу якості використання стали лише на початку XXI століття [31]. Одним з перших адаптованих до оцінки доповненої реальності методів став метод аналізу домену [32]. Запропонований процес аналізу складається з чотирьох основних дій:

- 1) розробка варіантів використання – варіанти використання описують випадки використання, для яких призначена система;
- 2) профілі користувачів – дозволяє інженерам зосередити зусилля на проектуванні для певної цільової групи;

3) аналіз потреб користувачів – уточнює потреби користувачів та дає аналіз необхідних можливостей;

4) аналіз завдань користувача – використовує набір методів для декомпозиції завдань користувачів та розуміння набору процедур, які користувач використовує для досягнення мети. Цей аналіз корисний для встановлення показників ефективності, призначення цільових значень для метрик, визначення потенційних помилок та перевірки відповідності ЛМІ до потреб користувача.

Дане дослідження стало одним із перших прикладів застосування підходу, орієнтованого на користувача, у процесі проєктування систем на основі AR. Його значущість полягає в тому, що при розробленні рішення на основі AR уперше було системно враховано потреби, поведінкові особливості та обмеження кінцевих користувачів, а також умови їх взаємодії з віртуальними об'єктами у навколишньому середовищі. Це дозволило перейти від технологічно орієнтованого підходу до більш комплексної моделі проєктування.

Поряд із цим також існують методи оцінювання та проєктування з використанням комп'ютерної підтримки. Такі методи передбачають застосування спеціалізованих програмних засобів для моделювання ЛМІ, симуляції взаємодії користувача, збору та аналізу даних про поведінку, а також автоматизованого виявлення потенційних проблем якості використання. Використання комп'ютерної підтримки дозволяє значно підвищити точність і об'єктивність оцінювання, скоротити витрати часу на проведення експериментів і забезпечити можливість багаторазового відтворення сценаріїв взаємодії [33]:

– I-DOVE (Interactive tool for Development Of Virtual Environment) – заснований на кількох наборах рекомендацій для розробки віртуальних середовищ;

– MAUVE (Multicriteria Assessment of Usability for Virtual Environments) – багатокритеріальна матриця якості використання для отримання рекомендацій щодо навігації, взаємодії з об'єктами, дизайну тощо;

– гіпертекстовий прототип – інструмент для підтримки при проектуванні ЛМІ віртуальних середовищ. Містить 45 загальних властивостей дизайну, які необхідні для забезпечення належного функціонування ЛМІ.

Окрім комп'ютеризованих засобів, у практиці оцінювання якості ЛМІ широко застосовуються підходи, що базуються на безпосередньому залученні кінцевих користувачів до процесу розроблення [34]:

– польове спостереження – складається зі спостереження за користувачем та збором інформації про його поведінку та результати діяльності при виконанні поставлених завдань. Дослідження проводиться в робочому середовищі користувача. Дослідник має спостерігати за робочим процесом та робити записи, на основі яких ставиться оцінка;

– інтерв'ю – метод виявлення потреб та індивідуальних проблем потенційних користувачів за допомогою інтерв'ю;

– анкетування – застосовується командою дизайнерів для з'ясування, як розроблювана система буде використовуватись певною групою користувачів;

– аналіз контексту використання – описує відповідні характеристики користувача [35]. Включає описи користувача, виконувані завдання, використовуване обладнання та робоче середовище. Ця інформація має важливе значення для розробки інших методів оцінки якості використання;

– збори вимог – виконується після аналізу контексту використання для аналізу результатів;

– експертна оцінка за критеріями – оцінювання експерта на основі заздалегідь встановлених критеріїв;

– оцінка зручності використання – у тестуванні бере участь група користувачів, яка має виконувати невеликі завдання на основі підготовлених коротких сценаріїв. Після виконання завдань проводиться інтерв'ю і заповнюється анкета;

– діаграма спорідненості – простий і економічно ефективний метод сортування великих обсягів даних. Використовується для групування різних вимог користувачів.

Перевагою зазначених підходів є можливість виявлення не лише якості використання, але й прихованих проблем взаємодії, які складно ідентифікувати за допомогою автоматизованих інструментів. Крім того, вони дозволяють оцінити суб'єктивні показники якості використання, такі як задоволеність, рівень довіри до системи та когнітивне навантаження. Це особливо важливо для систем на основі AR, де якість взаємодії значною мірою залежить від контексту використання та індивідуальних особливостей користувача.

Водночас застосування таких методів пов'язане з певними обмеженнями, зокрема витратами часу на організацію досліджень, необхідністю формування репрезентативної вибірки користувачів та врахування присутності суб'єктивної думки в отриманих результатах.

Повноцінне дослідження якості систем AR почалось з 2007 року, коли мобільні пристрої стали досить поширеними. Саме мобільні пристрої стали платформою для розповсюдження систем на основі AR за межами спеціально обладнаних робочих місць. У роботі [36] пропонується методологія оцінювання якості використання для прототипу бінокюляра з вбудованою AR під назвою PRISMA. Аналіз проводився на основі анкети із 30 запитань, заповнених одразу після використання прототипу. Якісна складова дослідження базувалася на зборі даних із використанням методів безпосереднього спостереження, проведення інтерв'ю, а також аналізу письмових матеріалів і відгуків. Основною метою такого аналізу є виявлення потреб, очікувань і пріоритетів користувачів, які взаємодіють із подібними системами, а також визначення контексту їх застосування.

Застосування зазначеного підходу до оцінювання якості використання дозволяє ідентифікувати ключові недоліки ЛМІ та функціональних можливостей системи, а також сформулювати обґрунтовані рекомендації щодо її подальшого вдосконалення. Особливу цінність становить можливість отримання глибинного

розуміння проблем взаємодії, які не завжди можуть бути виявлені за допомогою формалізованих або автоматизованих методів.

Водночас слід враховувати, що до участі в опитуваннях часто залучаються представники зацікавлених професійних груп або галузей, що може впливати на об'єктивність отриманих результатів. Така вибірка може забезпечити високий рівень експертності, а з іншого – може зумовлювати певну упередженість і обмежувати можливість узагальнення результатів для ширшого кола користувачів.

Більш комплексне дослідження вкладено в роботі [37]. Головною метою дослідження являється розробка методу інженерії якості використання орієнтованого на користувачів та включення його у життєвий цикл розробки. Таким чином пропонується поліпшити дизайн ЛМІ додатків на основі AR. Як і в роботі [36], тут використовуються дослідження поведінки користувачів, проте результати додатково підкріплені розрахунками кореляції, впливу стилів тексту та алгоритмів відображення на повторювані помилки. Також до уваги було взято проблеми з освітленням, налаштування та інші фактори, що впливали на користувача. В результаті був використаний той самий метод опитування користувачів, але завдяки додатковим розрахункам результати можна вважати більш валідними. Проблемою дослідження являється те, що воно направлено на дослідження активних стилів малювання для доповненої реальності. Сучасні системи на основі AR не обмежуються текстовими даними, тому потрібні додаткові дослідження і розрахунки, без яких даний метод являється застарілим.

Схожі тези можна побачити в публікації [38] від 2009 року. Розглядаючи методи опитування, перевірки та тестування для оцінки якості використання ЛМІ на основі AR, відзначається необхідність враховувати відмінність AR від інших систем. Характеристика методів перевірки та опитування відповідають тим, що описані в дослідженнях [36] і [37]. Водночас метод тестування позиціонується як ключовий для оцінювання якості використання систем на основі AR, оскільки передбачає безпосередню взаємодію користувача з ЛМІ у контрольованих або наближених до реальних умовах.

Однак детальний аналіз показує, що наведений опис методу тестування значною мірою дублює підходи, характерні для інспекційних методів перевірки, і не містить чітко окреслених процедур або прикладів практичного застосування саме в контексті AR. Це ускладнює його однозначну інтерпретацію та обмежує можливості використання як самостійного інструменту оцінювання.

Водночас оцінювання якості використання не обмежується лише застосуванням стандартизованих анкетних методик. Для організацій, зацікавлених у підвищенні ефективності взаємодії з користувачами, питання безперервного моніторингу та кількісного вимірювання показників якості використання залишається актуальною та складною задачею. Це обумовлює необхідність розроблення уніфікованих підходів до оцінювання, які б забезпечували порівнюваність результатів і можливість їх використання в процесах удосконалення систем.

Проблематика стандартизації оцінювання якості використання розглядається, зокрема, у дослідженнях, виконаних підрозділом компанії Intel [39]. У межах цієї роботи як базовий інструмент було обрано п'ятибальну шкалу Лайкерта, що лежить в основі широко відомої шкали зручності використання системи (англ. System Usability Scale, SUS). Такий підхід дозволяє отримувати кількісні оцінки, зручні для подальшого аналізу та порівняння.

Проте безпосередня адаптація шкали SUS до специфіки систем на основі AR виявилася недостатньо ефективною через особливості взаємодії, зокрема її просторовий характер, контекстну залежність і тісну інтеграцію з фізичним середовищем. У зв'язку з цим було запропоновано підхід, що передбачає узгодження переліку оціночних показників із положеннями стандарту ISO 9241-11 [35], який визначає основні складові якості використання.

У результаті було сформовано набір із 12 потенційних показників, за якими пропонується здійснювати оцінювання. Усі показники структуровано за трьома ключовими категоріями: ефективність (здатність користувача досягати поставлених цілей), дієвість (точність і повнота виконання завдань) та задоволеність (суб'єктивне сприйняття взаємодії користувачем) (таблиця 1.1).

Такий підхід дозволяє комплексно охопити різні аспекти якості використання та адаптувати класичні методи оцінювання до умов функціонування систем доповненої реальності.

Таблиця 1.1 – Узгоджені показники якості використання [35]

Компонент якості використання	Потенційні елементи
Ефективність	[Цей елемент] зберігає мені час
	Я схильний робити помилки [в цій системі]
	Я не роблю помилок [з цією системою]
	Я маю витратити багато часу на виправлення [з цією системою]
Дієвість	[Ця система] дозволяє мені виконувати мої завдання
	Для моїх завдань мені потрібна система з більшою кількістю функцій
	Мені не потрібні доповнення [для цієї системи]
	Можливості [цієї системи] не відповідають моїм вимогам
Задоволеність	Я задоволений [цією системою]
	Я краще користувався б чимось іншим замість [цієї системи]
	Маючи вибір, я обрав би [цю систему] замість інших
	Використання [цієї системи] було розчаруванням

Після проведення кількох етапів тестування було здійснено кореляційний аналіз отриманих показників з метою оцінювання їхньої узгодженості та взаємозв'язків. На основі результатів аналізу було внесено низку суттєвих коректив, спрямованих на покращення збалансованості набору показників та усунення дублювань між окремими елементами оцінювання (таблиця 1.2).

Отримані в межах дослідження метрики якості використання, орієнтовані на оцінювання досвіду користувача, були визнані надійною альтернативою традиційній шкалі SUS. Автори підкреслюють, що запропонований набір показників має компакту структуру, що спрощує процес оцінювання та знижує

навантаження на респондентів. Крім того, зазначається потенційна можливість застосування розроблених метрик не лише на етапі тестування, а й на інших стадіях життєвого циклу системи – зокрема, під час проєктування, впровадження та подальшого вдосконалення ЛМІ.

Таблиця 1.2 – Компоненти якості використання [35]

Компонент якості використання	Потенційні елементи
Дієвість	Можливості [цієї системи] відповідає моїм вимогам
Задоволеність	Використання [цієї системи] виклика розчарування
Загальність	[Ця система] легка у використанні
Ефективність	Я витрачаю багато часу на виправлення помилок [в цій системі]

Водночас у дослідженні виявлено високий рівень кореляції між окремими показниками, що може свідчити про часткове дублювання оцінюваних характеристик. Попри переваги компактності, описані в роботі [39] метрики не забезпечують всебічного оцінювання досліджуваної системи, оскільки значною мірою ґрунтуються на суб'єктивних оцінках користувачів і відображають індивідуальний досвід взаємодії. У зв'язку з цим їх доцільно розглядати як складову ширшої системи оцінювання, яка може бути доповнена об'єктивними показниками ефективності, продуктивності та надійності.

Для оцінки систем доповненої реальності можна застосовувати SUS без додаткових модифікацій. У дослідженні [40] оцінюється розроблена інтерактивна система на основі AR для навчання стосовно збереження риб на Тайвані. У частині оцінювання якості AR розглядалось оцінювання якості використання з точки зору кінцевого користувача. Саме опитування складається з 10 питань, які оцінюються за 5-бальною шкалою:

- я вважаю, що хочу використовувати цю систему частіше;
- я вважаю, що система надто складна;

- я вважаю, що система проста у використанні;
- я вважаю, що мені знадобиться технічна підтримка для використання цієї системи;
- я вважаю, що окремі функції цієї системи добре інтегровані;
- я вважаю, що в цій системі багато суперечностей;
- я вважаю, що більшість людей швидко навчаться користуватись цією системою;
- я вважаю, що система дуже громізка для використання;
- я вважаю, що відчуваю себе дуже впевнено при користуванні системою;
- я вважаю, що мені потрібно багато чому навчитися для роботи з цією системою.

Анкетування здійснюється після завершення взаємодії учасників із досліджуваною системою, що дозволяє отримати оцінку безпосереднього досвіду користувачів. На основі отриманих відповідей обчислюються узагальнені статистичні показники, зокрема середнє значення та медіана. У межах розглянутого дослідження ці показники становили відповідно 78 та 66 балів, що свідчить про достатній рівень придатності системи до використання. Крім того, респонденти відзначили зручність та прийнятний рівень комфортності взаємодії з системою.

Загалом шкала SUS може бути віднесена до методів опитування, що базуються на анкетуванні користувачів. Її ключовою відмінністю є використання фіксованого, стандартизованого набору запитань, що забезпечує можливість порівняння результатів між різними системами та дослідженнями. З точки зору практичного застосування SUS характеризується простотою реалізації, мінімальними часовими витратами та зручністю обробки результатів, що робить її ефективним інструментом швидкої оцінки зручності використання.

Водночас основним обмеженням даного підходу є суб'єктивний характер отриманих оцінок, оскільки результати значною мірою залежать від індивідуального досвіду, очікувань та особистих уподобань респондентів. Це

обумовлює доцільність поєднання SUS з іншими, більш об'єктивними методами оцінювання для отримання комплексної характеристики якості використання системи.

Окрім опитувань та перевірки за допомогою метрик, популярною методикою оцінки якості використання являється евристичний метод. Його суть полягає в тому, що група експертів перевіряє дизайн інтерфейсу за допомогою набору характеристик. Евристичне оцінювання просте у виконанні, дешеве та ефективне. За його допомогою не можна виявити всі проблеми, але переважна більшість основних і більшість другорядних недоліків стануть явними. Процеси перевірки якості використання за допомогою евристичної оцінки добре задокументовані і мають багато публікацій, що описують використання цих методів. Разом із ростом популярності систем доповненої реальності постало питання оцінки якості використання за допомогою евристичного методу. Оскільки традиційні евристики не підходять для оцінювання AR, в роботі [41] пропонується методологія формування нових евристик якості використання для кожного конкретного випадку:

- 1) дослідницький етап – збір бібліографічного матеріалу, конкретні програми та їх характеристики, загальні та/або пов'язані евристики;

- 2) описовий етап – визначення найважливіших характеристик раніше зібраних даних та формалізація основних понять;

- 3) кореляційний етап – визначення характеристик, які повинні мати евристики якості використання на основі традиційних евристик та аналізу існуючих прикладів;

- 4) пояснювальний етап – формальне визначення набору запропонованих евристик за допомогою стандартного шаблону;

- 5) етап валідації – перевірка нових евристик за допомогою експериментів, виконаних на обраних тематичних дослідженнях, доповнених користувачькими тестами;

- 6) етап уточнення – уточнення результатів на основі відгуків, отриманих на етапі перевірки.

Загалом, отримані евристики мають певні обмеження, притаманні цьому класу методів оцінювання якості використання, зокрема ризик пропуску окремих малопомітних або залежних від умов використання проблем. Водночас ці недоліки компенсуються низькою вартістю застосування, оперативністю проведення оцінювання та відносною простотою реалізації методу, що робить його доцільним для практичного використання на ранніх етапах проектування та тестування систем.

Окрім зазначених вище аспектів, існує ще одна вагома причина поширеного використання евристичних досліджень. Основною платформою для функціонування додатків на основі AR є мобільні пристрої (смартфони, планшети тощо). Значна різноманітність способів застосування технології AR у додатках різного призначення ускладнює процес стандартизації підходів до їх проектування та оцінювання, що зумовлює доцільність використання евристичних методів аналізу.

У дослідженні [42] розглянуто принципи зручності використання для мобільних додатків на основі AR. Метою дослідження була розробка системи принципів зручності, призначених для підтримки процесів розроблення та оцінювання мобільних додатків. Запропонований підхід ґрунтується на аналізі наякості використання досліджень у сфері евристичної оцінки, принципів проектування систем доповненої реальності, рекомендацій щодо інтерфейсів портативних мобільних пристроїв, а також принципів забезпечення зручності використання матеріальних ЛМІ. У результаті було сформульовано 22 принципи, об'єднані у п'ять тематичних груп (рисунок 1.3).

Детально розроблені принципи зручності використання, що відображають ключові аспекти взаємодії користувача з інтерфейсом та функціональні характеристики мобільних додатків AR, наведені в таблиці 1.3. У таблиці систематизовано кожен принцип із його змістовним наповненням та практичними рекомендаціями щодо застосування в процесі проектування й оцінювання додатків.

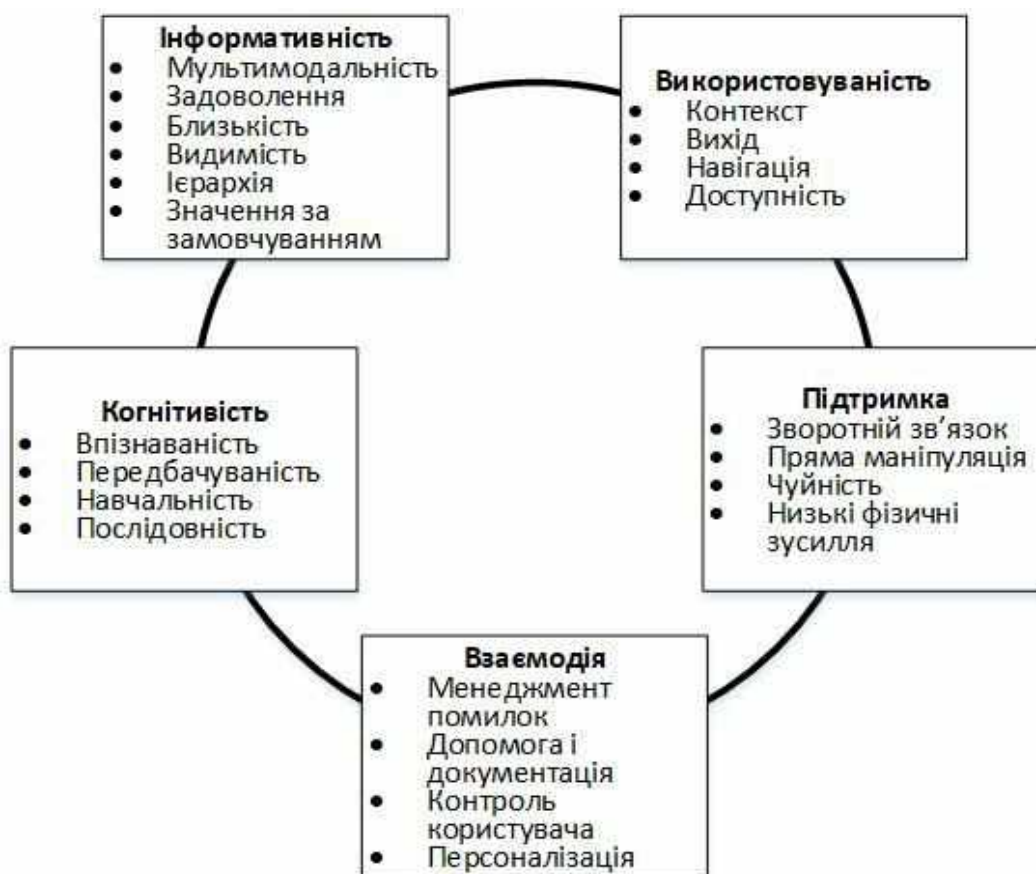


Рисунок 1.3 – Структуровані принципи зручності використання [42]

. Зазначені принципи охоплюють як загальні вимоги до зручності використання, так і специфічні аспекти взаємодії з елементами AR, зокрема навігацію, інтерактивність, когнітивне навантаження та адаптивність ЛМІ до умов використання мобільних пристроїв. Вони слугують основою для систематизованого підходу до аналізу та підвищення якості користувацького досвіду в мобільних системах на основі AR.

Таблиця 1.3 – Принципи зручності використання для оцінювання та розроблення додатків на основі доповненої реальності [42]

Принципи		Визначення
Інформативність	Значення за замовчуванням	Початок роботи повинен бути легким для користувача. Також повинна надаватись рамка, що позначає простір введення і пов'язані з ним екземпляри

Продовження таблиці 1.3

Інформативність	Задоволення	Естетичний дизайн, в тому числі палітра кольорів, повинен справляти захоплююче враження на користувача
	Близькість	Слід використовувати не лише знайомі метафори та значки, а й орієнтовану на користувача мову.
	Ієрархія	Якщо обсяг інформації великий, вона має подаватись поетапно
	Мультимодальність	Інформація має надаватись зі зручність використанням та візуальним відображенням
	Видимість	Графічні фактори мають мати належний дизайн.
Когнітивність	Послідовність	Загальноживані терміни та інтерфейси повинні йти послідовно, щоб уникнути плутанини.
	Навчальність	Функції та особливості програми мають бути легкими для вивчення
	Передбачуваність	Функції та особливості програми мають бути легкими для вивчення.
	Впізнаваність	Необхідну інформацію слід надавати належним чином, щоб користувачам не довелося використовувати короточасну пам'ять
Підтримка	Менеджмент помилок	Помилки, що виникають під час використання програм, повинні бути підкріплені методом запобігання та вирішення
	Допомога і документація	Необхідно надати відповідну довідку для підтримки програм користувача
	Персоналізація	Інтерфейс має бути досить простим, щоб його можна було змінювати відповідно до смаків і особливостей користувачів.
	Контроль користувача	У користувачів має бути відчуття, що вони контролюють систему, а система реагує на їхні дії
Взаємодія	Пряма маніпуляція	Коли користувачі керують пристроєм, інформація, що з'являється на екрані, і дії користувачів повинні інтуїтивно співставлятися
	Зворотній зв'язок	Користувачам повинна надаватись інформація про послідовність процесу та стан системи
	Низькі фізичні зусилля	Зусилля, пов'язані з роботою програми, мають бути мінімізовані
	Чуйність	Реакція на дії користувачів має бути швидкою
Використовуваність	Доступність	Програма повинна швидко починати роботу, а попередній робочий стан і параметри повинні залишатися незмінними після повторного запуску.

Кінець таблиці 1.3

Використовуваність	Контекст використання	Інтерфейс користувача має бути розроблений з урахуванням різних типів середовищ і розроблений відповідно до середовища використання
	Вихід	Припинити роботу або повернутися до попередньої частини роботи має бути легко
	Навігація	Користувачам слід дозволити вільну навігацію в додатку, коли вони виконують свою роботу

Водночас слід зазначити, що дослідження мало низку обмежень. Зокрема, аналіз було проведено на основі трьох мобільних застосунків, поширених виключно на території республіки Корея. Тестування здійснювалося в лабораторних умовах із використанням смартфонів на базі операційної системи Android, тому результати не були верифіковані для пристроїв на інших платформах. Крім того, під час дослідження застосовувалися дисплеї стаціонарних смартфонів, у зв'язку з чим питання масштабування інтерфейсу не було враховано.

Розробленню евристик для систем на основі AR також присвячено роботу [43]. У дослідженні здійснено формування набору універсальних евристик для оцінювання якості використання систем доповненої реальності не лише на мобільних пристроях, а й на спеціалізованих пристроях і платформах. В дослідженні аналізуються існуючі методи евристичної оцінки та їх застосування під час тестування додатків на основі AR, а також модифікуються окремі відомі підходи. В результаті було запропоновано список з шести евристик для оцінки додатків на основі AR, а саме:

- методи взаємодії та контроль;
- презентація віртуальних об'єктів;
- зв'язок між віртуальними об'єктами і реальним світом;
- інформація, пов'язана з віртуальними об'єктами;
- придатність в контексті використання;
- фізичний контроль використання.

Зазначений набір евристик сформовано на основі узагальнення повторюваних і типових проблем, що виникають під час взаємодії з системами

доповненої реальності, що дозволяє розглядати його як універсальний. Водночас така універсальність не гарантує високої точності результатів оцінювання. У практиці розроблення евристик для конкретних випадків їх кількість може сягати кількох десятків, що підтверджується аналізом попередніх досліджень. У зв'язку з цим рекомендується під час проведення евристичного аналізу використовувати додаткові набори евристик. Крім того, не наводиться результатів практичної перевірки запропонованих евристик, що свідчить про можливу необхідність їх коригування залежно від конкретних умов застосування.

В останніх дослідженнях чітко простежується тенденція переходу від загальних підходів до оцінювання якості використання застосунків на основі AR до врахування специфіки їх предметної області та цільової аудиторії. Зокрема, роботи [44] та [45] присвячені дослідженню принципів якості використання для систем на основі AR, орієнтованих на дітей дошкільного віку та підтримку освітнього процесу відповідно. Обидва дослідження виконані різними науковими групами з різних університетів із різницею у два роки, однак їхня загальна структура є практично ідентичною.

У результаті за допомогою описаного в роботі [44] підходу було отримано 23 принципи якості використання для проектування додатків на основі AR для дітей дошкільного віку, а в роботі [45] – 23 принципи для застосунків, орієнтованих на навчання студентів. На основі сформованих принципів автори обох досліджень планують подальше проектування відповідних програмних рішень, а також їх використання як бази для проведення евристичного аналізу.

Окрім якості використання, існують також інші підходи до оцінювання якості систем на основі AR. Оскільки подібні сервіси передбачають новий тип взаємодії користувача із цифровим контентом, для забезпечення їх успішного впровадження необхідним є врахування очікувань і потреб потенційних користувачів. Аналіз зазначених факторів та їх впливу на якість здійснюється в межах досліджень користувацького досвіду (англ. User Experience, UX).

Подібно до ранніх досліджень якості використання, на початкових етапах формування підходів оцінювання UX широко застосовувався метод інтерв'ю для

виявлення уявлень і вимог користувачів щодо систем на основі AR. У роботі [46] представлено результати опитування та подальшу систематизацію отриманих даних для різних сфер застосування. Респондентами виступали відвідувачі торговельних центрів, що обумовлено високою концентрацією потенційних користувачів, наявністю різноманітних магазинів та проведенням розважальних заходів.

На відміну від більшості аналогічних досліджень, у зазначеній роботі системи на основі AR не розглядаються в межах конкретної предметної галузі. Натомість акцент зроблено на вивченні ставлення користувачів до AR, їх уявлень про принципи роботи таких систем, а також загального ставлення до використання інноваційних технологій та обміну інформацією. Такий підхід обґрунтовується тим, що дослідження UX у сфері AR на момент виконання роботи перебувало на початковому етапі розвитку, а також необхідністю виявлення специфічних характеристик UX, притаманних саме системам на основі AR.

Більш розгорнуто результати дослідження та концепції UX в цілому представлено в дисертації [47]. Окрім методу інтерв'ю, використаного в роботі [46], в дисертації для збору інформації про потреби і очікування потенційних користувачів використовуються результати онлайн-опитувань. Завдяки отриманим відповідям вдалося отримати уявлення про те, який досвід користувачі очікують отримати від користування додатками на основі AR, та систематизувати очікуваний UX за наступними категоріями:

- інструментальний – базується на цінності технології для користувача в якості інструменту для полегшення діяльності;
- когнітивний – пов'язаний з думками та можливістю сервісу на основі AR задовольняти потреби користувачів у нових знаннях;
- емоціональний – пов'язаний з можливістю сервісу на основі AR викликати в користувача таку емоційну реакцію (задоволення, радість, захоплення, емоційне збудження, ностальгія);
- сенсорний – впливає на сприйняття користувачем оточуючого середовища

Модель UXIVE описує складові компоненти, що формують UX, а також взаємозв'язки між ними. Результати емпіричного дослідження підтверджуються опитуванням понад 150 користувачів систем на основі AR. Водночас отримані результати не можна вважати абсолютно точними, оскільки дослідження проводилося на обмеженій вибірці користувачів однієї системи, причому приблизно половина респондентів належала до однієї вікової групи.

Таким чином, проведений аналіз наукових досліджень свідчить про відсутність на сьогодні загальноприйнятих моделей для комплексного оцінювання якості AR. Це значною мірою зумовлено відносною новизною технології та різноманіттям сценаріїв її застосування.

Наявні підходи до оцінювання якості систем на основі AR здебільшого ґрунтуються на адаптації існуючих стандартів якості програмного забезпечення, зокрема основі стандарту [49], метрики якого адаптуються під функції AR [50]. Водночас подібні підходи є фрагментарними, оскільки не враховують повного спектра характеристик, що впливають на якість систем AR.

Інші дослідження оцінюють якість AR на основі їх візуальної складової – якості зображення та естетичній привабливості. Моделі оцінки впливу візуальної якості [51] та оцінки якості накладених зображень [52] демонструють значення візуальної складової на задоволеність користувачів від використання AR. Однак вони обмежені візуальною складовою, тоді як на якість систем на основі AR впливають декілька різних показників.

Аналіз додаткових досліджень засвідчує значну різноманітність наукових підходів, які охоплюють питання прийняття технологій AR, намірів користувачів, розроблення рекомендацій для освітніх застосунків, оцінювання систем із позиції користувача, формування принципів та метрик дизайну, а також експериментальні дослідження. В них розглядаються такі питання, як моделі прийняття AR [53], оцінка намірів користувачів при використанні мобільних додатків [54], розробка рекомендацій для навчальних систем на основі AR [55], оцінювання систем з точки зору користувачів [56,57], принципи та метрики для розробки дизайну додатків на

основі AR [58,59], експериментальні дослідження застосування AR в окремих галузях. Також сюди можна віднести дослідження якості використання інтерактивних програмних засобів [60] і ЛМІ [61].

1.3 Використання інтерфейсів людино-машинної взаємодії на основі доповненої реальності в системах моніторингу потенційно небезпечних територій

Як було зазначено у підрозділі 1.1, AR використовується у різноманітних сферах діяльності та широко інтегрується разом з іншими новітніми технологіями, такими як Інтернет речей, цифрові двійники, штучний інтелект тощо. Одним з таких напрямків, де намагаються впровадити використання ЛМІ на основі AR, являється керування безпілотними системами.

Так, у [62] розглядається використання віртуальних середовищ доповненої та віртуальної реальності у процесах керування БПЛА. Автори зосереджують свою увагу на створенні інтуїтивної системи ЛМВ для керування та обслуговування БПЛА, що поєднує відеопотік з безпілотного апарата та накладені елементи навігації. Розроблена система використовується як інструмент виякості використання та аналізу помилок оператора БПЛА під час виконання тестових польотів.

Дослідження [63] вивчає вплив AR на ситуативну обізнаність оператора під час керування польотом БПЛА. Автори пропонують використовувати віртуальні об'єкти для позначення маршрутів переміщення БПЛА. За результатами проведеного експерименту стверджується, що даний підхід дозволяє збільшити рівень ситуативної обізнаності та ефективності роботи оператора. Проте в даному варіанті ЛМІ керування відсутні елементи, що відповідають за відображення інформації про поточний стан БПЛА. Це може негативно вплинути на виконання місії у разі переходу БПЛА в стан часткової або повної втрати працездатності.

Схожий варіант застосування AR для керування наземним роботизованим комплексом (НРК) розглядається у [64]. Автори роботи допускають підвищення рівня ситуативної обізнаності операторами наземних апаратів у разі використання

віддаленими операторами ЛМІ на основі AR, в тому числі для орієнтування та побудови маршрутів у незнайомому середовищі.

У [65] представлено ЛМІ на основі AR для мобільних пристроїв, який забезпечує можливість керування флотом БПЛА за допомогою віртуальних маніпуляторів, реалізованих на сенсорному екрані. Водночас суттєвим недоліком такого підходу є необхідність постійного підтримання оператором візуального контакту з ARоном для контролю напрямку польоту та забезпечення стабільного зв'язку з мобільним пристроєм. Це обмеження обумовлене тим, що вікно з відеопотоком, отриманим із БПЛА, займає менше 10 % площі екрана та частково перекривається віртуальними елементами керування. З урахуванням обмежених розмірів і роздільної здатності дисплеїв мобільних пристроїв, така мала площа відображення ускладнює або практично унеможливує ефективне сприйняття відеоінформації з борта БПЛА.

В [66] запропоновано застосування AR для керування БПЛА від першої особи з використанням окулярів доповненої реальності. Керування польотом у цьому випадку здійснюється за допомогою традиційного пульта, тоді як відеоінформація з камер БПЛА відображається у вигляді віртуальних вікон. Такий підхід є більш зручним з точки зору управління окремим апаратом, однак не передбачає можливості керування флотом БПЛА.

У [67] запропоновано ЛМІ керування БПЛА, що позиціонується як система з елементами AR. На відміну від попереднього підходу, у ньому реалізовано основні інформаційні показники, необхідні для управління безпілотним апаратом. Проте ЛМІ зберігає низку обмежень, зокрема малий розмір елементів, призначених для відображення відеопотоку з БПЛА та карти польоту, а також відсутність можливості застосування для керування групою безпілотних апаратів. Окрім цього, залишається дискусійним питання віднесення запропонованої системи ЛМВ до класу ЛМІ на основі AR, оскільки всі віртуальні елементи керування реалізовані у двовимірному просторі, тоді як класичне визначення AR [68] передбачає їх просторове (трьохвимірне) розміщення.

Потенційно, керовані за допомогою ЛМІ на основі AR БПЛА можуть ефективно застосовуватися для виконання широкого спектру задач, де важливими є оперативність аналізу даних, просторове орієнтування та підвищена ситуаційна обізнаність оператора. Зокрема, такі системи доцільно використовувати для проведення пошуково-рятувальних операцій, спостереження за екологічним станом територій, контролю промислових об'єктів та аграрних угідь, а також у системах моніторингу критичної інфраструктури або потенційно небезпечних територій.

Потенційно небезпечними територія слід вважати зони, що можуть становити серйозну загрозу для життя людей, інфраструктури або довкілля. Джерелами загрози можуть бути об'єкти критичної інфраструктури, промислові об'єкти підвищеної безпеки, вибухонебезпечні предмети (ВНП).

Останнє особливо актуальна для України, оскільки лише за офіційними даними приблизно 138 500 км² територій потенційно можуть бути забрудненими ВНП, які становитимуть серйозну небезпеку навіть через десятиліття. Враховуючи той факт, що багато сучасних ВНП виготовляють з мінімальним використанням металів, а також розвиток методів маскування, процес їх виявлення традиційними методами може бути вкрай неефективним, в тому числі з економічної точки зору.

ВНП також мають тісний взаємозв'язок із виникненням пожеж у лісових екосистемах, оскільки процеси детонації та займання є взаємопов'язаними. У разі виникнення пожежі в лісистих районах підвищується ризик детонації нерозірваних боєприпасів, тоді як вибухи, у свою чергу, можуть виступати джерелом ініціювання нових осередків загоряння. Такий взаємозв'язок є особливо помітним на територіях, що зазнали впливу військових дій, колишніх військових полігонів, а також районів із наявністю нерозірваних боєприпасів.

Коли відбувається детонація ВНП, вони генерують велику кількість теплової енергії. У суху погоду це може спричинити займання сухої трави, листя, хвої або верхнього шару ґрунту, що містить торф. Крім того, вибухова хвиля та розкидання гарячих осколків можуть спричинити займання навколишньої рослинності. Деякі типи боєприпасів є особливо чутливими до високих температур і можуть спричинити поширення пожежі на більші території.

На рисунках 1.5–1.6 наведено карти території України, на яких відображено просторовий розподіл та інтенсивність лісових пожеж, а також рівень забруднення територій нерозірваними ВВП. Порівняльний аналіз представлених даних свідчить про наявність кореляції між зазначеними явищами: зони виникнення лісових пожеж значною мірою збігаються з територіями, забрудненими ВВП.

Зазначена залежність може пояснюватися як безпосереднім впливом детонації вибухонебезпечних предметів на виникнення загорянь, так і зворотним ефектом, коли пожежі спричиняють активацію боєприпасів, що, у свою чергу, ускладнює локалізацію та ліквідацію осередків займання.

Крім того, такі території можуть мати обмеженим доступом для проведення превентивних заходів і гасіння пожеж через підвищений рівень небезпеки для персоналу. У сукупності це може призвести до збільшення масштабів і тривалості пожеж, а також підвищує ризики для довкілля та інфраструктури.

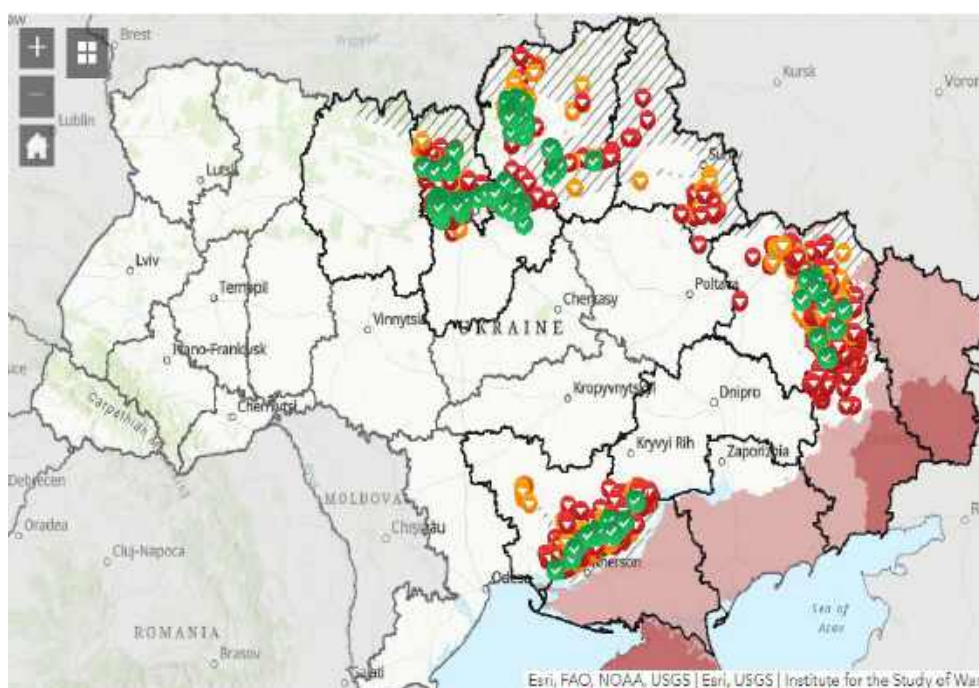


Рисунок 1.5 – Мапа вибухонебезпечних об’єктів на території України [69]

У таких умовах ЛМІ безпілотної системи моніторингу відіграє ключову роль, оскільки функціонує в умовах високої невизначеності, обмеженого часу на прийняття рішень та підвищеного психологічного навантаження на оператора. На

відміну від стандартних інформаційних систем, помилки оператора в таких системах можуть призводити до значних матеріальних втрат або загрози життю людей.

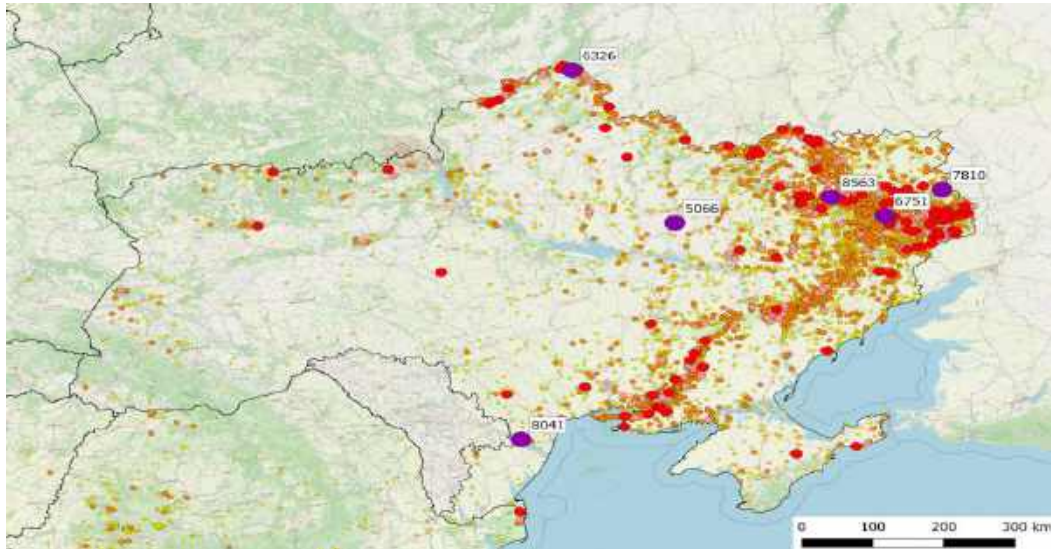


Рисунок 1.6 – Мапа лісових пожеж в Україні [70]

1.4 Постановка задачі і обґрунтування методики досліджень

1.4.1 Постановка загального та часткових завдань дослідження

Загальне завдання дисертаційного дослідження полягає у розробленні моделей, методів і програмно-інструментальних засобів інформаційної технології оцінювання якості людино-машинних інтерфейсів на основі доповненої реальності для безпілотних систем моніторингу потенційно небезпечних територій.

Для розв'язання поставленої загальної задачі у дисертаційній роботі необхідно вирішити такі часткові задачі:

1) аналіз безпілотних систем моніторингу та методів оцінювання якості ЛМІ на основі доповненої реальності. Обґрунтування задач і методики досліджень;

2) розроблення архітектури системи з вбудованими засобами відображення доповненої реальності для моніторингу ПНТ на основі безпілотних літальних апаратів;

3) розроблення методу оцінювання якості ЛМІ на основі доповненої реальності для систем моніторингу на основі безпілотних літальних апаратів;

4) дослідження впливу характеристик операторів на готовність безпілотних систем моніторингу з ЛМІ на основі доповненої реальності;

5) розроблення засобів інформаційної технології для оцінювання якості людино-машинних інтерфейсів на основі доповненої реальності для безпілотних систем моніторингу;

б) практична реалізація і впровадження отриманих результатів.

1.4.2 Обґрунтування методики та математичного апарату дослідження

Під час дослідження буде проведено комплекс робіт для формування заявлених наукових результатів. На підставі вхідних даних буде проаналізовано, розроблено та досліджено компоненти моделі, методи і засоби, представлені схемою на рисунку 1.7.

На початковому, аналітичному етапі здійснюватиметься дослідження предметної області. Зокрема, виконується аналіз особливостей побудови безпілотних систем моніторингу, що дозволяє визначити їх ключові компоненти, режими функціонування, обмеження та вимоги до оброблення й візуалізації даних. Паралельно буде проводитись аналіз стандартів і нормативних вимог до якості ЛМІ на основі доповненої реальності. Це дасть змогу сформулювати систему критеріїв та показників оцінювання, а також виявити існуючі підходи й обмеження у сфері забезпечення якості інтерфейсів.

Отримані результати аналітичного етапу слугуватимуть підґрунтям для переходу до етапу проектування. На цьому етапі виконуватиметься розроблення архітектури системи з вбудованими засобами відображення доповненої реальності. Архітектура визначає структуру системи, склад її функціональних модулів, канали взаємодії між ними та принципи інтеграції апаратних і програмних компонентів. Одночасно здійснюється розроблення методу оцінювання якості ЛМІ, який базується на визначених раніше критеріях і враховує специфіку використання доповненої реальності в умовах функціонування БСМ ПНТ.



Рисунок 1.7 – Загальна схема, етапи та взаємозв’язок результатів дослідження

Наступним кроком буде інтеграція архітектурних рішень і розробленого методу оцінювання, що дозволяє сформувавши підхід до комплексного оцінювання якості ЛМІ на основі доповненої реальності. У межах цього етапу буде уточнено взаємозв’язки між характеристиками системи, параметрами інтерфейсу та показниками якості, що забезпечить узгодженість між структурою системи та процедурами оцінювання.

Важливою складовою дослідження є врахування людського фактора, що реалізується через окремий етап — дослідження впливу характеристик операторів на готовність БСМ. Тут аналізуються індивідуальні особливості користувачів (досвід, когнітивні можливості, швидкість реакції тощо) та їх вплив на ефективність взаємодії з інтерфейсом. Результати цього дослідження будуть інтегровані в метод оцінювання.

На завершальному етапі відбудеться практична реалізація отриманих наукових результатів. Цей крок включатиме створення програмного засобу, який реалізує розроблений метод оцінювання, а також формування інформаційної технології оцінювання якості ЛМІ. Ця технологія об’єднує методичне

забезпечення, алгоритмічні рішення та програмні інструменти, необхідні для проведення оцінювання в реальних умовах.

Фінальним результатом є впровадження розроблених методів і засобів у практику – для оцінювання та підвищення якості ЛМІ на основі доповненої реальності в безпілотних системах моніторингу потенційно небезпечних територій. Таким чином, схема відображає замкнений цикл дослідження: від аналізу та формалізації вимог до створення прикладного інструментарію і його практичного застосування.

1.5 Висновок до першого розділу

У першому розділі дисертаційної роботи за результатами проведеного аналізу встановлено, що технологія доповненої реальності демонструє стійку тенденцію до активного впровадження у різні галузі, зокрема у системи моніторингу на основі безпілотних систем.

Аналіз існуючих методів оцінювання якості ЛМІ на основі AR показав, що сучасні підходи характеризуються фрагментарністю та орієнтацією на окремі аспекти якості, такі як зручність використання, користувацький досвід або візуальна складова. При цьому відсутні методи, які б забезпечували комплексне оцінювання з урахуванням специфіки ЛМІ на основі AR.

Застосування людино-машинних інтерфейсів на основі доповненої реальності у системах моніторингу потенційно небезпечних територій має значний потенціал для підвищення ефективності діяльності оператора в умовах невизначеності, обмеженого часу та підвищеного ризику.

Науково-прикладне завдання дисертаційного дослідження полягає у розробленні моделей, методів і програмно-інструментальних засобів інформаційної технології оцінювання якості людино-машинних інтерфейсів на основі доповненої реальності для безпілотних систем моніторингу потенційно небезпечних територій.

Структура роботи відображені та взаємозв'язок очікуваних результатів на рисунку 1.7 та рисунку 1.8.

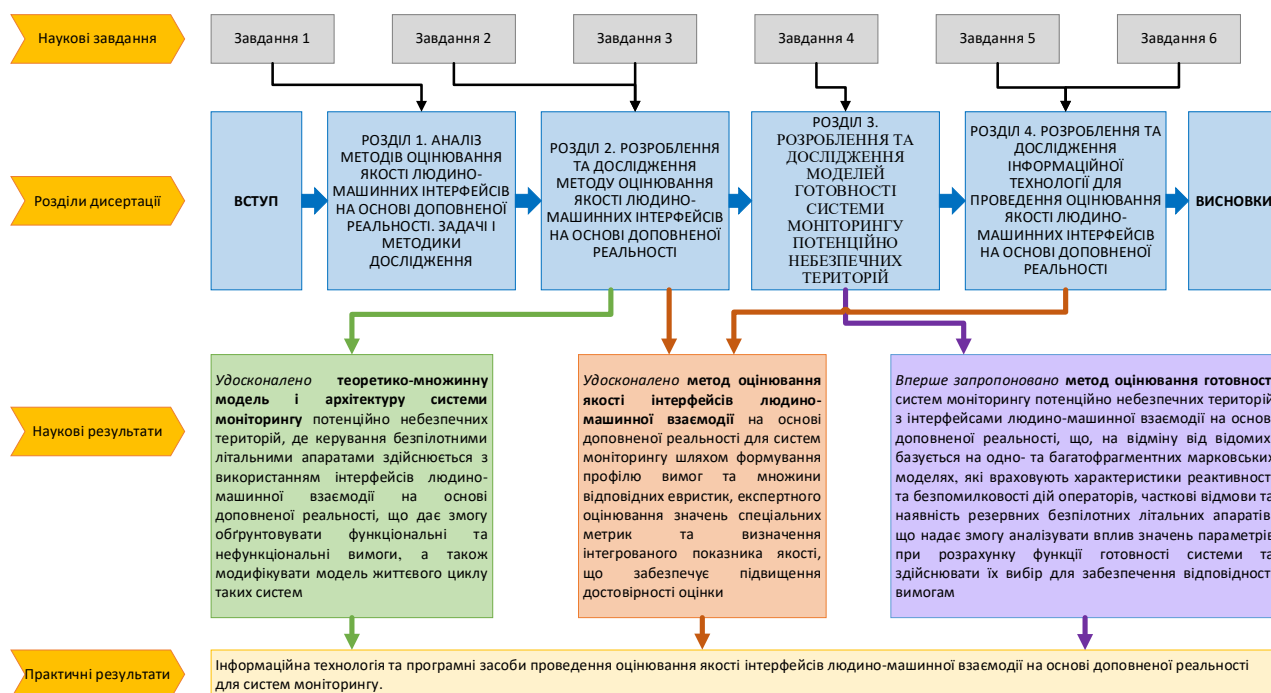


Рисунок 1.8 – Структура дисертаційної роботи

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБЛЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДУ ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ЛЮДИНО-МАШИННИХ ІНТЕРФЕЙСІВ НА ОСНОВІ ДОПОВНЕНОЇ РЕАЛЬНОСТІ

2.1 Розроблення архітектури системи моніторингу потенційно небезпечних територій

2.1.1 Розроблення теоретико-множинної моделі системи моніторингу потенційно небезпечних територій

Розробці архітектури передуює формулюванню теоретико-множинної моделі системи. Використання даного математичного апарату дає змогу представити систему у вигляді сукупності взаємопов'язаних множин, що описують її компоненти, стани, вхідні та вихідні дані, а також відношення між ними.

Використання такого підходу зумовлена необхідністю чіткого визначення складу системи, її меж, властивостей та взаємозв'язків, що створює основу для подальшого моделювання. Теоретико-множинне представлення дозволяє уніфікувати опис різнорідних елементів системи, в тому числі безпілотних платформ, сенсорів, каналів зв'язку, обчислювальних модулів і користувацьких інтерфейсів. Отримана модель слугує теоретичною основою для подальшого проектування архітектури системи, розроблення алгоритмів її функціонування та засобів забезпечення людино-машинної взаємодії.

Розроблювана в рамках даного дисертаційного дослідження система включає центральний сервер та бази даних, відповідальні за обробку та зберігання критично важливої інформації про географічні координати потенційно небезпечних зон, історичні дані про наявність вибухонебезпечних предметів, карти розміновуваних територій та телеметричні дані, отримані від безпілотних літальних апаратів та наземних роботизованих комплексів (НРК). Ці дані обробляються центральним сервером, який забезпечує їх передачу до центру управління та контрольно-диспетчерського пункту в режимі реального часу.

Контрольна станція розташована у безпосередній близькості до зони проведення операцій та функціонує як локальний пункт управління та обслуговування БПЛА/НРК. Він отримує дані з сервера, забезпечує зв'язок з операторами та контролює взаємодію флотів БПЛА/НРК. Оператори контрольної станції працюють з пультами дистанційного керування, що дозволяє їм керувати окремими безпілотними апаратами у критичних ситуаціях, отримувати та аналізувати відеопотоки в реальному часі та коригувати траєкторії польоту на основі нових даних. Крім того, оператори використовують окуляри розширеної реальності, що дозволяє їм переглядати карти мінної загрози, керувати БПЛА/НРК та отримувати доступ до життєво важливої інформації.

Для забезпечення надійного та стабільного зв'язку з БПЛА/НРК використовується мережа ретрансляційних станцій, які здійснюють обмін між контрольною станцією та БПЛА/НРК, забезпечуючи безперервний зв'язок із групою розмінування під час польових операцій.

Група розмінування працює безпосередньо в зоні операції, але завдяки окулярам розширеної реальності отримує критично важливу інформацію, що підвищує їхню безпеку. Функціонал окулярів розширеної реальності включає наступні можливості:

- візуалізація місць розташування ВВП у режимі реального часу;
- відображення безпечних маршрутів пересування;
- інтеграція з БПЛА/НРК для точного виявлення ВВП.

Контрольний центр є головним аналітичним центром системи, відповідальним за управління всією операцією, моніторинг стану флотів БПЛА/НРК та групи розмінування, а також аналіз вхідних даних для швидкого прийняття рішень. Тут ведеться облік, формуються звітності, списки доступу (за необхідності) та контролюються конфіденційні матеріали, що надходять на об'єкти або відправляються з них. Оператори контрольних пунктів зобов'язані вести системи обліку матеріалів, що підлягають звітності [71].

Множину елементів системи можна визначити як сукупність множин користувачів, процесів, станів та зв'язків між ними, що подаються у вигляді кортежу. Множина процесів відображає функціональні етапи обробки інформації, множина станів – динаміку функціонування системи, а множина зв'язків – інформаційні та керуючі взаємодії між процесами та користувачем. Така модель дозволяє формалізувати як структурні, так і поведінкові аспекти системи. У теоретико-множинному представленні її можна описати як кортеж:

$$UMS = \langle E, U, P, S, R \rangle, \quad (2.1)$$

де E – множина елементів;

U – множина користувачів;

P – множина процесів;

S – множина станів;

R – множина зв'язків.

Множина елементів системи визначається як сукупність взаємопов'язаних компонентів, що забезпечують процеси збору, передачі, обробки та візуалізації даних. Вона включає контрольний центр, контрольна станція, сукупність безпілотних платформ різного типу, сенсорну та комунікаційну підсистеми, серверну інфраструктуру та засоби забезпечення ЛМВ за допомогою AR.

$$E = \{e_{CS}, E_{UAV}, E_{UGV}, E_{XRG}, e_{DC}, E_{RET}, E_{SL}, e_{CC}, e_{SRV}, E_{DB}\}, \quad (2.2)$$

де e_{CS} – контрольна станція;

E_{UAV} – множина безпілотних літальних апаратів;

E_{UGV} – множина наземних роботизованих комплексів;

E_{XRG} – множина окулярів розширеної реальності;

e_{DC} – контролер безпілотних апаратів;

E_{RET} – множина ретрансляторів;

E_{SL} – множина супутників;

e_{CC} – контрольний центр;

e_{SRV} – множина серверів;

E_{DB} – база даних.

Множина користувачів включає операторів безпілотної системи моніторингу, служби реагування та інший персонал, що використовує результати функціонування системи. Така структура відображає багаторівневу взаємодію користувачів із системою та дозволяє врахувати різні ролі у процесах управління, аналізу та реагування.

$$U = \{u_{OPR}, U_{CSTS}, u_{DSC}, u_{SD}, u_{PD}, u_{DD}, u_{MS}, u_{DH}, U_{CCO}, U_{TSE}, u_{CSE}, u_{DA}\}, \quad (2.3)$$

де u_{OPR} – оператор безпілотних апаратів;

U_{CSTS} – множина технічного персоналу контрольної станції;

u_{DSC} – командир групи розмінування;

u_{SD} – старший сапер;

u_{PD} – сапер;

u_{DD} – водій групи розмінування;

u_{MS} – медик групи розмінування;

u_{DH} – голова контрольного центру;

U_{CCO} – множина операторів контрольного центру;

U_{TSE} – персонал технічної підтримки контрольного центру;

u_{CSE} – інженер з кібербезпеки;

u_{DA} – аналітик даних.

Множина процесів включає основні функціональні етапи обробки інформації та керування системою, зокрема процеси збору, передачі, обробки та візуалізації даних, а також процеси прийняття рішень. Сукупність цих процесів утворює замкнений цикл функціонування системи моніторингу.

$$P = \{p_{Sens}, p_{Trans}, p_{Proc}, p_{Vis}, p_{Dec}, p_{Ctrl}\}, \quad (2.4)$$

де p_{Sens} – процес збору даних;

p_{Trans} – процес передачі даних;

p_{Proc} – процес обробки даних;

p_{Vis} – процес візуалізації даних;

p_{Dec} – процес прийняття рішень;

p_{Ctrl} – процес керування.

Множина станів визначає можливі режими функціонування БСМ та відображає послідовність виконання основних процесів обробки інформації і керування. Вона включає стани роботи БСМ, реакції оператора, реакції системи на помилки, стан відмови тощо. Така множина станів дозволяє описати динаміку системи та є основою для побудови марковської моделі.

$$S = \{s_A, s_M, s_{HIM}, s_P, s_{FM}, s_{FMR}, s_{MP}, s_{HIMP}, s_{DL}\}, \quad (2.5)$$

де s_A – стан нормальної роботи в автономному режимі;

s_M – стан нормальної роботи в ручному режимі;

s_{HIM} – стан реакції оператора на отримувані дані;

s_P – стан безпечного повернення;

s_{FM} – стан помилки в ручному режимі керування;

s_{FMR} – стан помилки з безпечним поверненням;

s_{MP} – стан ручного керування з частковою працездатністю системи;

s_{HMP} – стан реакції оператора на отримувані дані з частковою працездатністю системи;

s_{DL} – стан часткової працездатності в наслідок відмови;

Множина зв'язків системи визначається як сукупність відношень між елементами та користувачами, що описують інформаційні та керуючі взаємодії. Вона включає зв'язки між елементами системи, які забезпечують обробку та передачу даних, а також зв'язки між системою та користувачами, що реалізують процеси сприйняття інформації та формування керуючих впливів.

$$R \subseteq (E \times U) \cup (U \times E) \cup (E \times E), \quad (2.6)$$

$$R = R_{E \rightarrow U} \cup R_{U \rightarrow E} \cup R_{E \rightarrow E}, \quad (2.7)$$

Зв'язки типу «елемент–користувач» визначають взаємодію між технічними компонентами системи та користувачами. Інформаційні зв'язки забезпечують передачу результатів обробки даних користувачам, тоді як керуючі зв'язки відображають вплив користувачів на функціонування системи шляхом формування запитів і команд.

$$R_{EU} = \{(e_{CS} \rightarrow U_{CSTS}), (e_{CC} \rightarrow U_{CCO}), (E_{XRG} \rightarrow u_{OPR}), (E_{XRG} \rightarrow u_{DSC})\}, \quad (2.8)$$

де $(e_{CS} \rightarrow U_{CSTS})$ – зв'язок контрольної станції з технічного персоналу;

$(e_{CC} \rightarrow U_{CCO})$ – зв'язок контрольного центру з його операторами;

$(E_{XRG} \rightarrow u_{OPR})$ – зв'язок окулярів розширеної реальності з оператором безпілотного апарата;

$(E_{XRG} \rightarrow u_{DSC})$ – зв'язок окулярів розширеної реальності з командою розмінування.

Зв'язки типу «користувач–елемент» визначають керуючі та ініціюючі впливи користувачів на систему. Вони відображають процеси формування команд, запитів та налаштувань, що забезпечують керування функціонуванням БСМ.

$$R_{UE} = \{(u_{OPR} \rightarrow e_{DC}), (U_{CCO} \rightarrow e_{CC}), (U_{CSTS} \rightarrow e_{CS})\}, \quad (2.9)$$

де $(u_{OPR} \rightarrow e_{DC})$ – зв'язок оператора безпілотних апаратів з контролером безпілотних апаратів;

$(U_{CCO} \rightarrow e_{CC})$ – зв'язок операторів контрольного центру з контрольним центром;

$(U_{CSTS} \rightarrow e_{CS})$ – зв'язок технічного персоналу контрольної станції з контрольною станцією.

Зв'язки типу «елемент–елемент» визначають внутрішню структуру системи та формалізуються як відношення, що описує взаємодії між її компонентами. Ці зв'язки відображають інформаційні потоки, передачу даних, функціональні залежності та керуючі впливи між підсистемами. Через них реалізуються основні етапи обробки інформації – від збору даних сенсорами і їх передачі через комунікаційні канали до обробки в обчислювальних модулях і подальшого використання в системі керування.

Крім інформаційної взаємодії, зв'язки між елементами забезпечують узгоджене функціонування всієї системи як єдиного цілого, формуючи замкнений контур обміну даними та керуючими сигналами. Вони можуть бути класифіковані за типами потоків, зокрема на інформаційні (передача та обробка даних) і керуючі (формування та передача команд). Така структура зв'язків дозволяє не лише описати архітектуру системи, але й слугує основою для подальшого моделювання.

$$\begin{aligned}
R_{EE} = \{ & \\
& (e_{CS} \rightarrow e_{XRG}), \\
& (e_{CS} \rightarrow E_{RET}), \\
& (E_{RET} \rightarrow e_{CS}), \\
& (e_{CS} \rightarrow E_{SL}), \\
& (E_{SL} \rightarrow e_{CS}), \\
& (e_{CS} \rightarrow e_{SRV}), \\
& (e_{SRV} \rightarrow e_{CS}), \\
& (e_{DS} \rightarrow e_{CS}), \\
& (E_{RET} \rightarrow e_{XRG}), \\
& (E_{RET} \rightarrow E_{UAV}), \\
& (E_{UAV} \rightarrow E_{RET}), \\
& (E_{RET} \rightarrow E_{UGV}), \\
& (E_{UGV} \rightarrow E_{RET}), \\
& (E_{RET} \rightarrow E_{SL}), \\
& (E_{SL} \rightarrow E_{RET}), \\
& (e_{SRV} \leftrightarrow E_{DB}), \\
& (E_{DB} \rightarrow e_{SRV}), \\
& (e_{SRV} \leftrightarrow e_{CC}), \\
& (e_{CC} \rightarrow e_{SRV}) \\
& \},
\end{aligned} \tag{2.10}$$

де $(e_{CS} \rightarrow e_{XRG})$ – зв’язок окулярів розширеної реальності з контрольною станцією;

$(e_{CS} \leftrightarrow E_{RET})$ – зв’язок між контрольною станцією та мережею ретрансляторів;

$(e_{CS} \leftrightarrow E_{RET})$ – зв’язок між контрольною станцією та мережею ретрансляторів;

$(e_{CS} \leftrightarrow E_{SL})$ – зв’язок між контрольною станцією та множиною супутників;

$(e_{CS} \leftrightarrow e_{SRV})$ – зв’язок між контрольною станцією та сервером;

$(e_{DS} \rightarrow e_{CS})$ – зв’язок контролера безпілотних апаратів з контрольною станцією;

$(E_{RET} \rightarrow e_{XRG})$ – зв’язок мережі ретрансляторів з окулярами розширеної реальності;

$(E_{RET} \leftrightarrow E_{UAV})$ – зв’язок мережі ретрансляторів з множиною БПЛА;

$(E_{RET} \leftrightarrow E_{UGV})$ – зв’язок мережі ретрансляторів з множиною НРК;

$(E_{RET} \leftrightarrow E_{SL})$ – зв'язок мережі ретрансляторів з множиною супутників;

$(e_{SRV} \leftrightarrow E_{DB})$ – зв'язок сервера з множиною баз даних;

$(e_{SRV} \leftrightarrow e_{CC})$ – зв'язок сервера з контрольним центром.

2.1.2 Розроблення архітектури системи моніторингу потенційно небезпечних територій

На основі теоретико-множинної моделі була розроблена архітектура системи, яка описує зв'язки між компонентами (рисунок 2.1). Ключовими елементами системи, які безпосередньо беруть участь у процесі моніторингу території з метою виявлення нерозірваних боєприпасів, є безпілотні літальні та наземні апарати. Їх використання значно знижує ризик для саперів, дозволяючи проводити дистанційне обстеження території та надаючи високоточні дані для аналізу. Комплект БПЛА/НРК включає різні типи датчиків, які разом з технологіями штучного інтелекту (англ. Artificial Intelligence, AI) та автоматизації дозволяють не тільки виявляти потенційні загрози, але й створювати карти для подальших.

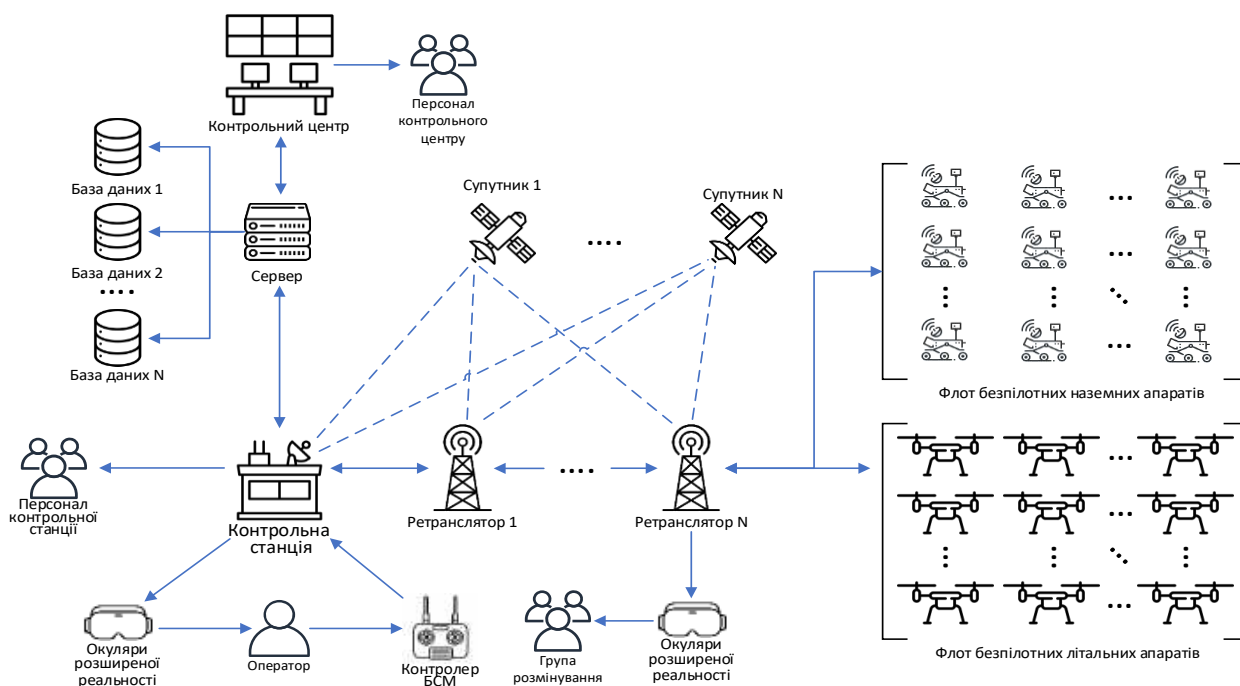


Рисунок 2.1 – Архітектура системи моніторингу

Рисунок 2.1 ілюструє комплексну систему розмінування, яка поєднує в собі передові технології управління БПЛА/НРК, доповнену реальність та централізовану інфраструктуру аналізу та обробки даних. Ця система забезпечує ефективно, безпечно та масштабоване виконання операцій з розмінування, значно зменшуючи ризики для саперів та дозволяючи працювати в складних і небезпечних умовах.

Процес виявлення та моніторингу ВВП складається з таких основних етапів:

1) сканування місцевості. Для отримання актуальної інформації про стан місцевості проводиться моніторинг місцевості з використанням БПЛА/НРК. Для забезпечення найвищої точності використовуються різні типи датчиків, такі як оптичні камери з високою роздільною здатністю, теплові та мультиспектральні датчики, магнітометри та геологічні радари. Зібрані дані передаються на віддалений сервер у режимі реального часу.

2) Аналіз даних за допомогою AI. Засоби штучного інтелекту аналізують отримані дані, порівнюючи їх з існуючими картами та шаблонами ВВП. Координати небезпечних об'єктів визначаються та надсилаються операторам або персоналу, що займається розмінуванням.

3) Маркування небезпечних зон. Дані, отримані під час моніторингу та обробки, передаються на спеціальні окуляри розширеної реальності, що дозволяє саперам візуалізувати небезпечні зони та відповідно планувати операції з розмінування.

4) Нейтралізація ВВП. На основі даних моніторингу команда з розмінування проводить додаткову розвідку місцевості та нейтралізує ВВП. Під час процесу нейтралізації також можуть використовуватися спеціалізовані повітряні та наземні транспортні засоби. Однак, оскільки ці транспортні засоби не беруть безпосередньої участі в процесі моніторингу, вони не вважаються частиною описаної вище системи.

Залежно від типів використовуваних датчиків, безпілотні апарати можна класифікувати на такі, що використовують:

1) оптичні засобами виявлення, що використовуються для попереднього аналізу місцевості. Вони можуть бути оснащені:

- оптичними камерами з високою роздільною здатністю;
- тепловізорами – корисними для виявлення ВВП, оскільки вони можуть змінювати теплопровідність ґрунту;
- мультиспектральними датчиками, які виявляють аномалії, що можуть вказувати на замасковані мінні поля;
- інфрачервоними датчиками.

2) Георадари для виявлення вибухонебезпечних об'єктів під землею. Вони працюють, випромінюючи електромагнітні хвилі в ґрунт і аналізуючи відбиті сигнали. Це дозволяє:

- виявляти пластикові міни, які важко знайти за допомогою металошукачів;
- оцінювати глибину залягання вибухонебезпечних об'єктів;
- створення детальних карт підземних загроз.

Це дозволяє виявляти навіть неметалеві міни, які часто не виявляються традиційними методами.

3) Магнітометри можуть виявляти залізні та сталеві компоненти мін, що полегшує ідентифікацію старих нерозірваних пристроїв, які частково або повністю закопані в землю.

4) Лазерні датчики (лідар) можуть сканувати місцевість, що дозволяє створювати детальні тривимірні моделі ландшафту та виявляти будь-які зміни, спричинені розміщенням вибухових пристроїв.

У таблиці 2.1 наведено порівняння методів використання датчиків для моніторингу небезпечних зон за допомогою БПЛА/НРК. Аналіз цієї інформації дозволяє зробити висновки щодо рівня суміжності зазначених задач, а також можливостей повторного використання технічних засобів і методів.

Передусім, спостерігається наявність значного перетину у використанні окремих сенсорних технологій для обох задач. Зокрема, оптичне виявлення є

універсальним рішенням, що застосовується як для виявлення ВВП, так і пожеж, причому як у БПЛА, так і в НРК. Це свідчить про високий рівень суміжності задач на рівні базових засобів спостереження, оскільки в обох випадках використовується аналіз візуальної інформації для ідентифікації об'єктів або аномалій.

Таблиця 2.1 – Методи моніторингу потенційно небезпечних середовищ

№	Рішення	Виявлення ВВП		Виявлення пожежі	
		БПЛА	НРК	БПЛА	НРК
1	Оптичне виявлення	+	+	+	+
2	Термографія	+		+	+
3	Лідар	+		+	
4	Магнітометрія		+		
5	Георадар		+		

Термографія також демонструє суттєвий ступінь суміжності, хоча й з певними обмеженнями. Вона застосовується для обох задач у БПЛА, а також для виявлення пожеж у НРК. Це пояснюється тим, що теплові аномалії є ключовою ознакою пожеж, а у випадку ВВП – можуть виступати допоміжним індикатором

Лідар використовується для обох задач з БПЛА, але не застосовується в НРК. Це вказує на суміжність задач на рівні просторового аналізу середовища, зокрема для побудови тривимірних моделей місцевості, виявлення змін рельєфу або структурних аномалій.

Натомість магнітометрія та георадар мають вузькоспеціалізоване застосування, характерне лише для задачі виявлення ВВП і тільки в НРК. Це свідчить про наявність специфічних аспектів задачі, які не мають аналогів у задачі виявлення пожеж. Такі технології орієнтовані на виявлення прихованих або металевих об'єктів, що не може бути використано для виявлення осередків пожеж.

Загалом, аналіз таблиці дозволяє зробити висновок, що задачі виявлення ВВП і пожеж мають часткову суміжність, яка проявляється на рівні використання

універсальних сенсорів (оптичних і теплових) та підходів до оброблення даних. Це відкриває можливості для уніфікації апаратного забезпечення, повторного використання алгоритмів обробки сигналів і створення інтегрованих систем моніторингу.

2.1.3 Розроблення інтерфейсу людино-машинної взаємодії на основі доповненої реальності для оператора системи моніторингу потенційно небезпечних територій

Хоч ЛМІ на основі доповненої реальності являються доволі поширеним явищем, прикладів їх застосування для взаємодії з БПЛА дуже обмежена кількість. Це можна пояснити тим, що дослідження даного напрямку використання AR знаходяться лише на початкових стадіях. Так, у роботі [72] представлено AR-інтерфейс для мобільних пристроїв, що дозволяє здійснювати керування флотом БПЛА з допомогою віртуальних маніпуляторів на сенсорному екрані. При цьому існує суттєвий недолік у вигляді необхідності оператору постійно підтримувати візуальний контакт з безпілотним апаратом для контролю напрямку його польоту та забезпечення зв'язку з мобільним пристроєм. Така необхідність викликана тим фактом, що вікно з відображенням відеопотоку, отриманого з БПЛА, займає менше 10% екранного простору та частково перекривається віртуальними елементами керування. Для мобільних пристроїв, що мають серйозні обмеження у розмірах дисплеїв та роздільній здатності, така мала площа відображуваного елемента робить перегляд інформації з БПЛА майже неможливим. Даний варіант використання AR для керування БПЛА можна використовувати в особистих цілях, але для виконання задач у системах моніторингу він не підходить.

У роботі [73] пропонується використовувати доповнену реальність для керування БПЛА від першої особи за допомогою окулярів доповненої реальності. Для керування польотом БПЛА використовується пульт, в той час як інформація з камер безпілотного апарата відображається на віртуальних вікнах. Даний варіант виглядає набагато зручнішим з точки зору керування, але не допускає можливості

керування флотом БПЛА. Також у даному варіанті ЛМІ на основі AR відсутні будь-які елементи керування, такі як рівень заряду, висота, швидкість, і т.д. З цих причин використання даного варіанту для систем моніторингу не є можливим.

У роботі [74] пропонується варіант, що позиціонується як інтерфейсу з елементами доповненої реальності для керування БПЛА. На відміну від попереднього дослідження, тут наявні всі необхідні показники для керування безпілотним апаратом. Проте інтерфейс все ще має ряд недоліків, а саме малий розмір елементів, що відповідають за відображення відеопотоку з БПЛА та карти польоту, а також відсутність можливості застосування для керування групою безпілотних апаратів. Також є концептуальне питання, чи можна вважати пропоновану систему людино-машинної взаємодії такою, що містить елементи доповненої реальності, оскільки всі віртуальні елементи керування знаходяться у двовимірній площині, хоча класичне визначення AR[68] передбачає розміщення їх у трьох вимірах. Спираючись на описані вище наявні варіанти та недоліки наявних AR-інтерфейсів, доцільним є представлення власного варіанту дизайну.

На рисунку 2.2 зображено макет одного з розроблених інтерфейсів керування БПЛА з вбудованими елементами доповненої реальності. Така побудова інтерфейсу має на меті розширити можливості оператора в процесі людино-машинної взаємодії. Концепція доповненої реальності передбачає можливість тактильного керування окремими елементами людино-машинних інтерфейсів, що теоретично спрощує і пришвидшує перемикання між керуванням окремими одиницями флотів БПЛА/НРК. Це, в свою чергу, може сприяти підвищенню якості використання такого типу інтерфейсів та покращити користувацький досвід операторів, при цьому зберігши основні елементи класичних ЛМІ БПЛА.

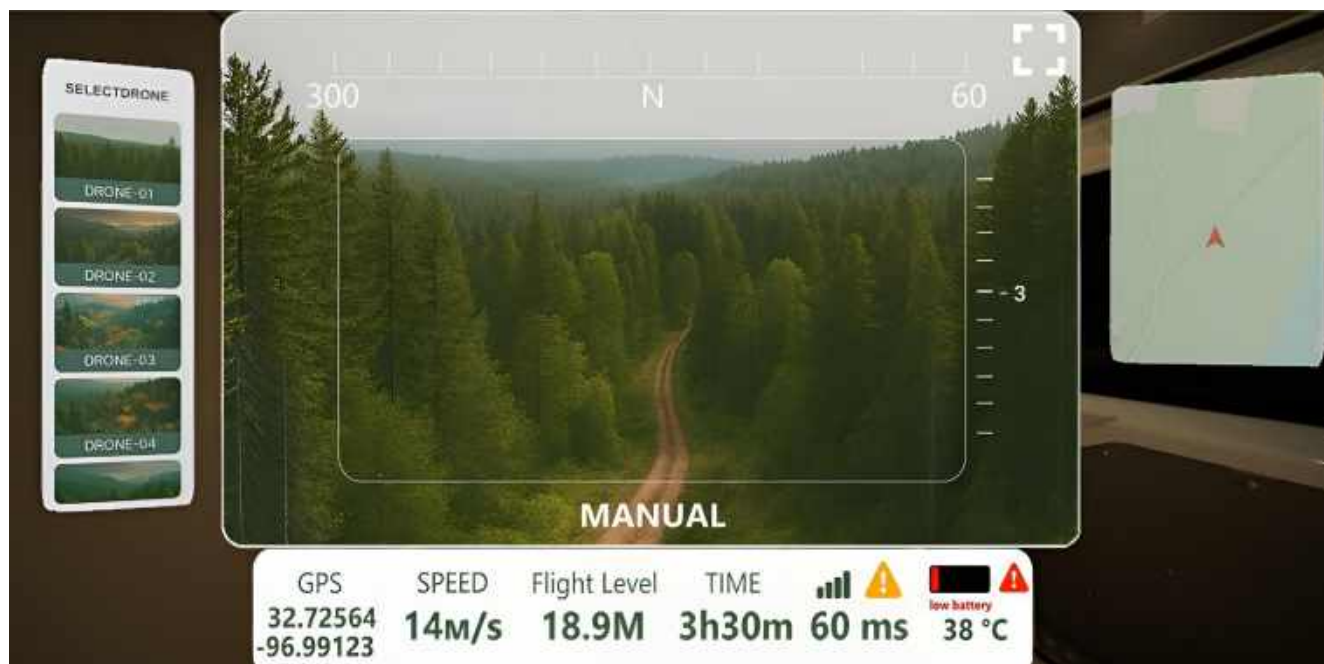


Рисунок 2.2 – Макет інтерфейсу доповненої реальності для оператора БПЛА

Макет пропонованого інтерфейсу доповненої реальності для оператора БПЛА та НРК складається з чотирьох віртуальних вікон, кожне з яких виконує окрему функцію:

- центральне вікно інтерфейсу являється основним та використовується оператором для відображення потоку відеоданих, що надходять з БПЛА та НРК. Крім зображення з безпілотного апарата, на екрані відображаються такі елементи керування, як компас для відстеження напрямку руху та індикатор кута нахилу відеокамери, з якої передається зображення. Інші елементи керування на даному екрані відсутні з метою зменшення кількості факторів, що відволікають оператора під час виконання завдання, та збільшення області огляду;

- з правої сторони від головного вікна розміщено вікно з картою для контролю маршруту польоту;

- на нижній панелі відображається необхідна оператору інформація про технічний стан керованого БПЛА або НРК, швидкість і висоту його руху, час роботи апарата, його положення в просторі і т.д. Розміщення цих елементів керування у окремому вікні зумовлене необхідністю звільнити якомога більше робочого простору на основному екрані;

– розміщене з лівої сторони вікно використовується для візуального контролю за рештою БПЛА системи та швидкого перемикання між ними. Це єдиний елемент AR-інтерфейсу, який передбачає тактильну взаємодію. Дане вікно використовується не тільки для відображення потоку відеоданих з інших безпілотних апаратів системи, а й швидке перемикання між ними шляхом використання керування жестами. При натисканні на елемент відображення у вікні, керування перемикається на відповідний апарат. Також у вікні можливе використання методів керування жестами для прокручування списку безпілотних апаратів. Інші елементи інтерфейсу не допускають подібної свободи у взаємодії з ними. Це обмеження впроваджене для зменшення ризику помилки під час керування безпілотним апаратом внаслідок неправильного або помилково зробленого жесту.

Таким чином, описана на рисунку 2.2 людино-машинна система доповненої реальності дозволяє розбити елементи керування БПЛА на окремі вікна. Традиційно такий підхід вимагає наявності декількох моніторів, але доповнена реальність не має подібних обмежень і може використовувати віртуальні монітори, що розміщуються в полі зору оператора. Ці вікна можуть бути розміщені в будь-якому порядку та в будь-якій зручній точці, змінювати розмір та орієнтацію, за необхідності бути прибраними і згодом відкритими наново. Подібна гнучкість у використанні має позитивно вплинути на мобільність системи та користувацький досвід оператора.

Також необхідно зазначити, що пропонований інтерфейс має ряд суттєвих переваг порівняно з представленими у роботах [72, 73, 74] рішеннями. На відміну від розглянутих аналогів, ЛМІ на рисунку 2.2 передбачає керування на основі інформації, отримуваної безпосередньо з камери БПЛА, та доповненої елементами у вигляді відображуваного на центральному вікні компаса та винесеної у окреме вікно мапи місцевості. Таким чином оператору не потрібно буде підтримувати постійний зоровий контакт з керованим апаратом, тим самим обмежуючи зону виконання задач моніторингу. Також в пропонованому варіанті телеметричні дані, включаючи глобальні координати, швидкість, висоту, час польоту, затримку

зображення, температуру, силу сигналу та стан батареї, зведено в одну компактну панель, що повинно зменшити візуальний шум і когнітивне навантаження за рахунок організації робочого простору. Інтегровані попередження про поточний стан керованого БПЛА мають на меті додатково покращити прийняття рішень оператором, що повинно зменшити тривалість навчання та збільшити ефективність обробки інформації в реальному часі порівняно з рамками, описаними концептуально в роботах [72] та [74].

2.2 Формування нормативних профілів вимог до інтерфейсів людино-машинної взаємодії

Інтерфейси людино-машинної взаємодії є критично важливим компонентом сучасних технічних та інформаційних систем, оскільки саме через них відбувається передавання інформації, керування процесами та прийняття рішень оператором. Якість ЛМІ безпосередньо впливає на ефективність виконання завдань, безпеку функціонування системи та надійність результатів діяльності людини-оператора. Особливої значущості ці аспекти набувають у системах критичної інфраструктури, оборонних, авіаційних, енергетичних системах, а також у системах із використанням AR, де візуальні, когнітивні та ергономічні фактори взаємодії ускладнюються.

Зростання складності людино-машинних систем зумовлює необхідність не лише інтуїтивного проектування інтерфейсів, але й їх формалізованого нормативного опису. Використання окремих рекомендацій або фрагментів стандартів не забезпечує системності та узгодженості вимог, що призводить до неоднозначності під час оцінювання якості ЛМІ. У цьому контексті актуальним є завдання формування нормативних профілів вимог до ЛМІ, які дозволяють інтегрувати положення різних стандартів у єдину, логічно впорядковану структуру.

Формування нормативних профілів вимог до ЛМІ базується на аналізі міжнародних стандартів і рекомендацій, розроблених провідними організаціями зі стандартизації.

Окрему групу становлять галузеві нормативні документи, орієнтовані на системи підвищеної відповідальності, зокрема керівництва з проєктування та оцінювання інтерфейсів для атомної енергетики, авіації та військових систем. Такі документи містять деталізовані вимоги до відображення інформації, сигналізації, керування та підтримки прийняття рішень оператором. Разом з тим, вони мають вузькоспеціалізований характер і не можуть бути безпосередньо застосовані до широкого класу сучасних ЛМІ, зокрема на основі AR.

Аналіз нормативної бази показує, що жоден окремий стандарт не забезпечує повного покриття всіх аспектів якості людино-машинної взаємодії. Це зумовлює необхідність інтеграції вимог різних документів та формування узагальнених нормативних профілів, адаптованих до конкретного класу систем і умов експлуатації.

У межах даного дослідження нормативний профіль вимог до ЛМІ визначається як формалізована сукупність узгоджених вимог, сформована на основі відбору та адаптації положень нормативних документів з урахуванням контексту використання системи. Нормативний профіль не є простим переліком вимог, а представляє собою структуровану модель, що відображає взаємозв'язки між характеристиками якості інтерфейсу.

Структурно нормативний профіль включає такі рівні:

- загальні принципи людино-орієнтованого проєктування;
- групи характеристик якості (ергономічні, інформаційні, когнітивні, функціональні);
- конкретизовані вимоги та показники оцінювання;
- умови та обмеження застосування вимог.

Такий підхід забезпечує узгодженість між положеннями стандартів і практичними критеріями оцінювання, що є необхідною умовою для подальшого оцінювання ЛМІ.

Процес формування нормативних профілів вимог до інтерфейсів людино-машинної взаємодії включає низку послідовних етапів. На першому етапі

здійснюється систематичний аналіз нормативних джерел з метою виявлення релевантних вимог та рекомендацій. При цьому враховується не лише формулювання вимог, але й контекст їх застосування, рівень абстракції та цільова аудиторія стандарту.

На другому етапі проводиться класифікація відібраних вимог за групами характеристик якості. Особлива увага приділяється вимогам, що впливають на когнітивне навантаження оператора, сприйняття інформації та запобігання помилкам. Для ЛМІ на основі AR додатково враховуються вимоги до просторової прив'язки інформації, суміщення віртуальних та реальних об'єктів і мінімізації конфліктів.

Третій етап полягає у формалізації вимог у вигляді показників або критеріїв, придатних для кількісного чи якісного оцінювання. На цьому етапі здійснюється усунення дублювання та суперечностей між вимогами різних стандартів, а також узгодження термінології.

Інтерфейси доповненої реальності мають низку специфічних особливостей, які ускладнюють безпосереднє застосування традиційних вимог до ЛМІ. Зокрема, AR-інтерфейси поєднують фізичне та віртуальне середовище, що змінює характер сприйняття інформації та взаємодії оператора з системою. Це потребує адаптації нормативних профілів з урахуванням просторових, часових і когнітивних факторів.

Сформовані нормативні профілі вимог слугують основою для побудови методик оцінювання якості інтерфейсів людино-машинної взаємодії. Вони дозволяють перейти від суб'єктивного або експертно-інтуїтивного оцінювання до формалізованого аналізу, що базується на чітко визначених критеріях, та забезпечують узгодженість між різними етапами життєвого циклу ЛМІ – від проектування до експлуатації та модернізації. Крім того, вони створюють передумови для автоматизації процесів оцінювання та інтеграції з програмними засобами аналізу якості інтерфейсів.

Таким чином, у даному розділі обґрунтовано необхідність формування нормативних профілів вимог до інтерфейсів людино-машинної взаємодії та запропоновано методологічний підхід до їх побудови. Показано, що нормативні

профілі дозволяють інтегрувати положення різних стандартів у єдину узгоджену систему вимог, адаптовану до специфіки сучасних ЛМІ та AR-інтерфейсів. Сформовані профілі створюють методологічну основу для подальшого оцінювання якості інтерфейсів, розроблення програмних засобів підтримки та проведення експериментальних досліджень.

2.3 Розроблення та дослідження методики оцінювання якості інтерфейсів людино-машинної взаємодії на основі доповненої реальності

У одній з публікацій [1] було проведено аналіз стану досліджень та зроблено огляд наявних на той момент методів оцінювання якості систем. У статті був зроблений висновок, що основна частина пропонованих методів ґрунтується на оцінюванні якості використання AR систем, оскільки за допомогою цього показника найлегше оцінити привабливість для користувача розроблюваного програмного продукту. Частіше всього для проведення оцінювання використовується метод евристичного дослідження. Такий вибір методики оцінки зумовлений тим, що якість використання суб'єктивною характеристикою і використання такого ж суб'єктивного методу оцінки здається логічним.

У більш актуальних дослідженнях дана тенденція продовжується, хоча було помітно розширено перелік оцінюваних показників. Так, у роботах [75], [76], [77] на рівні з показниками SUS також враховуються фізичне, психічне та часове навантаження, а також зусилля та продуктивність групи респондентів. Отримані за допомогою такого підходу результати можна вважати більш точними, оскільки тут враховується вплив AR на фізичний та психологічний стан опитуваних, що не притаманно класичним методам оцінювання якості використання.

У роботах [78], [79] розглядається різні варіанти оцінювання якості AR, переважно сконцентрованих на візуальному аспекті цієї технології. Тут не враховане фізичне та ментальне навантаження, натомість розглядаються такі показники якості, як адаптивність, якість контенту, естетичність, занурення і т.д. Безумовно, дані характеристики являються важливими для людино-машинних

систем з високим рівнем занурення, до яких відноситься доповнена реальність, але при цьому ігноруються технічні фактори та можливі наслідки тривалого використання AR у вигляді погіршення фізичного та емоційного станів.

Також варто виокремити дослідження [80], в якому на одному ієрархічному рівні з показниками задоволеності користувачів оцінюється безпека використання системи з AR інтерфейсами. Дана характеристика якості має бути однією з ключових для систем людино-машинної взаємодії з доповненою реальністю, оскільки за їх допомогою здійснюється безпосередній вплив на сприйняття навколишнього середовища, але в більшості досліджень вона ігнорується. При цьому в даній роботі відсутні характеристики, за якими проводиться оцінка фізичного та ментального навантаження, а також візуальної складової.

Загалом, можна зробити висновок, що за останні роки був зроблений значний прогрес в питаннях оцінювання якості ЛМІ на основі AR, однак у переважній більшості випадків використовуються існуючі методи без врахування особливостей доповненої реальності. Тому визначення ключових характеристик для всебічного оцінювання якості AR являється актуальною науково-практичною задачею. Така задача є особливо важливою для людино-машинних систем, в яких оператори керують застосуванням одиничних БПЛА, флотами БПЛА та флотами, які об'єднують різні ройові системи, коли суттєва динаміка управління польотами вимагає швидких і безпомилкових рішень. Це стосується, зокрема, безпілотних систем для гуманітарного розмінування, технічного інспектування тощо [81], [82], [83]. Вбудовування AR в такі інтерфейси є новим підходом, що потребує відповідних досліджень, зокрема, з оцінки якості інтерфейсів та впливу AR на характеристики оператора та системи в цілому.

Підготовка переліку характеристик для подальшого експертного оцінювання якості людино-машинних інтерфейсів доповненої реальності здійснювалася на основі поєднання суб'єктивних та об'єктивних критеріїв. До суб'єктивних віднесено показники, що описують зручність використання, сприйняття, інтуїтивність та відповідність інтерфейсу потребам користувача, сформовані згідно зі стандартами [49], [35] та концептуальною моделлю якості arcs42 [84]. Об'єктивні

технічні характеристики, які забезпечують надійність, коректність відображення інформації та безпечність взаємодії, були відібрані відповідно до вимог NUREG-0700 [85] та рекомендацій стандарту [5]. Узгодження цих джерел надало змогу сформуванню збалансованого та комплексного набору показників (таблиця 2.2), придатного для системного аналізу та порівняльного оцінювання інтерфейсів доповненої реальності.

Таблиця 2.2 – Список характеристик якості ЛМІ на основі AR

№	Назва характеристики	Джерело
1	Функційна повнота / Functional Completeness	[49], [35]
2	Функційна доцільність / Functional Appropriateness	[49]
3	Часова відповідність / Time Behaviour	[49], [85]
4	Використання ресурсів / Resource Utilization	[49]
5	Навченість / Learnability	[49], [35]
6	Безпомилковість / Faultless	пропонована
7	Реактивність / Reactivity	пропонована
8	Захист від помилок / User Error Protection	[49], [35]
9	Самоописність / Self-descriptiveness	[49], [35]
10	Безпечність використання / Safety	[49]
11	Довговічність / Durability	[84]
12	Попередження про небезпеку / Hazard Warning	[49]
13	Передбачуваність / Predictability	[84], [86]
14	Доцільність / Suitability	[49]
15	Персоналізація / Personalization	[84]
16	Когерентність / Coherence	[84]
17	Лаконічність / Conciseness	[84], [85]
18	Контрольованість / Controllability	[86], [35]
19	Естетична цілісність / Aesthetic Integrity	[86]
20	Точність відображення / Visual Accuracy	[86]
21	Читабельність / Readability	[84], [85]
22	Естетичність / Aesthetics	[35]
23	Точність вирівнювання / Alignment Accuracy	[5]
24	Частота кадрів / Frame Rate	[5]
25	Затримка / Latency	[5]
26	Когнітивне навантаження / Cognitive load	[87]
27	Стрес / Stress	[76], [77]
28	Втома / Fatigue	[76], [77]
29	Реалістичність / Realism	пропонована
30	Однозначність / Unambiguity	[85]

Кінець таблиці 2.2

31	Розрізнюваність / Distinguishability	[85]
32	Помітність / Visibility	пропонована
33	Інтерактивність / Interactivity	[78]

Функційна повнота – ступінь, в якому набір функцій охоплює всі визначені завдання та цілі передбачуваних користувачів.

Функційна доцільність – ступінь, в якому набір функцій сприяє виконанню визначених завдань і цілей.

Часова відповідність – ступінь, в якому час відгуку системи під час виконання своїх функцій відповідають вимогам.

Використання ресурсів – це ступінь, в якому кількість і типи ресурсів, що використовуються при виконанні своїх функцій, відповідають вимогам.

Навченість – ступінь, в якому функції продукту або системи можуть бути освоєні для використання певними користувачами протягом певного періоду часу.

Безпомилковість – ступінь, до якого інтерфейс впливає на безпомилковість дій користувача, зроблених використання системи доповненої реальності.

Реактивність – ступінь, до якого інтерфейс впливає на швидкість реакції користувача у визначених ситуаціях.

Захист від помилок – ступінь, в якому система запобігає помилкам користувачів при експлуатації.

Самоописність – ступінь, в якому продукт надає відповідну інформацію, необхідну користувачеві, щоб його можливості та використання були віARазу зрозумілі без надмірної взаємодії з продуктом або іншими ресурсами, такими як документація, служби підтримки або інші користувачі.

Безпечність використання – ступінь, в якому дозволяється уникнути ситуації, що ставить під загрозу життя, здоров'я людей, майно або навколишнє середовище.

Довговічність – ступінь, до якого система здатна залишатись корисною протягом тривалого періоду часу.

Попередження про небезпеку – ступінь, до якого система здатна попереджати про неприйнятні ризики для змоги вчасно реагувати з метою забезпечення безпечної роботи користувача.

Передбачуваність – ступінь, до якого можна прогнозувати наслідки дій користувача, враховуючи поточний стан системи.

Доцільність – ступінь, до якого забезпечуються функції, що відповідають заявленим та неявним потребам передбачуваних користувачів при використанні в зазначених умовах.

Персоналізація – ступінь, до якого продукт може бути змінений або налаштований з урахуванням особистих уподобань користувача.

Когерентність – ступінь, до якого елементи ЛМІ логічно та естетично впорядковані або інтегровані.

Лаконічність – ступінь, до якого користувацький інтерфейсу здатен передавати потрібну інформацію коротко, зрозуміло і без зайвих елементів, але не жертвуючи змістом чи функціональністю.

Контрольованість – ступінь, в якій користувач відчуває контроль над елементами інтерфейсу.

Естетична цілісність – ступінь, у якій елементи ЛМІ візуально відповідають єдиному стилю.

Акуратність відображення – ступінь, в якому елементи інтерфейсу позбавлені візуальних, стилістичних або орфографічних помилок.

Читабельність – ступінь, до якого елементи ЛМІ являються розбірливими і легко читаються.

Естетичність – ступінь, до якої інтерфейс забезпечує приємну та задовільну взаємодію.

Точність вирівнювання – ступінь відхилення віртуального об'єкта від передбачуваного місця відображення.

Частота кадрів – ступінь, до якої частота оновлення зображення відповідає вимогам.

Затримка – ступінь, до якого відчувається затримка між рухом користувача та оновленням зображення.

Когнітивне навантаження – ступінь, до якого зростає когнітивне навантаження на користувача по мірі використання інтерфейсів доповненої реальності.

Стрес – ступінь, до якого зростає рівень стресу або напруги користувача по мірі використання інтерфейсів доповненої реальності.

Втома – ступінь, до якого зростає рівень втоми користувача по мірі використання інтерфейсів доповненої реальності.

Реалістичність – ступінь, до якої інтерфейс доповненої реальності відображає елементи навколишнього середовища.

Однозначність – ступінь, до якого не допускається багатозначне трактування призначення елементів інтерфейсу доповненої реальності.

Розрізнюваність – ступінь, до якої окремі елементи, піктограми та символи інтерфейсу відрізняються один від одного.

Помітність – ступінь, до якого віртуальні елементи виділяються на фоні реального світу.

Інтерактивність – ступінь, до якого забезпечується можливість безпосередньої взаємодії з елементами доповненої реальності, в тому числі через дотик, звук та вібрацію.

2.4 Оцінювання якості інтерфейсів людино-машинної взаємодії на основі доповненої реальності

Для підтвердження отриманих результатів необхідно перевірити їх у рамках експерименту з оцінювання якості системи людино-машинної взаємодії. В інженерії якості існує широкий перелік можливих методів, але за результатами аналізу в першому розділі було виявлено, що в контексті доповненої реальності найбільш широке розповсюдження отримали наступні:

- оцінка за допомогою метрик;

- опитування фокус-груп;
- експертне опитування.

Метод експертного опитування в нашому випадку являється найбільш прийнятним, оскільки дозволяє оцінити суб'єктивні показники людино-машинних інтерфейсів з точки зору осіб з різним професійним рівнем досвіду використання AR. Таким чином можна виявити наявні недоліки дизайну та поліпшити якість використання ЛМІ ще на етапі проєктування.

Для проведення оцінювання якості пропонованих інтерфейсів доповненої реальності методом експертної оцінки, на основі представлених у таблиці 2.2 характеристик були складені наступні питання:

- 1) Чи може сприяти такий інтерфейс виконання всіх передбачуваних задач оператора?
- 2) Чи може такий інтерфейс вплинути на безпомилковість дій оператора?
- 3) Чи може такий інтерфейс вплинути на швидкість реакції оператора?
- 4) Чи можливо буде опанувати такий інтерфейс за короткий проміжок часу?
- 5) Чи являється такий інтерфейс інтуїтивно зрозумілим?
- 6) Чи дозволяє такий інтерфейс уникати ситуацій, небезпечних для фізичного здоров'я оператора або навколишнього середовища?
- 7) Чи може такий інтерфейс залишатись актуальним впродовж тривалого періоду часу?
- 8) Чи впливає наявність доповненої реальності на моральне старіння інтерфейсу?
- 9) Чи може такий інтерфейс попереджати оператора про можливі ризики?
- 10) Чи можна налаштувати елементи інтерфейсу відповідно до особистих вподобань оператора (розташування AR елементів у просторі)?
- 11) Чи здатен такий інтерфейс передавати необхідну інформацію в стислій, зрозумілій формі?
- 12) Чи відповідають елементи інтерфейсу єдиному візуальному стилю?
- 13) Чи покращує даний AR інтерфейс реалістичне відображення навколишнього середовища?

14) Чи запобігається в такому інтерфейсі багатозначне трактування призначення елементів?

15) Чи виділяються AR-елементи інтерфейсу на фоні реального світу?

Процес експертної оцінки інтерфейсу шляхом опитування із використанням 10-бальної шкали складається з кількох послідовних етапів, які забезпечують надійність, репрезентативність та відтворюваність результатів. Насамперед формується експертна група – фахівці, які мають відповідну компетентність у сфері людино-машинних інтерфейсів або доповненої реальності. На основі критеріїв оцінювання створюється чек-лист, що включає показники, які можуть бути кількісно виміряні: зрозумілість інтерфейсу, навантаження на користувача, інтуїтивність навігації, стабільність роботи, візуальна чіткість тощо. Кожний пункт чек-листа формується однозначно та стосується лише однієї характеристики.

Далі на основі цього чек-листа конструюється опитувальник. Для кожного питання передбачається отримати відповідь у діапазоні від 1 до 10, де 1 означає мінімальну відповідність критерію, а 10 – максимальну. Для підвищення точності додається коротке текстове пояснення.

Застосування 10-бальної шкали для оцінювання інтерфейсів користувача є доцільним з огляду на її підвищену чутливість та аналітичну придатність. На відміну від 3-, 5- або 7-бальних шкал, 10-бальна забезпечує ширший діапазон градацій, що дозволяє респондентам точніше відобразити власне сприйняття зручності, зрозумілості чи ефективності інтерфейсу. Така шкала зменшує ймовірність ефекту «центральної тенденції», коли учасники схильні обирати середнє значення, та сприяє формуванню більш диференційованих оцінок. Крім того, 10-бальна шкала часто розглядається як квазі-інтервальна, що дає змогу коректно застосовувати статистичні методи аналізу, включно з обчисленням середнього, дисперсії, кореляцій та регресійних моделей. Завдяки цьому вона підвищує точність отриманих результатів і забезпечує кращу аналітичну основу для дослідження якості користувацьких інтерфейсів.

Після створення форма надсилається експертам, а їх відповіді автоматично збираються в електронну таблицю. На завершальному етапі проводиться

статистичний аналіз: розраховується середнє значення, медіана, стандартне відхилення та розмах оцінок для кожного критерію. Також може проводитися порівняльний аналіз між експертами або між різними версіями інтерфейсу. Отримані результати інтерпретуються для визначення сильних і слабких сторін інтерфейсу, а також формують основу для подальших рекомендацій щодо його удосконалення.

2.5 Формування групи експертів

Для проведення оцінки якості була залучена група з 13 експертів, яка складається з фахівців у галузі інформаційних технологій з різним рівнем досвіду використання, розроблення та оцінювання людино-машинних інтерфейсів. Переважна кількість респондентів – це чоловіки віком від 24 до 80 років, більшість з яких являється аспірантами. Майже половина експертів має високий рівень експертного досвіду з оцінювання якості людино-машинних систем, в тому числі інтерфейсів доповненої реальності. В таблиці 2.3 наведено детальні демографічні характеристики експертної групи.

Таблиця 2.3 – Демографічні характеристики експертів

Показник		Значення	%
Стать	Чоловік	11	84,62
	Жінка	2	15,38
Вік	Молодше 30	5	38,46
	Від 30 до 45	5	38,46
	Старше 45	3	23,08
Посада	Професор	4	30,77
	Доцент	1	7,695
	Аспірант	7	53,84
	Розробник (досвід 3 роки)	1	7,695
Рівень експертного досвіду з аналізу якості інтерфейсів	Низький	3	23,08
	Середній	4	30,77
	Високий	6	46,15

2.6 Результати експертного оцінювання

Результати експертної оцінки, подані на рисунку 2.3, демонструють нерівномірний розподіл показників якості інтерфейсу за низкою критеріїв. Найвищі значення отримали такі характеристики, як самоописність, навченість, функційна повнота та реактивність, які були оцінені переважно на рівні 8 балів. Це свідчить про те, що інтерфейс є інтуїтивно зрозумілим, легко освоюваним і здатним оперативно реагувати на дії користувача. Також високі значення спостерігаються для безпомилковості, помітності, реалістичності та естетичної цілісності, що вказує на загалом позитивне сприйняття візуальної й поведінкової складових системи.

Помірні оцінки (7–8 балів) отримали такі критерії, як однозначність, лаконічність, персоналізація та актуальність, що свідчить про наявність певних можливостей для їхнього вдосконалення, але без критичних зауважень експертів.

Найнижчі значення були зафіксовані для попередження про небезпеку та довговічності, які оцінено в межах 4–5 балів. Це свідчить про недостатню увагу системи до аспектів безпеки та визначених механізмів забезпечення її стабільного функціонування в довгостроковій перспективі. Дещо нижчий за середній рівень також зафіксовано для безпечності використання, що може вказувати на потребу в додаткових заходах щодо інформування користувачів або зниження потенційних ризиків.

Загалом, ЛМІ демонструє високі показники зручності та зрозумілості, але потребує подальшої оптимізації у напрямках, пов'язаних із безпекою, стабільністю та довготривалою експлуатацією.



Рисунок 2.3 – Діаграма результатів опитування

2.7 Адитивна згортки показників якості

Отримані у розділі 2.6 результати наглядно демонструють високі оцінки експертів по кожному з окремих показників. Однак кожен окремий показник якості ЛМІ може мати різну природу, одиниці вимірювання та ступінь важливості. Це ускладнює безпосереднє порівняння та формування узагальнених висновків.

Використання лише часткових показників не дозволяє отримати цілісну оцінку якості, оскільки кожен з них відображає окремий аспект функціонування системи. У практичних задачах, таких як вибір альтернативних варіантів реалізації інтерфейсу, оптимізація параметрів або підтримка прийняття рішень, необхідним є інтегрований показник якості. У зв'язку з цим виникає необхідність застосування процедури згортки показників якості, яка забезпечує приведення значень різнорідних показників до єдиного масштабу, врахування їх вагомості та формування інтегральної оцінки.

Згортка показників якості визначається як процедура агрегування множини часткових показників у єдиний інтегрований показник, що відображає загальний рівень якості досліджуваної системи.

Процес згортки включає такі основні етапи:

- 1) формування множини часткових показників якості;
- 2) нормування показників;
- 3) визначення вагових коефіцієнтів;
- 4) обчислення інтегрованого показника.

Нормування показників здійснюється з метою приведення їх до безрозмірного вигляду в інтервалі $[0;1]$. Для стимулюючих показників використовується вираз:

$$q_i = \frac{x_i - x_i^{\min}}{x_i^{\max} - x_i^{\min}}, \quad (2.11)$$

Для дестимулюючих показників використовується вираз:

$$q_i = \frac{x_i^{\max} - x_i}{x_i^{\max} - x_i^{\min}}, \quad (2.12)$$

Вагові коефіцієнти відображають відносну важливість показників і визначаються, як правило, експертним шляхом із дотриманням умови:

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1, w_i \geq 0, \quad (2.13)$$

Інтегральний показник якості визначається шляхом згортки нормованих часткових показників. У найпростішому та найбільш поширеному випадку використовується адитивна модель згортки.

$$Q = \sum_{i=1}^n w_i q_i, \quad (2.14)$$

Застосування зваженої адитивної моделі обумовлено її інтерпретованістю, простотою реалізації та можливістю врахування різної значущості окремих показників. Таким чином, згортка показників якості є ключовим елементом оцінювання людино-машинних інтерфейсів і забезпечує отримання узагальненої кількісної оцінки, придатної для практичного використання в задачах аналізу та прийняття рішень.

Розрахунок інтегрального показника якості розробленого ЛМІ здійснюється на основі адитивної згортки часткових показників. На першому етапі формується множина характеристик якості, значення яких визначаються за результатами експертного оцінювання та подаються у кількісній формі (у даному випадку — за десятибальною шкалою). Далі, за відсутності обґрунтованих відмінностей у важливості окремих характеристик, приймається припущення про їх рівнозначність, що відповідає однаковим ваговим коефіцієнтам для кожного показника.

На наступному етапі здійснюється підсумовування всіх часткових значень показників якості. Отримана сума нормується шляхом ділення на загальну кількість характеристик. Таким чином формується середнє арифметичне значення, яке інтерпретується як інтегральний показник якості.

На основі значень, отриманих із радіальної діаграми, обчислено значення інтегрованого показника для заданого набору характеристик, яке становить $Q \approx 7.2$ за десятибальною шкалою. Отриманий результат свідчить про достатньо високий рівень якості досліджуваного інтерфейсу та підтверджує його придатність до практичного використання. Водночас аналіз внеску окремих показників показав, що найбільший вплив на інтегральну оцінку мають характеристики, пов'язані з функційною повнотою, реактивністю та естетичною цілісністю, тоді як відносно нижчі значення довговічності та безпечності використання зумовлюють зниження

загального показника. Це обґрунтовує доцільність подальшого вдосконалення зазначених характеристик з метою підвищення загального рівня якості людино-машинної взаємодії.

2.8 Висновки до другого розділу

У даному розділі дисертаційної роботи вирішено наукове завдання, що полягає у розробленні теоретичних і методичних засад оцінювання якості людино-машинних інтерфейсів на основі доповненої реальності для безпілотних систем моніторингу потенційно небезпечних територій.

Отримано такі наукові результати:

1. Удосконалено теоретико-множинну модель та архітектуру системи моніторингу потенційно небезпечних територій, яка, на відміну від існуючих, враховує використання людино-машинних інтерфейсів на основі доповненої реальності для керування безпілотними літальними апаратами. Запропонована модель формалізує множини елементів, користувачів, станів і зв'язків системи, що дозволяє обґрунтовувати функціональні та нефункціональні вимоги, а також забезпечує можливість подальшого моделювання процесів функціонування системи.

2. Удосконалено метод оцінювання якості людино-машинних інтерфейсів на основі доповненої реальності, який базується на формуванні профілю вимог, використанні множини релевантних евристик, застосуванні експертного оцінювання та подальшій згортці часткових показників у інтегральний показник якості. На відміну від відомих підходів, запропонований метод враховує специфіку взаємодії оператора з доповненою реальністю та поєднує технічні, ергономічні й когнітивні характеристики інтерфейсу, що підвищує достовірність та обґрунтованість оцінювання.

Отримані результати створюють основу для подальшого розроблення моделей оцінювання готовності систем, дослідження впливу людського фактора на

ефективність функціонування безпілотних комплексів та впровадження розроблених підходів у практичні системи моніторингу.

Таким чином, результати розділу є теоретично обґрунтованими та мають прикладне значення, оскільки спрямовані на підвищення якості інтерфейсів людино-машинної взаємодії на основі доповненої реальності.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБЛЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛЕЙ ГОТОВНОСТІ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ПОТЕНЦІЙНО НЕБЕЗПЕЧНИХ ТЕРИТОРІЙ

3.1 Класифікатор моделей готовності

Для даного дисертаційного дослідження розглядаються кілька режимів роботи БСМ з урахуванням особливостей місій, діяльності операторів, відмов тощо.

Для систематизації різних режимів і відповідних моделей та спрощення розуміння було розроблено багаторівневий класифікатор сценаріїв (режимів), що охоплює технічні, людські та організаційні фактори, які впливають на загальну надійність системи (рисунок 3.1).

Перший рівень класифікатора характеризує технічний стан системи, визначаючи наявність або відсутність відмов. Система може працювати в нормальному режимі в умовах відсутності відмов або переходити в стани часткової або повної відмови при реєстрації відповідних подій. У разі комбінованих відмов розглядається сценарій переходу системи зі стану часткової відмови в стан повної відмови.

Другий рівень враховує можливість наявності помилок оператора, що виникають під час виконання місії. У разі безпомилкової роботи оператора система зберігає передбачувану поведінку, тоді як виникнення помилки спричиняє перехід до одного з підтипів порушень, таких як хибний перехід у захищений стан, помилка керування або їх комбінація.

Третій рівень класифікатора визначає наявність резервних безпілотних апаратів та можливість їх відновлення для подальшої експлуатації. Якщо резервні БПЛА/НРК є в наявності, розглядається можливість їхньої заміни до відновлення функціонування системи. У разі відсутності резервів сценарії обмежуються можливим частковим або повним відновленням використаних апаратів.

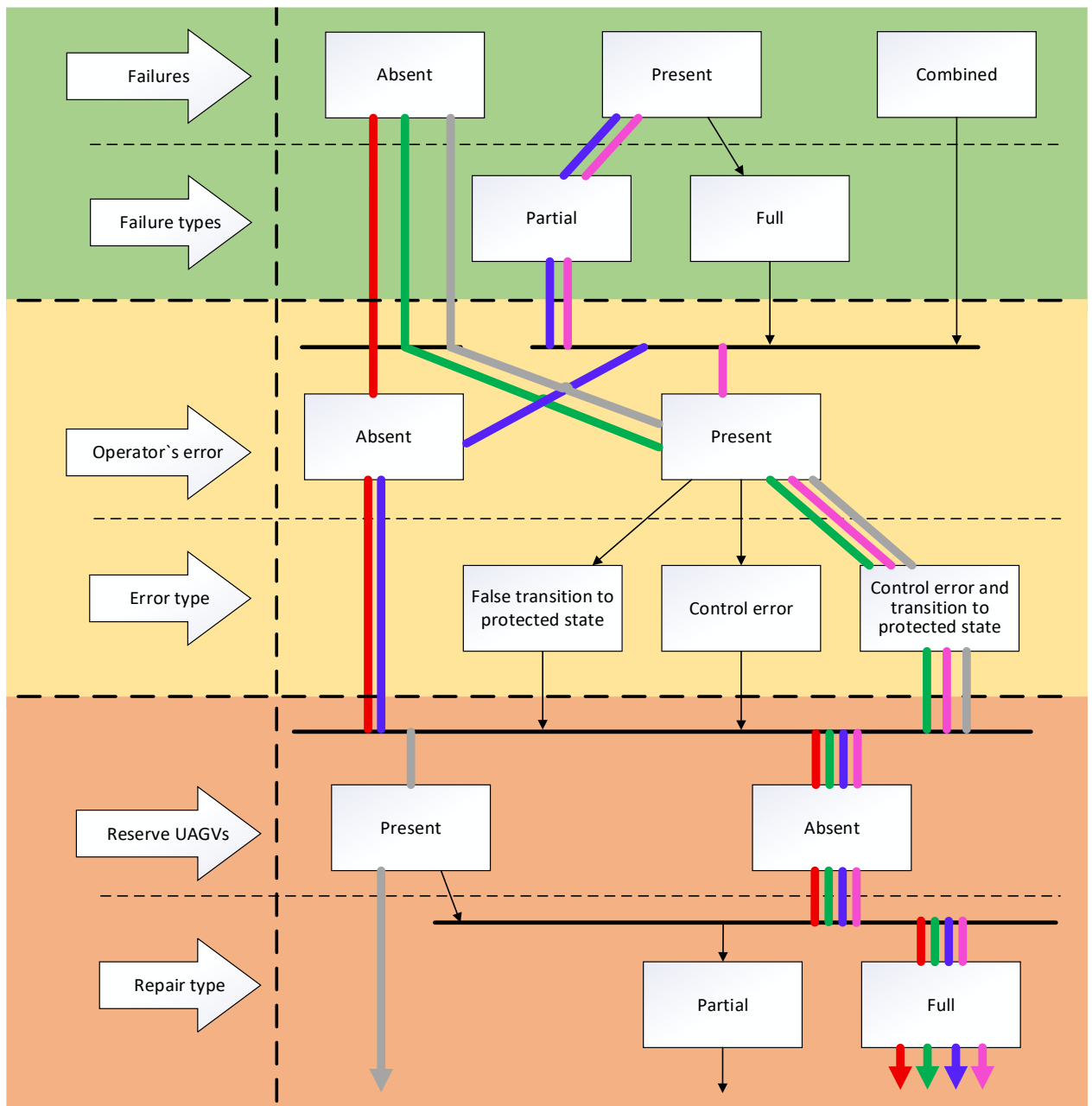


Рисунок 3.1 – Класифікатор моделей: M0 – червоний, M1 – зелений, M2 – синій, M3 – фіолетовий, M4 – сірий

На основі цієї класифікації можна створити кілька описів. У цій роботі ми розробляємо та досліджуємо п'ять моделей M0-M4. Найпростіший(базовий) сценарій M0 (червоний) розглядає випадок, коли відсутні відмови і помилки оператора, з повним відновленням у разі переходу системи в захищений стан.

Перша модель М1 (зелений) розглядає випадок з без відмов, але з помилками оператора і повним відновленням у разі переходу системи в захищений режим роботи.

Друга модель М2 (синій) розглядає випадок з урахуванням наявності відмов без помилок оператора, з повним відновленням.

Третя модель М3 (фіолетовий) з урахуванням наявності відмов і помилок оператора, з повним відновленням в разі переходу в захищений стан.

Четверта модель М4 (сірий) побудована на основі другої моделі, що описує випадок без відмов, але з помилками оператора та повним відновленням у разі переходу системи в захищений режим роботи, і являється мультифрагментною. На відміну від попередніх, в даному варіанті розглядається випадок без урахування відмов системи з можливістю допущення помилок оператором, а також наявністю резервних безпілотних апаратів.

Таким чином, запропонований класифікатор забезпечує комплексне представлення можливих станів безпілотних систем. Такий підхід дозволяє формувати формальні моделі, прогнозувати наслідки помилок та визначати оптимальні стратегії відновлення. Отримана структура є основою для побудови аналітичних та імітаційних моделей, спрямованих на підвищення готовності безпілотних комплексів.

3.2 Параметризація моделей готовності

На основі аналізу публікацій [88], [89], [90], [91] присвячених моделюванню систем з подальшою оцінкою їх надійності та доступності за допомогою марковських процесів, були обрані параметри переходу для подальшого моделювання моделей М0–М4.

Параметри переходу, що використовуються в М0, підсумовані в таблиці 3.1. Ці параметри представляють інтенсивність переходів між станами системи і визначаються в одиницях часу (год), що відповідає формулюванню марковського ланцюга з безперервним часом. Вибрані діапазони параметрів відображають

реальні умови експлуатації систем моніторингу на базі БПЛА/НРК і обрані для відображення типової динаміки автономної роботи, втручання оператора та реакції захисних систем.

Таблиця 3.1 – Параметри переходів для моделі M0

№	Перехід	Параметри переходів	Інтенсивність переходу, год		
			1	2	3
1	$S_A \rightarrow S_M$	λ_{AM}	1	0,3333	2
2	$S_A \rightarrow S_P$	λ_{AP}	2	5	20
3	$S_M \rightarrow S_A$	λ_{MA}	0,3333	0,1	0,6666
4	$S_M \rightarrow S_P$	λ_{MP}	2	5	20
5	$S_M \rightarrow HI_M$	λ_{MH}	0,0083		
6	$S_P \rightarrow S_A$	μ_{PA}	0,5	1	2
7	$HI_M \rightarrow S_M$	μ_{HMM}	0,0008	0,0028	0,0083
8	$HI_M \rightarrow S_P$	μ_{HMP}	2	5	20

Параметри переходу для M1 представлені в таблиці 3.2. Параметри, спільні для M0, зберігають свої початкові значення та діапазони, щоб забезпечити коректність порівняння моделей та дає змогу ізолювати вплив факторів, пов'язаних із діяльністю оператора.

Таблиця 3.2 – Параметри переходів для моделі M1

№	Перехід	Параметри переходів	Інтенсивність переходу, год		
			1	2	3
1	$S_A \rightarrow S_M$	λ_{AM}	1	0,3333	2
2	$S_A \rightarrow S_P$	λ_{AP}	2	5	20
3	$S_M \rightarrow S_A$	λ_{MA}	0,3333	0,1	0,6666
4	$S_M \rightarrow S_P$	λ_{MP}	2	5	20
5	$S_M \rightarrow HI_M$	λ_{MH}	0,0083		
6	$S_P \rightarrow S_A$	μ_{PA}	0,5	1	2
7	$HI_M \rightarrow S_M$	μ_{HMM}	0,0008	0,0028	0,0083
8	$HI_M \rightarrow S_P$	μ_{HMP}	2	5	20
9	$HI_M \rightarrow F_M$	λ_{HMM}	5	10	20

Кінець таблиці 3.2

10	$HI_M \rightarrow F_{MR}$	$\lambda_{HM MR}$	10	100	1000
11	$F_M \rightarrow S_M$	μ_{MM}	0,00016	0,00004	0,00008
12	$F_M \rightarrow HI_M$	μ_{MHM}	0,000128	0,00002	0,0000016
13	$F_{MR} \rightarrow S_A$	μ_{MRA}	0,5	1	2

Параметри переходів для M2 наведені в таблиці 3.3. Кожен параметр переходу характеризує інтенсивність зміни стану системи і має фізичне тлумачення, що відповідає фактичним робочим процесам системи моніторингу.

Таблиця 3.3 – Параметри переходів для моделі M2

№	Перехід	Параметри переходів	Інтенсивність переходу, год		
			1	2	3
1	$S_A \rightarrow S_M$	λ_{AM}	1	0,3333	2
2	$S_A \rightarrow S_P$	λ_{AP}	2	5	20
3	$S_A \rightarrow D_L$	λ_{AL}	10	25	100
4	$S_M \rightarrow S_A$	λ_{MA}	0,3333	0,1	0,6666
5	$S_M \rightarrow S_P$	λ_{MP}	2	5	20
6	$S_M \rightarrow HI_M$	λ_{MH}	0,0083		
7	$S_M \rightarrow S_{MP}$	λ_{MMP}	10	25	100
8	$S_P \rightarrow S_A$	μ_{PA}	0,5	1	2
9	$HI_M \rightarrow S_M$	μ_{HMM}	0,0008	0,0028	0,0083
10	$HI_M \rightarrow S_P$	μ_{HMP}	2	5	20
11	$D_L \rightarrow S_{MP}$	μ_{LMP}	1	0,3333	2
12	$D_L \rightarrow S_P$	μ_{LP}	2	5	20
13	$S_{MP} \rightarrow D_L$	λ_{MPL}	0,3333	0,1	0,6666
14	$S_{MP} \rightarrow HI_{MP}$	λ_{MPHMP}	0,0083		
15	$S_{MP} \rightarrow S_P$	λ_{MPP}	2	5	20
16	$HI_{MP} \rightarrow S_{MP}$	μ_{HMPMP}	0,0008	0,0028	0,0083
17	$HI_{MP} \rightarrow S_P$	μ_{HMPP}	2	5	20

Параметри переходу, наведені в таблиці 4, визначають інтенсивність переходу між станами M3, що одночасно враховує як технічні збої системи, так і помилки оператора, за умови повного відновлення роботи під час переходу до захищеного режиму. Значення параметрів були обрані з метою забезпечення узгодженості з

попередніми моделями та відображення реалістичної динаміки роботи системи «людина-машина» під час моніторингу небезпечних зон.

Таблиця 3.4 – Параметри переходів для моделі М3

№	Перехід	Параметри переходів	Інтенсивність переходу, год		
			1	2	3
1	$S_A \rightarrow S_M$	λ_{AM}	1	0,3333	2
2	$S_A \rightarrow S_P$	λ_{AP}	2	5	20
3	$S_A \rightarrow D_L$	λ_{AL}	10	25	100
4	$S_M \rightarrow S_A$	λ_{MA}	0,3333	0,1	0,6666
5	$S_M \rightarrow S_P$	λ_{MP}	2	5	20
6	$S_M \rightarrow HI_M$	λ_{MH}	0,0083		
7	$S_M \rightarrow S_{MP}$	λ_{MMP}	10	25	100
8	$S_P \rightarrow S_A$	μ_{PA}	0,5	1	2
9	$HI_M \rightarrow S_M$	μ_{HMM}	0,0008	0,0028	0,0083
10	$HI_M \rightarrow S_P$	μ_{HMP}	2	5	20
11	$HI_M \rightarrow F_M$	λ_{HMM}	5	10	20
12	$HI_M \rightarrow F_{MR}$	λ_{HMMR}	10	100	1000
13	$F_M \rightarrow S_M$	μ_{MM}	0,05	0,002	0,0001
14	$F_M \rightarrow HI_M$	μ_{MHM}	0,25	0,01	0,08
15	$F_{MR} \rightarrow S_A$	μ_{MRA}	0,5	1	2
16	$D_L \rightarrow S_{MP}$	μ_{LMP}	1	0,3333	2
17	$D_L \rightarrow S_P$	μ_{LP}	2	5	20
18	$S_{MP} \rightarrow D_L$	λ_{MPL}	0,3333	0,1	0,6666
19	$S_{MP} \rightarrow HI_{MP}$	λ_{MPHMP}	0,0083		
20	$S_{MP} \rightarrow S_P$	λ_{MPP}	2	5	20
21	$HI_{MP} \rightarrow S_{MP}$	μ_{HMPMP}	5	10	20
22	$HI_{MP} \rightarrow S_P$	μ_{HMPP}	2	5	20

Параметри переходу для М4 представлені в таблиці 3.5 і визначають інтенсивність переходу між станами для основних і резервних фрагментів системи. Запропоновані значення параметрів базуються на припущенні про ідентичні функціональні характеристики обох фрагментів системи, а також на збереженні узгодженості з параметрами з параметрами попередніх моделей, що дозволяє проводити коректну порівняльну оцінку результатів моделювання.

Таблиця 3.5 – Параметри переходів для моделі М4

№	Перехід	Параметри переходів	Інтенсивності переходу, год		
			1	2	3
1	$S_{A1} \rightarrow S_{M1}$	λ_{AM1}	1	0,3333	2
2	$S_{A1} \rightarrow S_{P1}$	λ_{AP1}	2	5	20
3	$S_{M1} \rightarrow S_{A1}$	λ_{MA1}	0,3333	0,1	0,6666
4	$S_{M1} \rightarrow S_{P1}$	λ_{MP1}	2	5	20
5	$S_{M1} \rightarrow HI_{M1}$	λ_{MH1}	0,0083		
6	$S_{P1} \rightarrow S_{A1}$	$\mu_{PA1}(1-P_{CW})$	$0,5*(1-P_{CW})$	$1*(1-P_{CW})$	$2*(1-P_{CW})$
7	$S_{P1} \rightarrow S_{A2}$	$\mu_{PA1}P_{CW}$	$0,5*P_{CW}$	$1*P_{CW}$	$2*(1-P_{CW})$
8	$HI_{M1} \rightarrow S_{M1}$	μ_{HMM1}	0,0008	0,0028	0,0083
9	$HI_{M1} \rightarrow S_{P1}$	μ_{HMP1}	2	5	20
10	$HI_{M1} \rightarrow F_{M1}$	λ_{HMM1}	5	10	20
11	$HI_{M1} \rightarrow F_{MR1}$	λ_{HMMR1}	10	100	1000
12	$F_{M1} \rightarrow S_{M1}$	μ_{MM1}	0,00016	0,00004	0,000008
13	$F_{M1} \rightarrow HI_{M1}$	μ_{MHM1}	0,000128	0,00002	0,0000016
14	$F_{MR1} \rightarrow S_{A1}$	$\mu_{MRA1}(1-P_{CW})$	$0,5*(1-P_{CW})$	$1*(1-P_{CW})$	$2*(1-P_{CW})$
15	$F_{MR1} \rightarrow S_{A2}$	$\mu_{MRA1}P_{CW}$	$0,5*P_{CW}$	$1*P_{CW}$	$2*(1-P_{CW})$
16	$S_{A2} \rightarrow S_{M2}$	λ_{AM2}	1	0,3333	2
17	$S_{A2} \rightarrow S_{P2}$	λ_{AP2}	2	5	20
18	$S_{M2} \rightarrow S_{A2}$	λ_{MA2}	0,3333	0,1	0,6666
19	$S_{M2} \rightarrow S_{P2}$	λ_{MP2}	2	5	20
20	$S_{M2} \rightarrow HI_{M2}$	λ_{MH2}	0,0083		
21	$S_{P2} \rightarrow S_{A2}$	$\mu_{PA2}P_{CW}$	$0,5*P_{CW}$	$1*P_{CW}$	$2*(1-P_{CW})$
22	$S_{P2} \rightarrow S_{A1}$	$\mu_{PA2}(1-P_{CW})$	$0,5*(1-P_{CW})$	$1*(1-P_{CW})$	$2*(1-P_{CW})$
23	$HI_{M2} \rightarrow S_{M2}$	μ_{HMM2}	0,0008	0,0028	0,0083
24	$HI_{M2} \rightarrow S_{P2}$	μ_{HMP2}	2	5	20
25	$HI_{M2} \rightarrow F_{M2}$	λ_{HMM2}	5	10	20
26	$HI_{M2} \rightarrow F_{MR2}$	λ_{HMMR2}	10	100	1000
27	$F_{M2} \rightarrow S_{M2}$	μ_{MM2}	0,00016	0,00004	0,000008
28	$F_{M2} \rightarrow HI_{M2}$	μ_{MHM2}	0,000128	0,00002	0,0000016
29	$F_{MR2} \rightarrow S_{A2}$	μ_{MRA2}	0,5	1	2
P_{CW}			0,5	0,7	0,9

3.3 Розроблення та дослідження моделей

3.3.1 Розроблення та дослідження однофрагментної моделі без відмов і помилок оператора, з повним відновленням

Описувана БСМ ПНТ характеризується чітко визначеним скінченим набором станів, між якими відбуваються стохастичні переходи. У будь-який момент часу система знаходиться в одному стані, і всі можливі переходи між станами можна описати відповідними інтенсивностями переходів. Імовірність переходу системи до наступного стану залежить виключно від її поточного стану, а не від послідовності попередніх переходів. Ця властивість є типовою для процесів, в яких зміни в режимах роботи викликані локальними подіями (такими як втручання оператора, помилкові дії або відмови компонентів) і відповідає фактичній логіці роботи систем моніторингу, а також визначальним властивостям марковських процесів з безперервним часом. Тому використання цієї класичної математичної моделі є доцільним і виправданим, оскільки вона дозволяє поетапно розробляти та аналізувати моделі систем моніторингу.

Найпростіший випадок передбачає сценарій без відмов і помилок оператора БПЛА/НРК, з повним відновленням, якщо система переходить у захищений режим роботи. У цьому випадку система має лише чотири можливі стани, як показано на графіку переходів цієї моделі (рисунок 3.2).

Стан системи S_A передбачає, що система знаходиться в нормальному робочому стані і керується автоматизованими засобами.

Стан системи S_M передбачає, що система знаходиться в нормальному робочому стані і керується оператором вручну.

Стан системи HI_M описує реакцію оператора на інформацію, отриману під час ручного керування системою.

Стан системи S_P передбачає, що система знаходиться в неробочому, захищеному стані. Ініціюється примусове повернення.

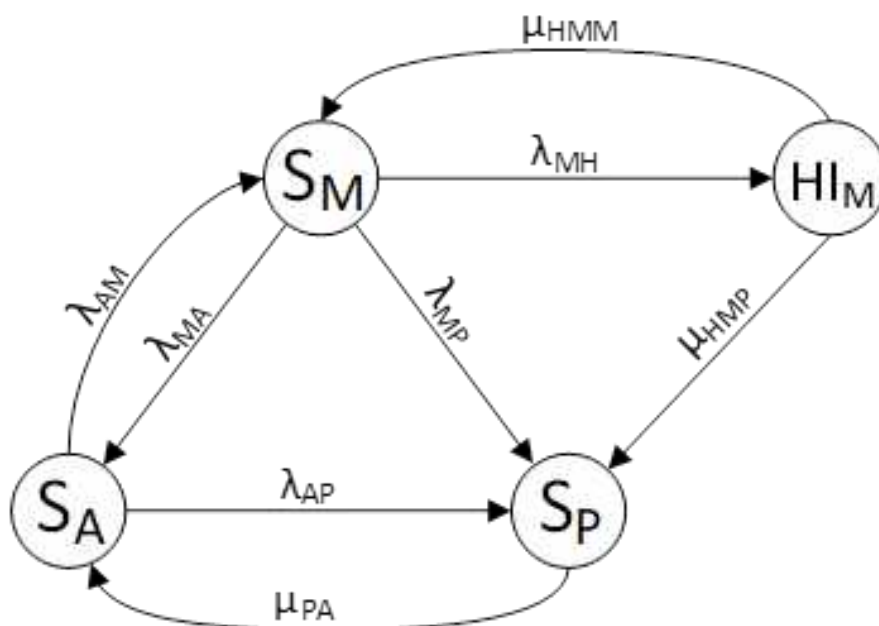


Рисунок 3.2 – Граф переходів для моделі M0

Для обчислення ймовірностей перебування системи в кожному з цих станів необхідно сформулювати та вирішити систему рівнянь (3.1). Ця система описує часову еволюцію ймовірностей станів як функцію інтенсивності переходів між станами та забезпечує формальну основу для аналізу як перехідної, так і стаціонарної поведінки системи моніторингу в режимах автономного та мануального управління.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP_A(t)}{dt} = -(\lambda_{AM} + \lambda_{AP})P_A(t) + \mu_{PA}P_P(t) + \lambda_{MA}P_M(t), \\ \frac{dP_M(t)}{dt} = -(\lambda_{MA} + \lambda_{MH} + \lambda_{MP})P_M(t) + \lambda_{AM}P_A(t) + \mu_{HMM}P_{HIM}(t), \\ \frac{dP_P(t)}{dt} = -\mu_{PA}P_P(t) + \lambda_{AP}P_A(t) + \lambda_{MP}P_M(t) + \mu_{HMP}P_{HIM}(t), \\ \frac{dP_{HIM}(t)}{dt} = -(\mu_{HMP} + \mu_{HMM})P_{HIM}(t) + \lambda_{MH}P_M(t) = 0, \\ P_A(t) + P_M(t) + P_P(t) + P_{HIM}(t) = 1, \end{array} \right. \quad (3.1)$$

де λ_{AM} – інтенсивність переходу зі стану S_A в стан S_M ;

λ_{AP} – інтенсивність переходу зі стану S_A в стан S_P ;

λ_{MA} – інтенсивність переходу зі стану S_M в стан S_A ;
 λ_{MP} – інтенсивність переходу зі стану S_M в стан S_P ;
 λ_{MH} – інтенсивність переходу зі стану S_M в стан HI_M ;
 μ_{PA} – інтенсивність переходу зі стану S_P в стан S_A ;
 μ_{HMM} – інтенсивність переходу зі стану HI_M в стан S_M ;
 μ_{HMP} – інтенсивність переходу зі стану HI_M в стан S_P ;
 P_i – вірогідність перебування системи в стані i ;
 $i \in \{A, M, P, HI_M, F_M, F_{MR}\}$.

Для $t = 0$: $P_A(0) = 1$, $P_M(0) = P_P(0) = P_{HI_M}(0) = 0$. Параметри переходу, використані в M_0 , наведені в таблиці 3.1. Ці параметри представляють інтенсивність переходів між станами системи і визначаються в одиницях часу (год), що відповідає формулюванню марковського ланцюга з безперервним часом. Вибрані діапазони параметрів відображають реалістичні умови експлуатації БСМ на базі БПЛА/НРК і обрані для відображення типової динаміки автономної роботи, втручання оператора та захисних механізмів системи.

На рисунку 3.3 представлені залежні від часу ймовірності перебування системи в кожному зі станів, отримані за допомогою моделювання марковської моделі з використанням параметрів переходу, визначених у таблиці 3.1.

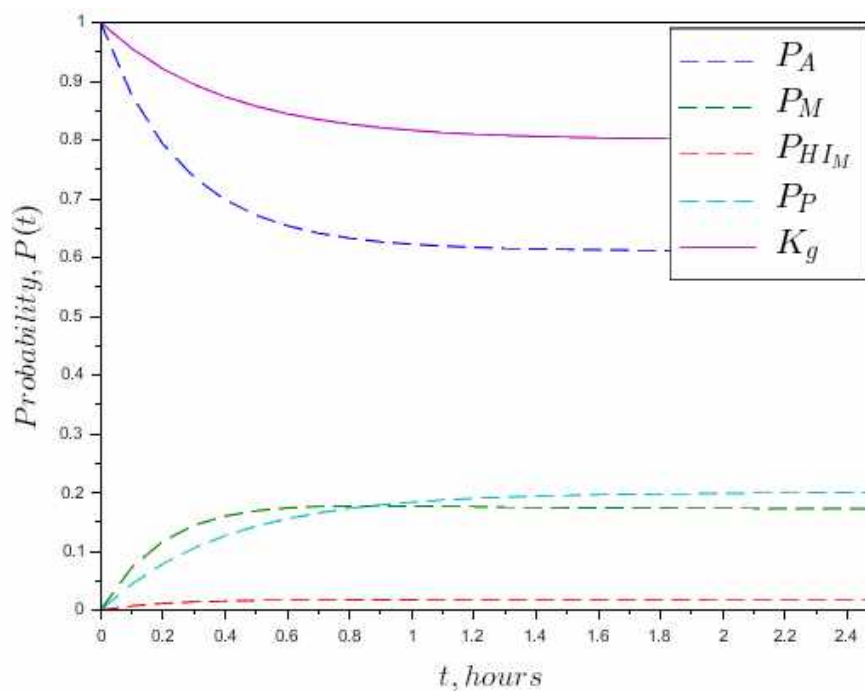


Рисунок 3.3 – Результати симуляції моделі M_0

Вибір часової шкали на рисунку 3.3 та подальші результати моделювання обумовлені необхідністю дослідження нестационарної частини поведінки та визначення меж переходу системи до стаціонарного стану, де ймовірності перебування у відповідних станах залишаються незмінними.

Аналіз графіка показує, що для заданих інтенсивностей переходу стан нормальної автономної роботи S_A залишається домінуючим протягом усього інтервалу моделювання. Це вказує на те, що за відсутності зовнішніх збурень або критичних відмов система переважно працює в автономному режимі, що є очікуваним і бажаним для систем моніторингу небезпечних зон.

Ймовірність захищеного стану S_P має обернену кореляцію з ймовірністю автономної роботи S_A : із зменшенням ймовірності автономного функціонування збільшується ймовірність переходу в захищений стан, що відображає своєчасну активацію механізмів безпеки в умовах погіршення робочих умов.

Ймовірність роботи системи в стані ручного керування S_M не перевищує $P_M \approx 0.17$ в будь-який момент часу, що підтверджує, що ручне керування виконує допоміжну роль і застосовується лише в конкретних ситуаціях, а не як основний режим роботи.

3.3.2 Розроблення та дослідження однофрагментної моделі без відмов, з помилками оператора і повним відновленням

Друга модель розглядає сценарій без відмов, але враховує помилки оператора, припускаючи повне відновлення системи після переходу в захищений режим (рисунок 3.4). На відміну від першої моделі, вона враховує фактори, пов'язані з людиною, зокрема помилки під час ручного керування, які можуть погіршити працездатність системи та запустити захисні механізми.

Для відображення цих ефектів було введено два додаткові стани: повна несправність системи через помилку оператора під час ручного керування (F_M) та несправність, за якою слідує перехід до захищеного режиму (F_{MR}).

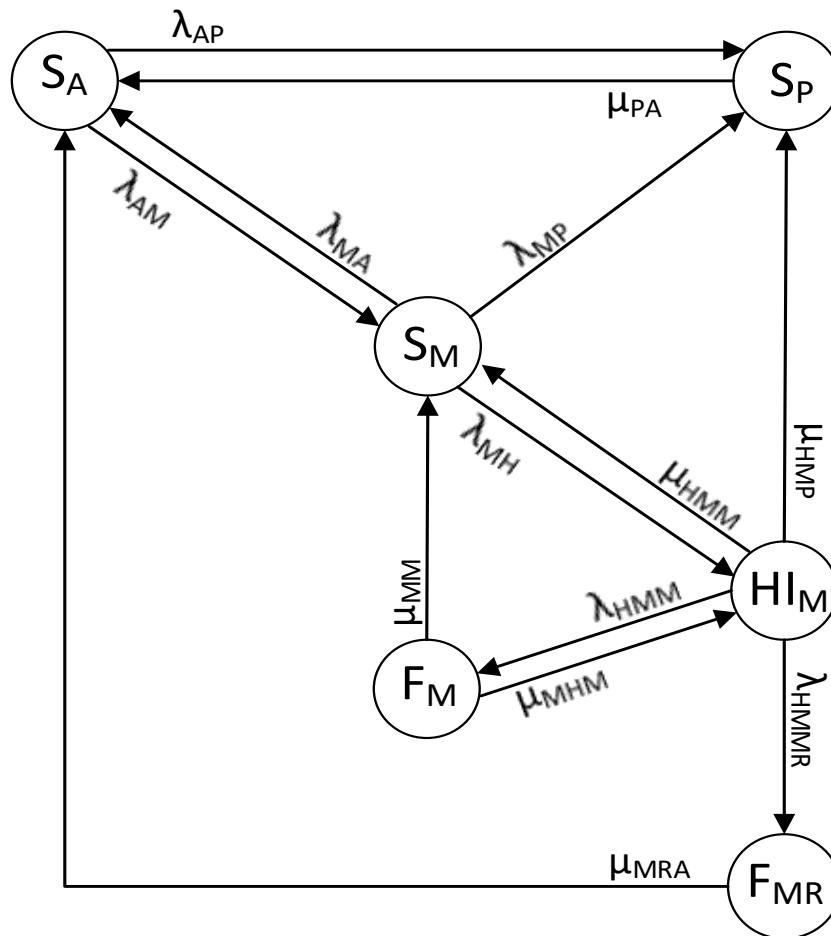


Рисунок 3.4 – Граф переходів для моделі M1

В результаті кількість можливих переходів між станами збільшилася з восьми до тринадцяти, що дозволило підвищити достовірність оцінки впливу надійності оператора на систему.

Додаткові параметри λ_{HMM} та $\lambda_{HM MR}$ характеризують інтенсивність переходів від стану реакції оператора H_{1M} до станів відмови F_M та F_{MR} відповідно. Цим параметрам присвоюються вищі значення, щоб відобразити підвищену ймовірність неправильних дій оператора в умовах стресу або критичних ситуацій.

Переходи від станів відмови (μ_{MM} , μ_{MH} , μ_{MRA}) до відновлення моделюються з порівняно низькою інтенсивністю, що відображає трудомісткість діагностики помилок, спричинених оператором, та відновлення працездатності системи. Відносно вища швидкість відновлення від захищеного стану відмови F_{MR} до автономної роботи S_A передбачає, що механізми захисту системи сприяють швидшій стабілізації та відновленню.

Вибрані діапазони параметрів дозволяють оцінити надійність системи за різних рівнів надійності оператора та надають кількісну основу для оцінки впливу людського фактору на безпеку та ефективність БСМ.

На основі результатів розрахунків, виконаних з використанням інтенсивностей переходу з першого набору параметрів, були отримані залежні від часу ймовірності перебування системи в кожному з можливих станів, які представлені на рисунку 3.5. Ці ймовірності характеризують динамічну поведінку системи в умовах, що явно враховують помилки, пов'язані з оператором.

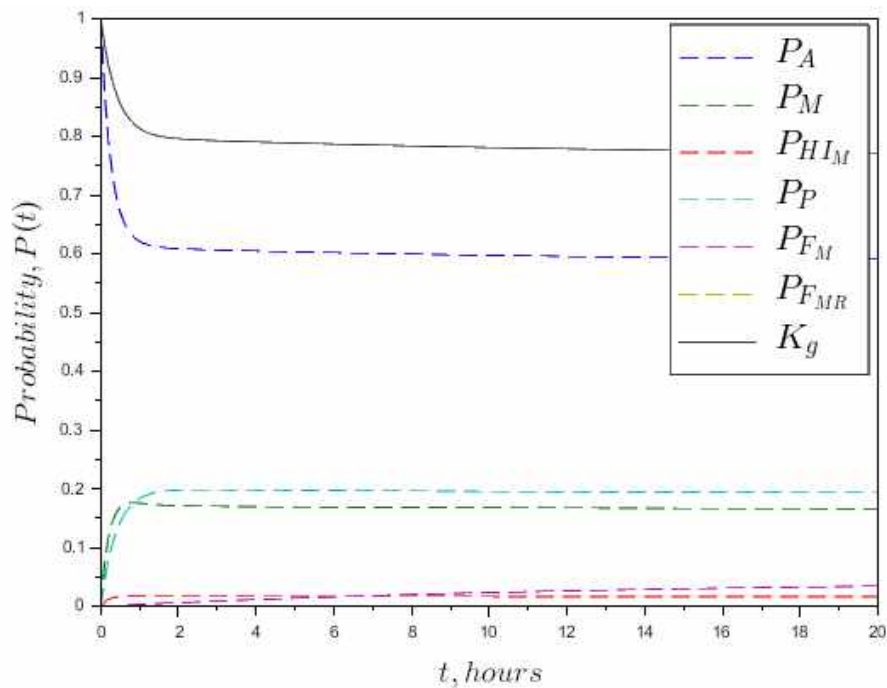


Рисунок 3.5 – Результати симуляції моделі M1

У порівнянні з результатами моделювання M0 (рисунок 3.3), ймовірність роботи системи в нормальному автономному стані S_A зменшується приблизно на 0.03. Незважаючи на це, S_A залишається домінуючим і найбільш ймовірним режимом роботи протягом усього інтервалу моделювання, що свідчить про достатню надійність механізмів автономного управління навіть за наявності помилок, спричинених людиною.

Ймовірності перебування системи у захищеному стані S_P і нормальному стані ручного керування S_M також дещо зменшуються, однак ці зміни є незначними і не

впливають якісно на загальну поведінку системи. Це свідчить про те, що включення помилок оператора в основному перерозподіляє імовірності між станами, пов'язаними з відмовами, а не впливає істотно на основні режими роботи.

Важливо, що ймовірність стану реакції оператора Π_M залишається незмінною порівняно з базовою моделлю, що свідчить про те, що частота реакції оператора не залежить від введення людських помилок. Натомість наслідки дій оператора стають більш критичними.

Важливим результатом M1 є поява значної ймовірності непрацездатності системи через помилку оператора під час ручного керування F_M . Хоча ця ймовірність не перевищує $P_{FM} \approx 0.05$, вона значно вища за ймовірність стану реакції оператора Π_M , що підкреслює підвищений ризик, пов'язаний з ручним втручанням. На відміну від цього, ймовірність несправності з подальшим переходом до захищеного стану F_{MR} залишається надзвичайно низькою і може бути знехтувана в межах розглянутого часового горизонту.

В цілому, результати демонструють, що врахування помилок оператора підвищує реалістичність, виявляючи приховані ризики ручного управління, зберігаючи при цьому домінування автономних режимів роботи.

3.3.3 Розроблення та дослідження однофрагментної моделі без помилок оператора, з відмовами і повним відновленням

Третій випадок розглядає марковську модель функціонування системи, яка враховує наявність відмов за відсутності помилок оператора і передбачає можливість повного відновлення функціональності системи. Такий підхід дозволяє окремо проаналізувати вплив апаратних і програмних відмов на динаміку стану системи без додаткових ускладнень, пов'язаних з людським фактором.

На графіку переходів (рисунок 3.6) стани F_M і F_{MR} відсутні, оскільки цей сценарій не передбачає помилок оператора під час ручного керування. Натомість до моделі введено низку нових станів, що відображають специфіку часткових відмов та реакцію системи й оператора на них. Зокрема, розглядаються такі стани: стан

ручного керування системою з частковою відмовою S_{MP} , стан реакції оператора на зміни в системі з частковою відмовою HI_{MP} та стан часткової працездатності системи в наслідок часткової відмови D_L .

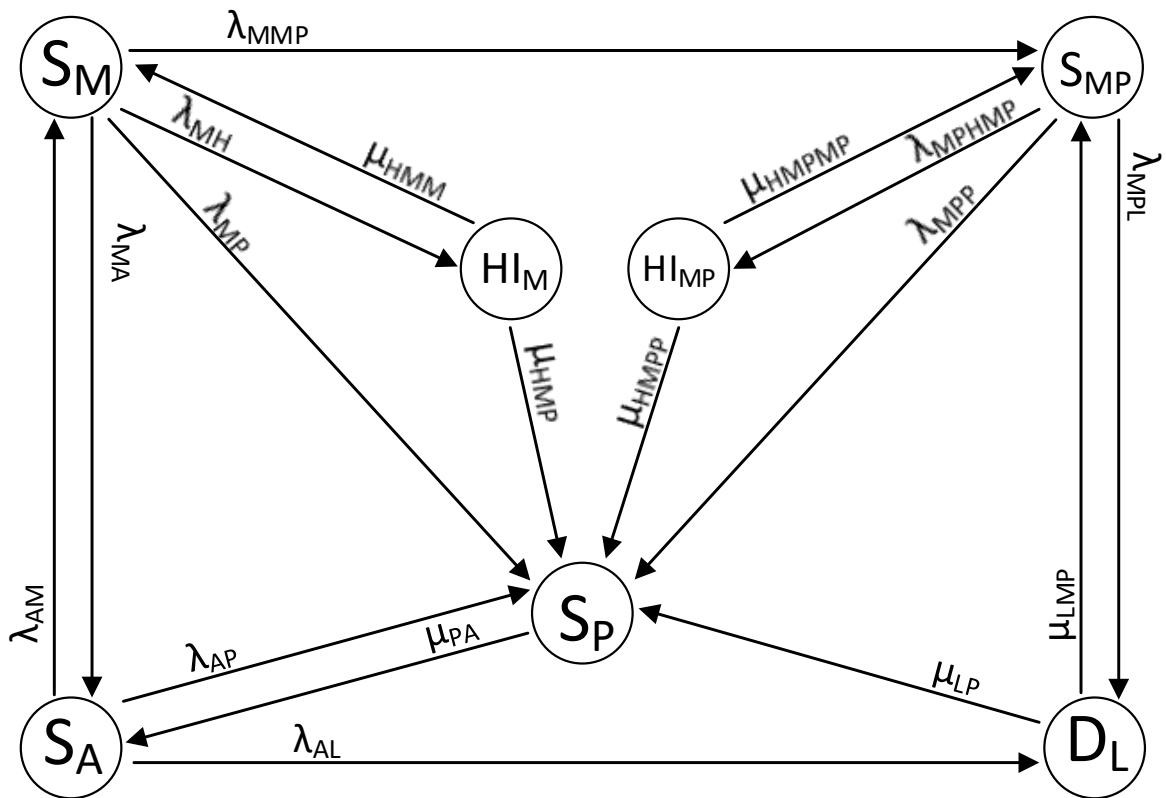


Рисунок 3.6 – Граф переходів для моделі M2

Введення цих станів дозволяє деталізувати опис режими роботи системи в умовах погіршення характеристик, що є характерними для реальних операцій БПЛА/НРК в складних і динамічних середовищах, а також оцінити вплив часткових відмов на імовірнісні характеристики системи.

Переходи від автономної роботи S_A до ручного керування S_M , захищеного режиму S_P та часткової відмови D_L регулюються параметрами λ_{AM} , λ_{AP} та λ_{AL} відповідно, причому підвищені значення λ_{AL} відображають ймовірність часткових технічних відмов у складних умовах.

Переходи від ручного керування S_M описують поведінку системи під час активного втручання оператора, де λ_{MMP} характеризує ризик переходу до ручного

керування з частковою відмовою S_{MP} , тоді як λ_{MH} залишається низьким, припускаючи стабільну поведінку оператора.

Параметри відновлення (μ_{PA} , μ_{HMM} , μ_{HMP} , μ_{LMP} , μ_{LP}) відображають здатність системи відновлювати робочу здатність після відмов або втручань.

Особлива увага приділяється станам часткової відмови D_L та S_{MP} , взаємні переходи яких моделюють циклічні процеси погіршення та відновлення. Стан реакції оператора на часткові відмови H_{MP} має надзвичайно низьку інтенсивність переходів, що вказує на обмежений вплив оператора під час технічного погіршення.

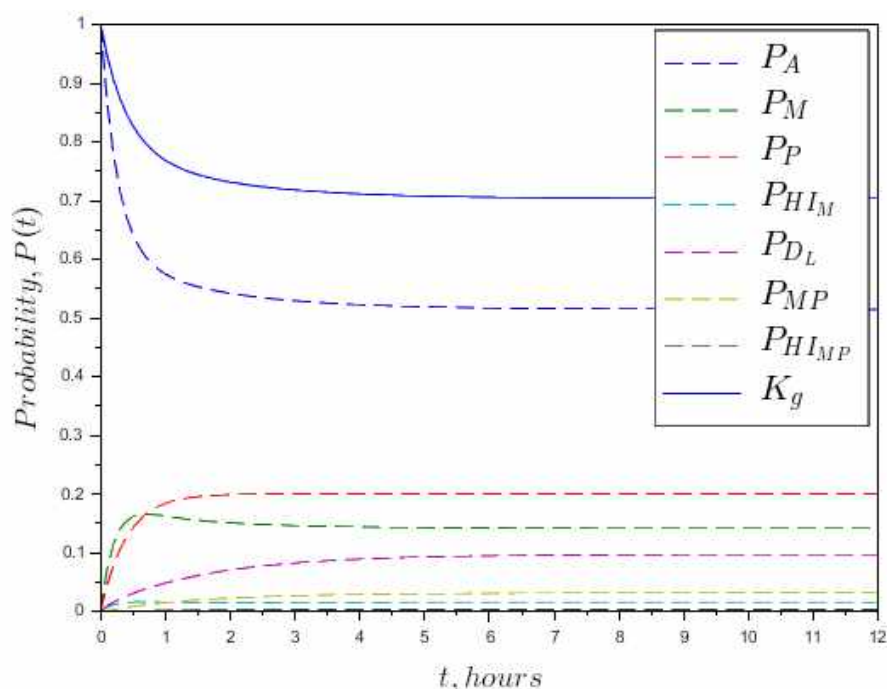


Рисунок 3.7 – Результати симуляції моделі M2

Діапазони параметрів визначені для трьох наборів інтенсивності для підтримки аналізу чутливості. Результати моделювання для першого набору параметрів показують, що автономна робота S_A залишається домінуючою, що підтверджує високий рівень автономності системи навіть за наявності часткових відмов.

Імовірність стану реакції оператора H_M залишається майже незмінною порівняно з попередніми моделями, що свідчить про стабільні характеристики реакції оператора за відсутності помилкових дій. Водночас спостерігається

збільшення ймовірності захищеного стану S_p і незначне зменшення ймовірності стану ручного керування S_M , що можна пояснити більшою кількістю сценаріїв відмов, які спричиняють автоматичний перехід до захищеного режиму з метою збереження цілісності системи.

Імовірність стану ручного керування з частковою відмовою S_{MP} є відносно низькою, але майже вдвічі вищою за імовірність стану реакції оператора НІМ, що вказує на підвищений ризик погіршення продуктивності під час ручного керування в умовах часткової відмови навіть без помилок оператора. Імовірність стану реакції оператора на часткові відмови $НІ_{MP}$ є надзвичайно низькою і може бути знехтувана в рамках цього аналізу.

Значна ймовірність пов'язана з частково робочим станом D_L , яка досягає приблизно $D_L \approx 0.1$. Хоча ця ймовірність не залежить безпосередньо від втручання оператора, вона корелює зі зменшенням ймовірностей автономної роботи S_A і ручного управління S_M , а також зі збільшенням ймовірності перебування в стані S_{MP} . Це вказує на те, що технічна деградація сама по собі може призвести до часткових відмов і зниження загальної ефективності системи, навіть за відсутності помилок оператора.

3.3.4 Розроблення та дослідження однофрагментної моделі з відмовами і помилками оператора та повним відновленням

Цей варіант враховує марковську модель функціонування системи, яка одночасно враховує наявність відмов і помилок оператора, а також забезпечує повне відновлення функціональності системи в разі переходу в захищений режим роботи. Такий підхід дозволяє моделі наблизитися до реальних умов експлуатації систем моніторингу небезпечних зон, де технічні несправності і людський фактор можуть виникати одночасно і взаємно впливати на загальну динаміку системи.

У графі переходу (рисунок 3.8) ця модель поєднує властивості $M1$ і $M2$, включаючи всі відповідні стани, пов'язані з автономною та ручною роботою

системи, захищеним режимом, реакцією оператора, помилками оператора, а також повними та частковими відмовами. Таким чином, модель охоплює як стани нефункціональності, спричинені помилками оператора (F_M , F_{MR}), так і стани, пов'язані з частковими технічними відмовами системи (D_L , S_{MP} , HI_{MP}), що дозручність використанняляє всебічно описати процеси погіршення та відновлення функціональних можливостей системи.

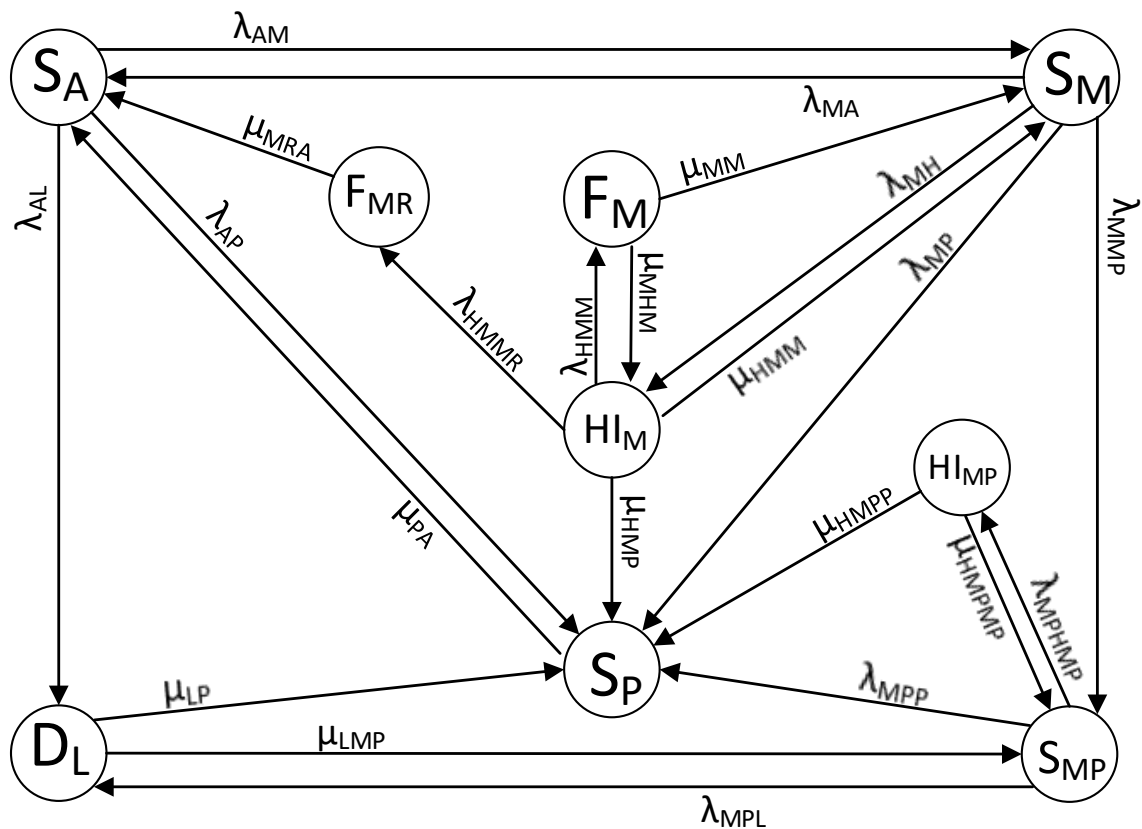


Рисунок 3.8 – Граф переходів для моделі МЗ

Інтеграція цих визначених станів і переходів дозволяє аналізувати складні операційні сценарії, зокрема ситуації, в яких помилки оператора можуть призвести до відмов системи, або, навпаки, в яких технічні несправності вимагають втручання оператора, що збільшує ризик помилкових дій. Повне відновлення функціональності системи після переходу в захищений стан моделюється як ключовий механізм підвищення загальної надійності та безпеки роботи системи.

На основі значень параметрів з першого набору переходів було проведено моделювання з урахуванням наявності відмов і помилок оператора, з повним відновленням у разі переходу в захищений стан (рисунок 3.9).

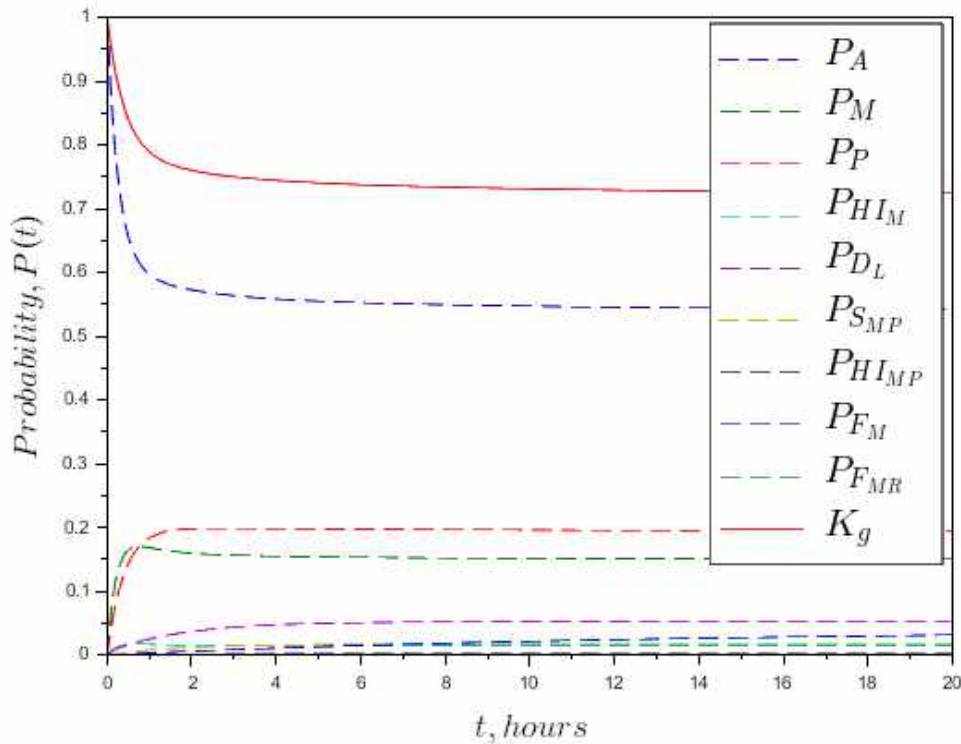


Рисунок 3.9 – Результати симуляції моделі МЗ

Як і в усіх попередніх модельних сценаріях, домінуючим станом є нормальна автономна робота S_A , що підтверджує стабільне автономне функціонування навіть у разі відмов або помилок оператора. Швидкий перехід ймовірності стану S_A до стаціонарного значення вказує на загальну стабільність системи.

Стан реакції оператора HI_M залишається низьким і постійним, що свідчить про обмежений вплив в некритичних умовах. Водночас стабільні ймовірності захищеного стану S_P і стану ручного керування S_M відображають необхідність втручання оператора для усунення несправностей або невизначених умов, що зменшує ймовірність перебування системи в повністю автономному стані.

Ручне керування з частковою несправністю S_{MP} залишається низьким, але постійно вищим за HI_M , що вказує на підвищені ризики під час ручного керування через когнітивне навантаження або складність прийняття рішень. Ймовірності

реакції оператора на часткові відмови HI_{MP} та остаточні відмови (F_M , F_{MP}) є незначними, що підтверджує ефективність захисних механізмів.

Погіршення роботи через часткову відмову D_L стабілізується на рівні близько 0.05 з чіткою кореляцією: із зменшенням S_A , S_M та S_{MP} збільшуються, що свідчить про те, що більша складність системи або залучення оператора підвищують ризики часткових відмов та зменшують автономну продуктивність.

3.3.5 Розроблення та дослідження мультифрагментної моделі без відмов та з помилками оператора і повним відновленням

На основі M1, що описує роботу системи за відсутності відмов, але враховує можливі помилки оператора та повне відновлення функціональності при переході системи в захищений режим роботи, було розроблено мультифрагментну модель системи. Запропонований підхід дозволяє розділити робочий процес на взаємопов'язані фрагменти, що відображають основні та резервні схеми управління безпілотними системами, як описано, наприклад, у дослідженні [92].

На відміну від попередніх однофрагментних моделей, у яких система розглядається без урахування додаткових сценаріїв функціонування, запропонована версія моделі орієнтована на інший підхід до опису її поведінки. Зокрема, у ній не враховуються відмови апаратних чи програмних компонентів системи, що дозволяє зосередитися на аналізі впливу людського фактора. Водночас допускається можливість виникнення помилок оператора, які можуть проявлятися під час ручного або напівавтономного режиму управління безпілотними апаратами.

Додатково модель передбачає наявність резервних безпілотних апаратів, які можуть бути оперативно залучені у випадках відсутності можливості виконання завдань або виникнення помилкових дій з боку оператора в межах основного функціонального фрагмента. Така організація роботи системи відображає принципи резервування та дублювання, що широко застосовуються у практичних реалізаціях.

Запропонований підхід дозволяє більш адекватно відтворювати реальні умови експлуатації систем моніторингу, в яких технічна надмірність виступає одним із ключових інструментів забезпечення високого рівня надійності, безперервності функціонування та відмовостійкості всієї системи в цілому.

Графік переходів М4, що ілюструє взаємодію між основним і резервним фрагментами системи, а також можливі переходи між їхніми станами, наведено на рисунок 3.10.

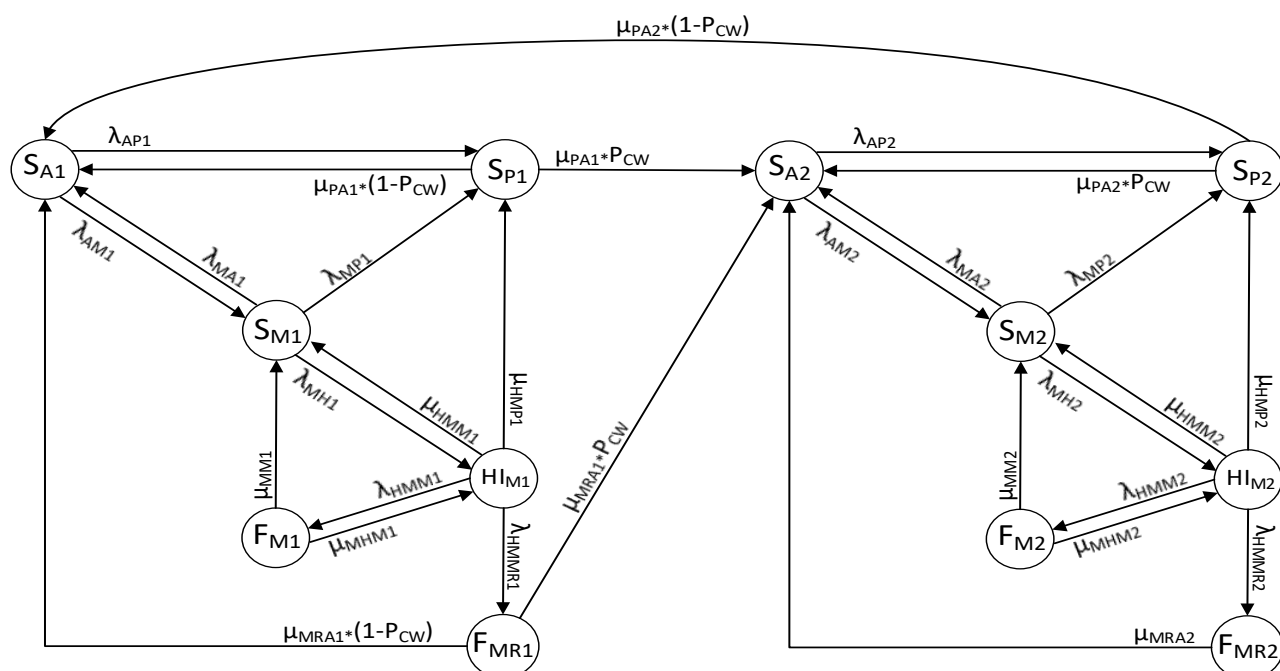


Рисунок 3.10 – Граф переходів для моделі М4

Рівняння для двофрагментної моделі представлено у формулі 3.2, яка описує систему диференціальних рівнянь Колмогорова для ймовірностей перебування системи в кожному з можливих станів з урахуванням взаємодії двох взаємопов'язаних фрагментів моделі. Початкові умови аналогічні формулі 3.1.

$$\begin{cases}
\frac{dP_{A1}(t)}{dt} = -(\lambda_{AM1} + \lambda_{AP1})P_{A1}(t) + \mu_{PA1}(1-P_{CW})P_{P1}(t) + \lambda_{MA1}P_{M1}(t) + \mu_{MRA1}(1-P_{CW})P_{FMR1}(t) + \mu_{PA2}(1-P_{CW})P_{P2}(t) \\
\frac{dP_{M1}(t)}{dt} = -(\lambda_{MA1} + \lambda_{MP1} + \lambda_{MH1})P_{M1}(t) + \lambda_{AM1}P_{A1}(t) + \mu_{HMM1}P_{HMM1}(t) + \mu_{MM1}P_{FM1}(t) \\
\frac{dP_{P1}(t)}{dt} = -(\mu_{PA1}(1-P_{CW}) + \mu_{PA1}P_{CW})P_{P1}(t) + \lambda_{AP1}P_{A1}(t) + \lambda_{MP1}P_{M1}(t) + \mu_{HMP1}P_{HIM1}(t) \\
\frac{dP_{HIM1}(t)}{dt} = -(\mu_{HMM1} + \mu_{HMP1} + \lambda_{HMM1} + \lambda_{HMMR1})P_{HIM1}(t) + \lambda_{MH1}P_{M1}(t) + \mu_{MHM1}P_{FM1}(t) \\
\frac{dP_{FM1}(t)}{dt} = -(\mu_{MM1} + \mu_{MHM1})P_{FM1}(t) + \lambda_{HMM1}P_{HIM1}(t) \\
\frac{dP_{FMR1}(t)}{dt} = -(\mu_{MRA1}(1-P_{CW}) + \mu_{MRA1}P_{CW})P_{FMR1}(t) + \lambda_{HMMR1}P_{HIM1}(t) \\
\frac{dP_{A2}(t)}{dt} = -(\lambda_{AM2} + \lambda_{AP2})P_{A2}(t) + \mu_{PA2}P_{CW}P_{P1}(t) + \mu_{PA2}P_{P2}(t) + \lambda_{MA2}P_{M2}(t) + \mu_{MRA2}P_{FMR2}(t) + \mu_{MRA1}P_{CW}P_{FMR1}(t) \\
\frac{dP_{M2}(t)}{dt} = -(\lambda_{MA2} + \lambda_{MP2} + \lambda_{MH2})P_{M2}(t) + \lambda_{AM2}P_{A2}(t) + \mu_{HMM2}P_{HMM2}(t) + \mu_{MM2}P_{FM2}(t) \\
\frac{dP_{P2}(t)}{dt} = -(\mu_{PA2}P_{CW} + \mu_{PA2}(1-P_{CW}))P_{P2}(t) + \lambda_{AP2}P_{A2}(t) + \lambda_{MP2}P_{M2}(t) + \mu_{HMP2}P_{HIM2}(t) \\
\frac{dP_{HIM2}(t)}{dt} = -(\mu_{HMM2} + \mu_{HMP2} + \lambda_{HMM2} + \lambda_{HMMR2})P_{HIM2}(t) + \lambda_{MH2}P_{M2}(t) + \mu_{MHM2}P_{FM2}(t) \\
\frac{dP_{FM2}(t)}{dt} = -(\mu_{MM2} + \mu_{MHM2})P_{FM2}(t) + \lambda_{HMM2}P_{HIM2}(t) \\
\frac{dP_{FMR2}(t)}{dt} = -\mu_{MRA2}P_{FMR2}(t) + \lambda_{HMMR2}P_{HIM2}(t) \\
P_{A1}(t) + P_{M1}(t) + P_{P1}(t) + P_{HIM1}(t) + P_{FM1}(t) + P_{FMR1}(t) + P_{A2}(t) + P_{M2}(t) + P_{P2}(t) + P_{HIM2}(t) + P_{FM2}(t) + P_{FMR2}(t) = 1
\end{cases} \quad (3.2)$$

де λ_{AMi} – перехід зі стану S_{Ai} в стан S_{Mi} ;

λ_{APi} – інтенсивність переходу зі стану S_{Ai} в стан S_{Pi} ;

λ_{MAi} – інтенсивність переходу S_{Mi} в стан S_{Ai} ;

λ_{MPi} – інтенсивність переходу S_{Mi} в стан S_{Pi} ;

λ_{MH1} – інтенсивність переходу S_{M1} в стан HI_{M1} ;

μ_{PAi} – інтенсивність переходу S_{Pi} в стан S_{Ai} ;

μ_{HMMi} – інтенсивність переходу HI_{Mi} в стан S_{Mi} ;

μ_{HMPi} – інтенсивність переходу HI_{Mi} в стан S_{Pi} ;

λ_{HMMi} – інтенсивність переходу HI_{Mi} в стан F_{Mi} ;

λ_{HMMRi} – інтенсивність переходу HI_{Mi} в стан F_{MRi} ;

μ_{MMi} – інтенсивність переходу F_{Mi} в стан S_{Mi} ;

μ_{MLMI} – інтенсивність переходу F_{M1} в стан HI_{M1} ;

μ_{MRAi} – інтенсивність переходу F_{MRi} в стан S_{Ai} ;

P_{CW} – вірогідність вдалого переключення на резервний фрагмент;

P_{ji} – вірогідність знаходження системи в стані j ;

$j \in \{A, M, P, HI_M, F_M, F_{MR}\}$, $i \in \{1, 2\}$.

На рисунку 3.11 представлені результати моделювання M4, що ілюструють часову еволюцію ймовірностей станів і дозволяють аналізувати ефективність надмірності, вплив оператора та стабільність системи в режимі стаціонарного стану.

Основною особливістю мультифрагментної моделі є введення параметра P_{CW} (ймовірність правильного перемикання), який відображає ймовірність успішного переходу до резервного фрагмента під час відновлення з захищеного стану або після станів відмови F_{MRi} . Значення P_{CW} варіюється від 0,5 до 0,9, відображаючи різну ефективність управління надмірністю та механізмів автоматичного відновлення.

Переходи, такі як $S_{P1} \rightarrow S_{A1} / S_{A2}$, $F_{MR1} \rightarrow S_{A1} / S_{A2}$, та їхні відповідники для другого фрагмента зважуються коефіцієнтом P_{CW} , тим самим моделюючи ймовірнісний розподіл між операцією відновлення поточного фрагмента та активацією резерву. Частка $(1 - P_{CW})$ відповідає відновленню основного фрагмента, тоді як P_{CW} представляє успішне переключення на резерв.

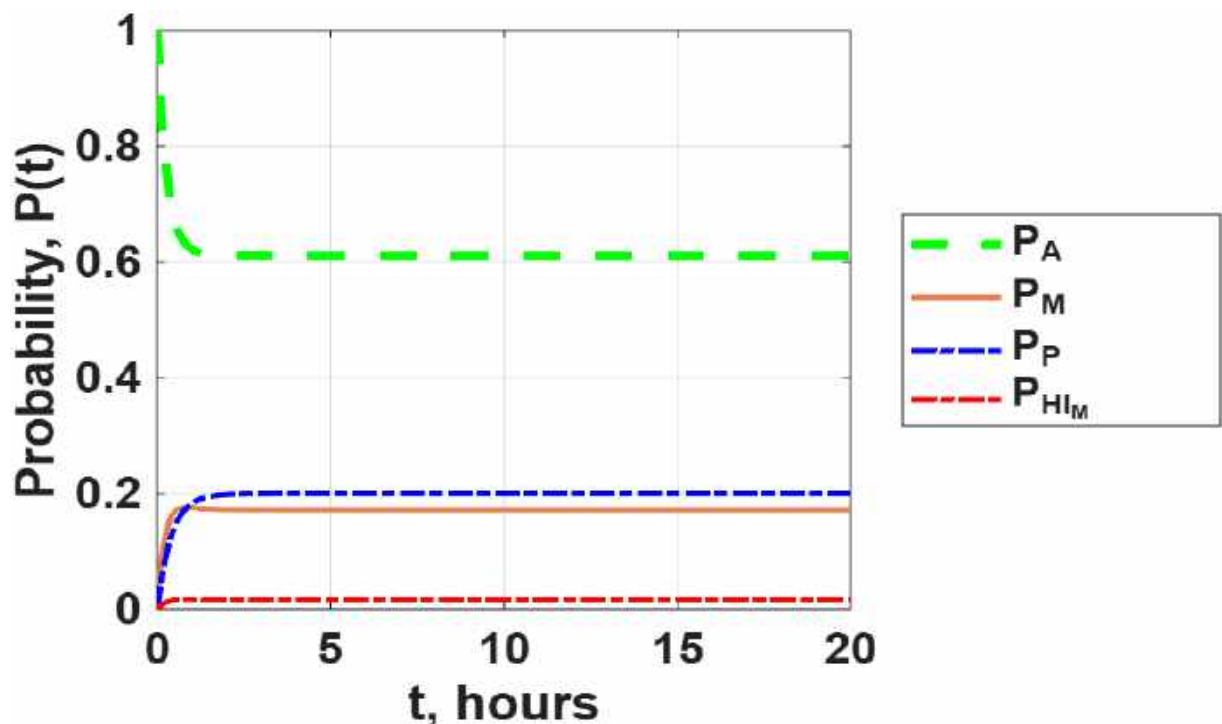


Рисунок 3.11 – Результати симуляції моделі M4

Параметри переходу від станів реакції оператора HI_{Mi} до станів відмови F_{Mi} і F_{MRi} характеризують ймовірність помилок, спричинених оператором під час ручного керування, і успадковані від попередніх моделей, що відображає підвищений ризик критичних помилок. Низькі інтенсивності зручність використання протного переходу вказують на повільне відновлення та тривале перебування в станах, пов'язаних з відмовою. Ідентичні параметри в обох фрагментах усувають асиметрію підсистеми, що дозволяє зосередити аналіз на впливі надмірності на надійність та пом'якшення людського фактора.

У порівнянні з однофрагментною моделлю, M4 демонструє збільшення приблизно на 0,05 ймовірності нормальної автономної роботи S_A , яка залишається домінуючим станом системи, що вказує на поліпшення експлуатаційної стабільності за наявності впливу оператора. Ймовірності захищеного стану S_P і стану ручного керування S_M також дещо збільшуються, не впливаючи істотно на загальний розподіл станів. Стан реакції оператора HI_M залишається на рівні, подібному до попередніх моделей, що вказує на мінімальний вплив мультифрагментної структури на динаміку оператора.

Ймовірність непрацездатності системи через помилку оператора під час ручного керування S_{FM} залишається майже незмінною і не перевищує 0.05 після стабілізації. Її вища величина порівняно з HI_M свідчить про те, що дії оператора частіше призводять до помилок, ніж до успішної компенсації збурень. Ймовірність переходу до захищеного непрацездатного стану F_{MR} є незначною і може бути виключена з подальшого аналізу. В цілому, результати підтверджують придатність M4 для аналізу впливу людського фактора на надійність і стабільність системи.

3.4 Оцінка результатів симуляції моделей готовності

Отримані результати показують, що ймовірність перебування системи в захищеному стані безпосередньо визначається режимом управління – автоматичним або ручним. Аналіз ймовірностей стану, що залежать від часу, виявляє короткий перехідний процес, після якого система досягає стаціонарного

режиму, причому найбільш інтенсивний перерозподіл ймовірностей відбувається на початковому етапі роботи.

Протягом усього моделювання нормальний автономний режим роботи S_A залишається домінуючим станом: його ймовірність зменшується від початкового значення, але стабілізується на найвищому рівні, що підтверджує високу автономну стабільність. Спостерігається обернена залежність між S_A і захищеним станом S_P , де зменшення автономності призводить до збільшення ймовірності захищеного стану, що вказує на адекватну реакцію системи.

Ймовірність стану ручного керування S_M збільшується на початку моделювання, потім стабілізується і не перевищує 0.17, що демонструє допоміжну роль ручного керування. Водночас ймовірність стану ручного керування з частковою відмовою S_{MP} залишається низькою, але перевищує ймовірність стану реакції оператора H_M , що вказує на підвищений ризик часткових відмов під час ручного керування.

Ймовірність реакції оператора на часткові відмови H_{MP} , а також на аварійні стани F_M і F_{MP} , є надзвичайно малою і має незначний вплив на загальну динаміку системи. Натомість ймовірність часткової відмови D_L є помітною і стабілізується на рівні приблизно 0.05, не виявляючи прямої залежності від негайного втручання оператора.

Ймовірність реакції оператора H_M залишається постійною протягом часу, що вказує на те, що реакції оператора не мають істотного впливу на поведінку системи в стаціонарному режимі. Нарешті, автоматичне управління зменшує ймовірність переходу до захищеного стану порівняно з ручним управлінням, що відображає вплив людського фактора. Ймовірність переходу до непрацездатних станів через помилки оператора залишається низькою за розглянутих умов.

Межі застосовності запропонованих моделей визначаються типами БПЛА, їхніми завданнями та характеристиками кіберфізичного середовища, за умови, що ці фактори не порушують сформульовані припущення в мірі, яка б істотно вплинула на точність результатів. Якщо такий вплив стає критичним, необхідно застосовувати напівмарковські моделі або моделювання на основі симуляції.

Вплив небезпечних середовищ можна врахувати за допомогою відповідних коефіцієнтів, які збільшують частоту відмов або ймовірність переривання місій. У даній роботі детально не розглядаються сценарії таких впливів, включаючи кібератаки, які можуть бути предметом подальших досліджень.

Надійність запропонованих моделей підтверджується їх теоретичною узгодженістю з властивостями марковських процесів, включаючи нормалізацію ймовірностей та невід'ємність інтенсивностей переходів. Додаткову валідацію забезпечує узгодженість отриманих результатів із відомими граничними випадками та тенденціями, про які повідомляється у відповідних дослідженнях з моделювання надійності та доступності на основі Маркова. Крім того, чисельний аналіз стабільності та чутливості демонструє, що помірні зміни параметрів переходу не призводять до якісних змін у поведінці системи, що підтверджує надійність запропонованого підходу.

3.5 Перевірка марковських моделей готовності

Марковські моделі широко застосовуються для опису стохастичних процесів у різних предметних областях. Важливим етапом їх дослідження є аналіз чутливості та валідація, які дозволяють оцінити вплив параметрів моделі на її вихідні характеристики, перевірити адекватність отриманих результатів і обґрунтувати можливість практичного застосування моделі.

Аналіз чутливості полягає у дослідженні залежності вихідних характеристик моделі від варіації її параметрів. У якості таких характеристик розглядаються ймовірності перебування системи у станах $P_i(t)$, їх стаціонарні значення π_i , а також інтегральні показники, зокрема готовність системи.

Аналіз чутливості дозволяє також здійснити порівняння альтернативних моделей шляхом оцінювання того, як зміни параметрів впливають на результати моделювання в кожній з них.

Валідація марковських моделей спрямована на підтвердження їх адекватності реальним процесам або очікуваній поведінці системи. Окрім аналізу чутливості, можуть застосовуватися такі методи:

- перевірка структурної узгодженості моделі;
- аналіз стаціонарного розподілу;
- перевірка граничних випадків;
- порівняння з імітаційними моделями;
- порівняння з експериментальними або емпіричними даними;
- порівняння з відомими теоретичними результатами.

Аналіз чутливості може розглядатися як один із ключових інструментів валідації. Адекватність моделі підтверджується у випадку, якщо зміни параметрів призводять до логічно обґрунтованих і передбачуваних змін у вихідних характеристиках.

Застосування комплексу методів валідації, включаючи аналіз чутливості, перевірку граничних випадків, порівняння з імітаційними та експериментальними даними, дозволяє забезпечити достовірність та адекватність марковських моделей. Це створює підґрунтя для їх використання у задачах аналізу, прогнозування та підтримки прийняття рішень.

3.6 Висновок до третього розділу

У розділі вирішено наукове завдання, пов'язане з розробленням методу оцінювання готовності систем моніторингу потенційно небезпечних територій з інтерфейсами людино-машинної взаємодії на основі доповненої реальності.

Вперше запропоновано метод оцінювання готовності систем моніторингу, який, на відміну від існуючих, базується на використанні одно- та багатофрагментних марковських моделей, що дозволяють враховувати не лише динаміку переходів між станами системи, але й характеристики діяльності оператора, зокрема його реактивність та безпомилковість дій.

Запропонований підхід забезпечує можливість детального моделювання процесів функціонування системи за рахунок використання багатофрагментних моделей, які дозволяють відобразити додаткові стани, пов'язані з особливостями людино-машинної взаємодії в умовах застосування доповненої реальності. Це сприяє підвищенню точності оцінювання показників готовності та розширює можливості аналізу впливу окремих параметрів на ефективність функціонування системи.

Отримані результати дозволяють досліджувати вплив людського фактора на показники готовності, визначати критичні параметри та обґрунтовувати вимоги до їх значень, що є важливим для підвищення ефективності функціонування систем моніторингу.

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБЛЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ЛЮДИНО-МАШИННИХ ІНТЕРФЕЙСІВ НА ОСНОВІ ДОПОВНЕНОЇ РЕАЛЬНОСТІ

4.1 Інформаційна технологія оцінювання якості людино-машинних інтерфейсів на основі доповненої реальності

Розроблена в дисертаційній роботі інформаційна технологія в загальному вигляді складається з наступних кроків:

1. *Розширення моделі якості ЛМІ.* На першому етапі, на основі аналізу чинних міжнародних стандартів, що визначають модель якості програмних систем та людино-машинних інтерфейсів, сформовано базову систему характеристик і підхарактеристик якості. З метою врахування специфіки застосування технологій доповненої реальності, інтегрованих у ЛМІ, запропоновано розширення існуючих моделей шляхом введення додаткових характеристик.

Завдяки цьому досягнуто підвищення повноти оцінювання якості ЛМІ, оскільки кількість врахованих характеристик збільшено з 29 до 33. За умови їх рівнозначності це забезпечує зростання повноти оцінювання приблизно на 13,8%, що свідчить про більш повне охоплення суттєвих властивостей інтерфейсу в умовах використання доповненої реальності.

Таким чином, запропоноване розширення моделі дозволяє зменшити ризик неповного врахування значущих факторів якості та підвищує обґрунтованість подальших етапів оцінювання.

2. *Оцінювання впливу характеристик на ефективність ЛМІ.* Другий етап передбачає визначення ступеня впливу сформованих характеристик якості на ключові показники ефективності функціонування людино-машинного інтерфейсу, зокрема на безпомилковість і реактивність дій оператора.

Оцінювання виконується із застосуванням експертного методу, що дозволяє врахувати суб'єктивні судження фахівців щодо значущості окремих характеристик.

Отримані результати подаються у вигляді радіальних метричних діаграм, які забезпечують наочне представлення структури впливу та дозволяють ідентифікувати найбільш критичні параметри системи.

3. *Оцінювання показників готовності на основі марковських моделей.* На третьому етапі використовується аналітичний апарат марковських випадкових процесів, застосування якого для опису надійнісної поведінки людино-машинної системи обґрунтовано в межах дослідження.

На основі побудованих моделей визначаються показники готовності системи, які відображають ймовірність перебування системи у працездатних станах у стаціонарному режимі. Додатково досліджується вплив характеристик ЛМІ та параметрів діяльності оператора на інтегральні показники готовності, що дозволяє встановити причинно-наслідкові залежності між якістю інтерфейсу та ефективністю функціонування системи в цілому.

4. *Формування рекомендацій щодо покращення ЛМІ.* Завершальним етапом інформаційної технології є формування практичних рекомендацій щодо покращення характеристик людино-машинного інтерфейсу. Рекомендації базуються на результатах комплексного аналізу, що включає розширену модель якості, експертне оцінювання впливу характеристик та результати марковського моделювання.

Це дозволяє визначити пріоритетні напрями вдосконалення інтерфейсу, зокрема зменшення когнітивного навантаження оператора, підвищення точності візуалізації та скорочення часу прийняття рішень у процесі взаємодії з системою.

4.2 Опис інформаційної технології оцінювання якості людино-машинних інтерфейсів на основі доповненої реальності за допомогою IDEF0

На рисунку 4.1 представлено процес оцінювання якості ЛМІ на основі AR для БСМ ПНТ, формалізований у вигляді IDEF0-діаграми верхнього рівня A0. Дана діаграма відображає узагальнену функцію оцінювання якості ЛМІ на основі AR та визначає структуру взаємодії ключових елементів процесу, зокрема вхідних

інформаційних потоків, керувальних впливів, механізмів реалізації та вихідних результатів.

Вхідними даними процесу виступають характеристики ЛМІ, параметри середовища функціонування, сценарії використання та вимоги до якості, що формуються з урахуванням специфіки БСМ ПНТ. Керувальні впливи включають нормативно-методичну базу, стандарти якості, критерії та обмеження, що регламентують процес оцінювання. Механізми реалізації представлені методами, моделями та інструментальними засобами оцінювання, а також залученням експертів або користувачів у процесі аналізу.

Результатом функціонування даного процесу є узагальнена оцінка якості ЛМІ, а також деталізовані показники за окремими критеріями, що дозволяє виявити недоліки, сформулювати рекомендації щодо вдосконалення та забезпечити підвищення ефективності ЛМВ. Використання IDEF0-нотації забезпечує формалізоване представлення процесу оцінювання, що сприяє його структуризації, однозначності інтерпретації та подальшій декомпозиції на підпроцеси нижчих рівнів.

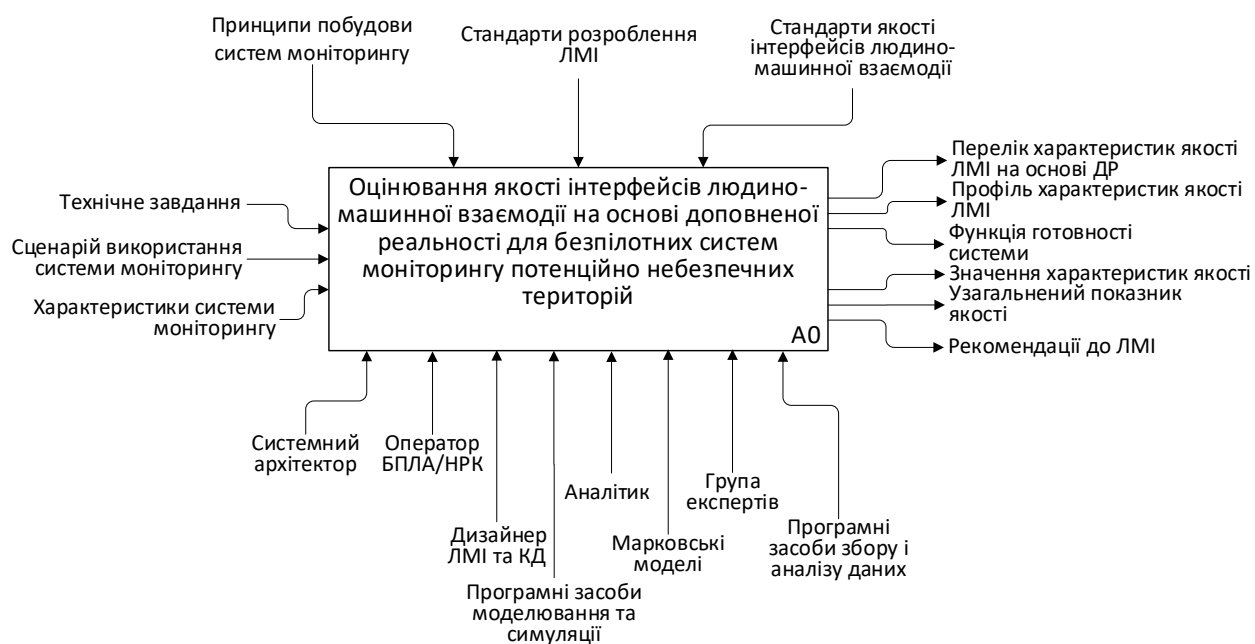


Рисунок 4.1 – Модель процесу рівня A0

Вхідними параметрами моделі є технічне завдання на систему моніторингу, сценарії її використання та характеристики оператора, які визначають умови функціонування інтерфейсу та вимоги до його ергономіки й функціональності. Керувальними впливами виступають принципи побудови систем моніторингу, а також стандарти розроблення та якості ЛМІ, що задають нормативні обмеження та критерії оцінювання.

Механізми реалізації включають людські та програмно-технічні ресурси, зокрема системного архітектора, оператора БПЛА/НРК, дизайнера ЛМІ та UX, аналітика та групу експертів, а також програмні засоби моделювання, симуляції, збору й аналізу даних. Для формалізованого опису динаміки функціонування системи та оцінювання її готовності застосовуються марковські моделі.

Вихідними результатами процесу є перелік і профіль характеристик якості ЛМІ на основі AR, функція готовності системи, кількісні значення характеристик якості та узагальнений показник якості. На основі отриманих результатів формуються рекомендації щодо вдосконалення ЛМІ на основі AR.

Таким чином, IDEF0-модель рівня A0 слугує концептуальною основою методики оцінювання, забезпечуючи системне поєднання нормативних вимог, експертних знань і формалізованих математичних моделей для кількісного аналізу впливу ЛМІ на основі AR на готовність і ефективність безпілотних систем моніторингу.

На рисунку 4.2 наведено декомпозицію IDEF0-діаграми верхнього рівня A0 до рівня A1. Запропонована модель відображає логічну послідовність виконання та взаємозв'язок трьох взаємопов'язаних підпроцесів, що забезпечують поетапний перехід від аналізу вихідних умов функціонування системи до формування узагальнених показників якості, а також розроблення рекомендацій щодо вдосконалення людино-машинних інтерфейсів на основі доповненої реальності.

Перший підпроцес «Аналіз вхідних архітектурних рішень» спрямований на опрацювання технічного завдання, сценаріїв використання системи моніторингу та характеристик її функціональних елементів.

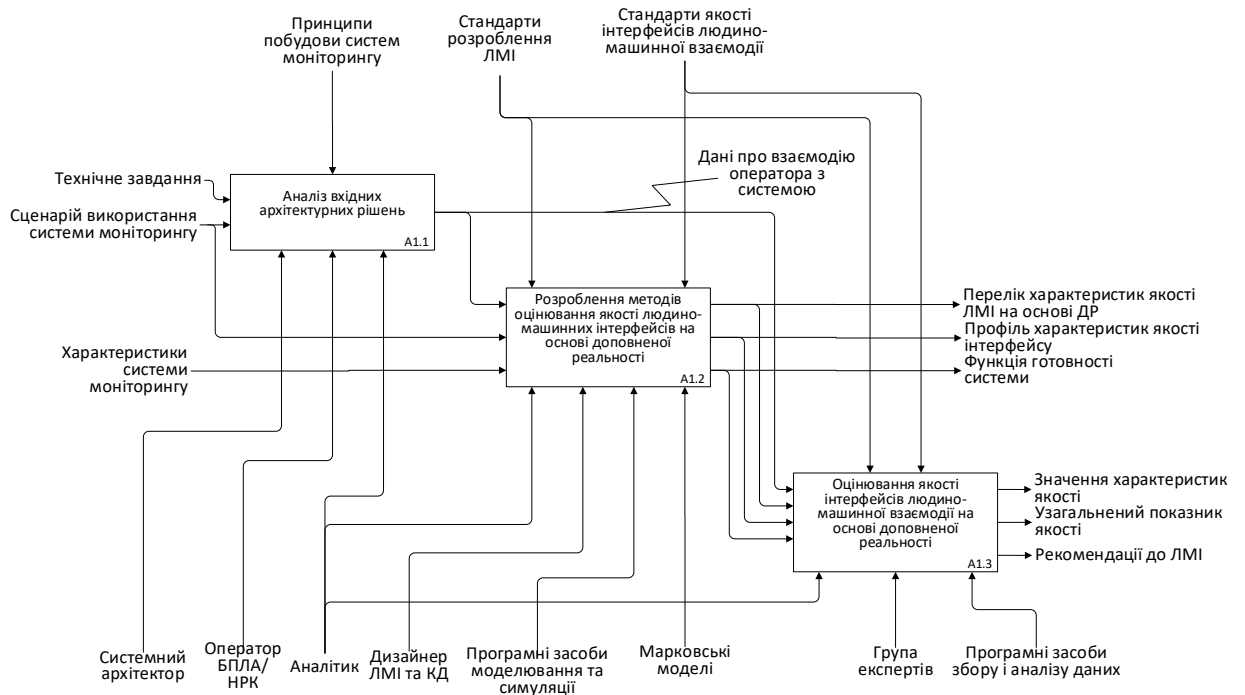


Рисунок 4.2 – Модель процесу оцінювання якості AR-інтерфейсів безпілотних систем моніторингу

У межах цього етапу враховуються принципи побудови систем моніторингу, вимоги до людино-машинної взаємодії та початкові архітектурні обмеження. Результати аналізу формують основу для подальшого розроблення методів оцінювання, зокрема шляхом визначення релевантних параметрів системи та ролі оператора в контурі керування.

Другий підпроцес «Розроблення методів оцінювання якості людино-машинних інтерфейсів на основі доповненої реальності» передбачає формування переліку характеристик якості ЛМІ на основі AR та побудову профілю їхніх показників з урахуванням стандартів розроблення та якості ЛМІ. На цьому етапі використовуються дані про взаємодію оператора з системою, результати аналітичних досліджень, а також інструменти моделювання і симуляції. Окрему роль відіграють марковські моделі, які забезпечують формалізований опис впливу параметрів інтерфейсу та дій оператора на показник готовності системи моніторингу.

Підпроцес «Оцінювання якості інтерфейсів людино-машинної взаємодії на основі доповненої реальності» здійснює безпосереднє оцінювання якості ЛМІ на

основі AR із використанням розробленого методу. Процес включає експертне оцінювання характеристик якості, обчислення функції готовності системи, визначення кількісних значень показників та формування узагальненого інтегрованого показника якості. До механізмів реалізації належать група експертів, аналітик, програмні засоби збору та аналізу даних. Результатом етапу є формування рекомендацій щодо вдосконалення ЛМІ на основі AR.

На рисунку 4.3 детально описується процес формування та підготовки даних про взаємодію оператора з системою моніторингу потенційно небезпечних територій. Модель відображає послідовність аналітичних підпроцесів, спрямованих на систематизацію архітектурних рішень, аналіз сценаріїв взаємодії та підготовку вхідних даних для подальшого оцінювання якості ЛМІ. Даний процес можна розбити на три етапи.

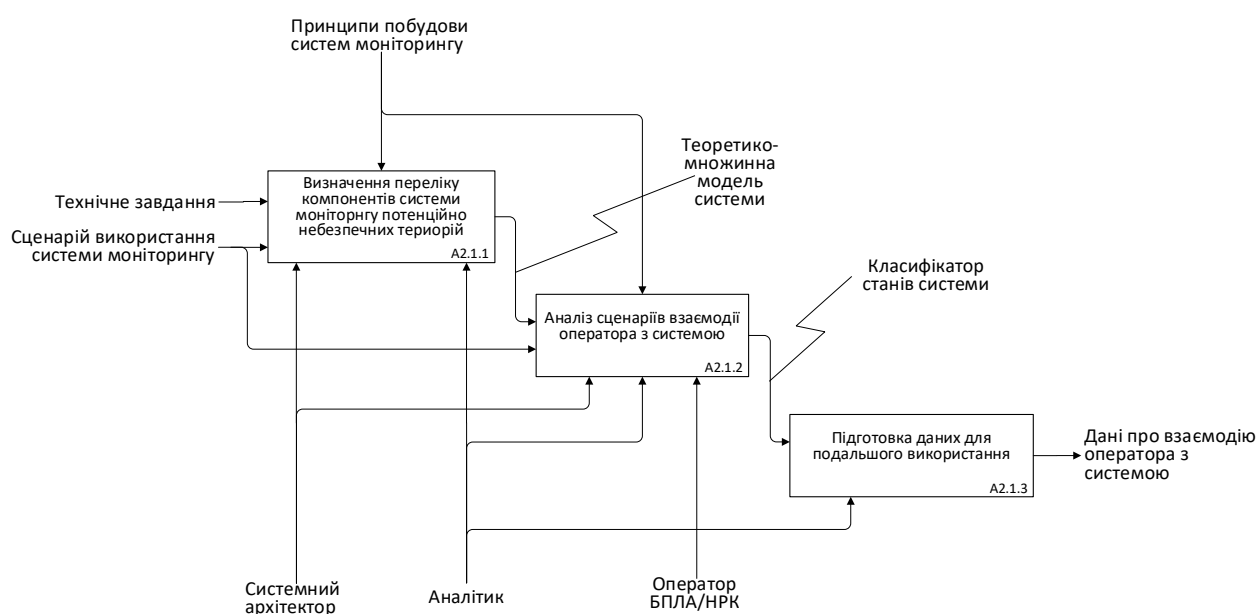


Рисунок 4.3 – Модель процесу аналізу вхідних архітектурних рішень

Перший етап виконується на основі технічного завдання, сценаріїв використання системи та принципів побудови систем моніторингу. У межах цього етапу системним архітектором і аналітиком формується структурований перелік апаратних, програмних та інформаційних компонентів системи, а також встановлюються їхні функціональні ролі у процесі взаємодії з оператором.

Результатом є формалізоване подання архітектури системи, необхідне для подальшого аналізу ЛМВ.

Другий етап передбачає дослідження дій оператора БПЛА/НРК у різних режимах функціонування системи з урахуванням її теоретико-множинної моделі та класифікатора станів. На цьому етапі здійснюється ідентифікація типових та критичних сценаріїв взаємодії, визначення переходів між станами системи та ролі інтерфейсу у підтримці прийняття рішень оператором. Отримані результати дозволяють формалізувати поведінку системи та оператора в контексті людино-машинної взаємодії.

Завершальний етап спрямований на узагальнення та структурування результатів аналізу сценаріїв взаємодії. На цьому етапі формуються набори даних про дії оператора, реакції системи та умови функціонування, які можуть бути використані як вхідні дані для моделей оцінювання якості інтерфейсів, розрахунку показників готовності та подальшого експертного оцінювання. Виходом підпроцесу є підготовлені та уніфіковані дані про взаємодію оператора з системою.

Після аналізу вхідних архітектурних рішень, наступним процесом є розроблення методів оцінювання якості людино-машинних інтерфейсів на основі доповненої реальності, що модель якого продемонстровано на рисунку 4.4.

На першому етапі здійснюється визначення переліку характеристик якості ЛМІ на основі AR. Вхідними даними є ЛМІ на основі AR системи моніторингу, сценарії використання та характеристики системи. Керувальними впливами виступають стандарти розроблення та стандарти якості ЛМІ. У результаті формується структурований перелік характеристик якості ЛМІ на основі AR, що слугує основою для подальшого оцінювання.

На другому етапі на основі визначених характеристик формується профіль характеристик якості ЛМІ на основі AR. У межах цього процесу відбираються та формалізуються релевантні характеристики, що відображають ергономічні, когнітивні, функціональні та інші властивості ЛМІ на основі AR.

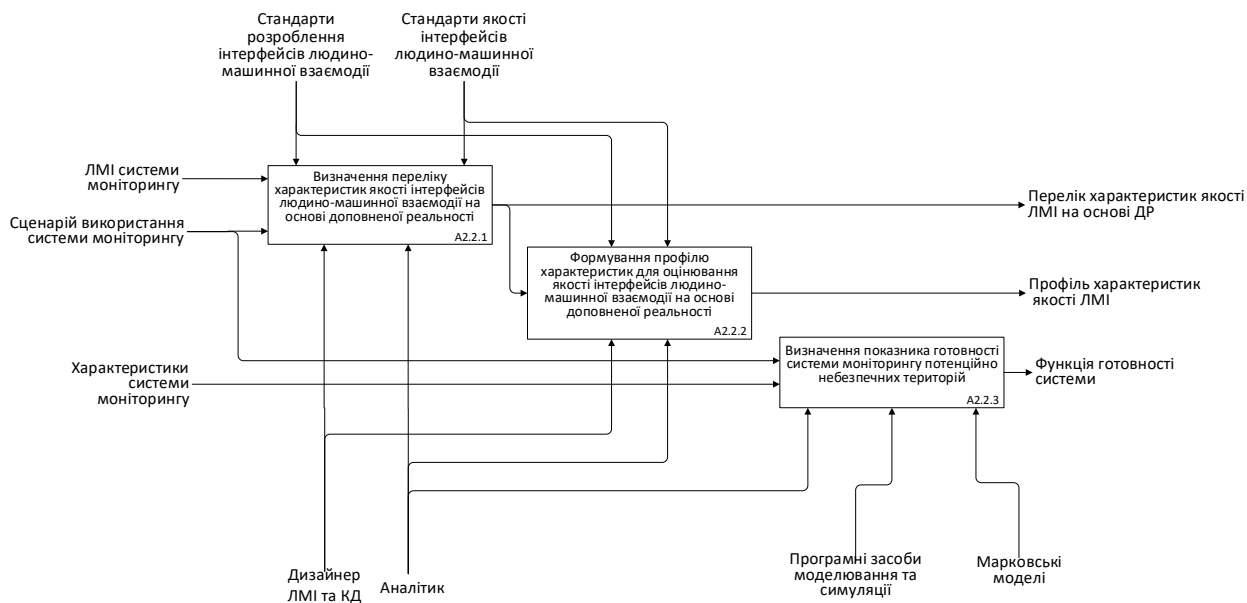


Рисунок 4.4 – Модель процесу розроблення методів оцінювання якості ЛМІ на основі AR

При цьому враховуються характеристики системи та вимоги стандартів якості ЛМІ. Результатом є структурований перелік характеристик якості ЛМІ на основі AR, придатний для подальшого кількісного аналізу.

Окремо виконується оцінювання впливу характеристик ЛМІ на основі AR на готовність системи моніторингу. Вхідними даними цього підпроцесу є сформований профіль характеристик якості, характеристики оператора та результати попередніх етапів. Для кількісного аналізу використовується математичний апарат, зокрема однофрагментні та багатофрагментні марковські моделі, що дозволяють врахувати дії оператора, часткові відмови та динаміку станів системи. Результатом підпроцесу є функція готовності системи моніторингу, яка відображає використання орієнтованих на AR ЛМІ.

Таким чином, представлена IDEF0-модель формалізує послідовний перехід від формування вимог до якості ЛМІ на основі AR через визначення їх характеристик до кількісного оцінювання готовності системи моніторингу. Після формування вимог до якості ЛМІ на основі AR, можна переходити до процесу

оцінювання попередньо розробленого інтерфейсу. Даний процес описано на рисунку 4.5.

На першому етапі здійснюється експертне оцінювання якості ЛМІ на основі AR. Вхідними даними є ЛМІ на основі AR системи моніторингу, профіль вимог до інтерфейсів та визначені характеристики їх якості. Оцінювання проводиться групою експертів із використанням стандартизованих підходів до ЛМІ та інтерфейсів на основі AR, а також засобів збору й аналізу даних. Результатом є кількісні значення характеристик якості ЛМІ на основі AR.

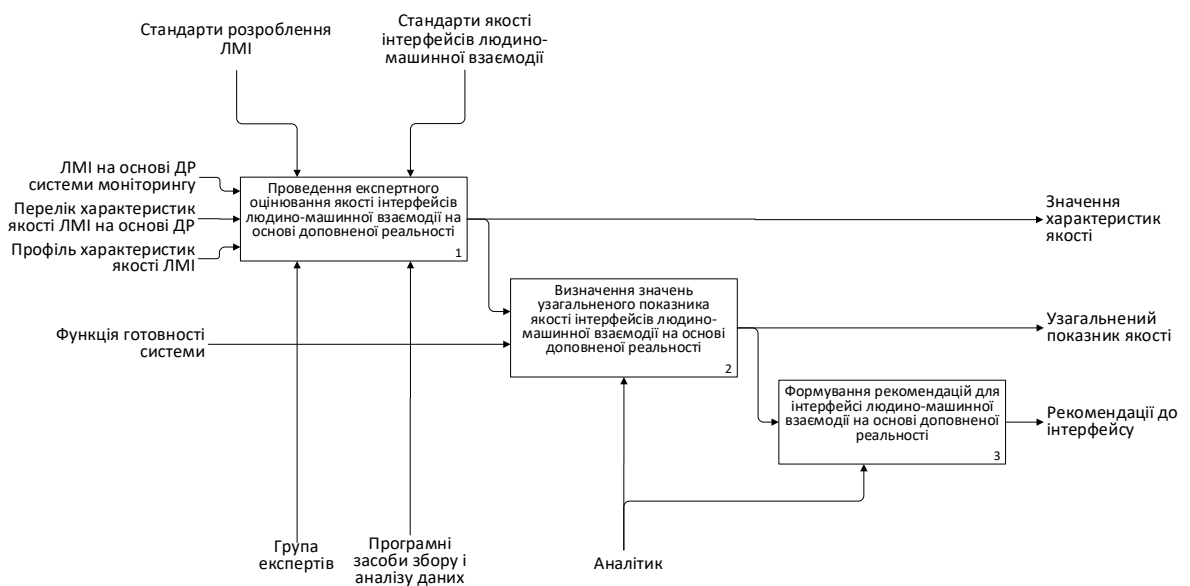


Рисунок 4.5 – Модель процесу оцінювання якості ЛМІ на основі AR

На основі результатів експертного оцінювання та розрахованої функції готовності системи здійснюється визначення узагальненого показника якості ЛМІ на основі AR. У межах цього процесу виконується агрегування окремих характеристик якості, що відображають ергономічні, когнітивні та експлуатаційні властивості ЛМІ на основі AR, з урахуванням їх відносної вагомості та ступеня впливу на показники готовності й надійності системи моніторингу. Вагові коефіцієнти характеристик формуються на основі експертних оцінок та результатів моделювання, що забезпечує узгодженість суб'єктивних і формалізованих складових оцінювання. Отриманий узагальнений показник якості дозволяє кількісно оцінити ефективність ЛМІ на основі AR в контексті функціонування всієї

системи, а також слугує основою для порівняльного аналізу альтернативних рішень ЛМІ і прийняття обґрунтованих рішень щодо їх подальшого удосконалення.

На завершальному етапі на основі узагальненого показника якості та результатів аналітичної обробки формуються рекомендації щодо вдосконалення ЛМІ на основі AR. Рекомендації спрямовані на підвищення ергономічних, когнітивних і функціональних характеристик інтерфейсу та, відповідно, на покращення готовності й надійності системи моніторингу в цілому.

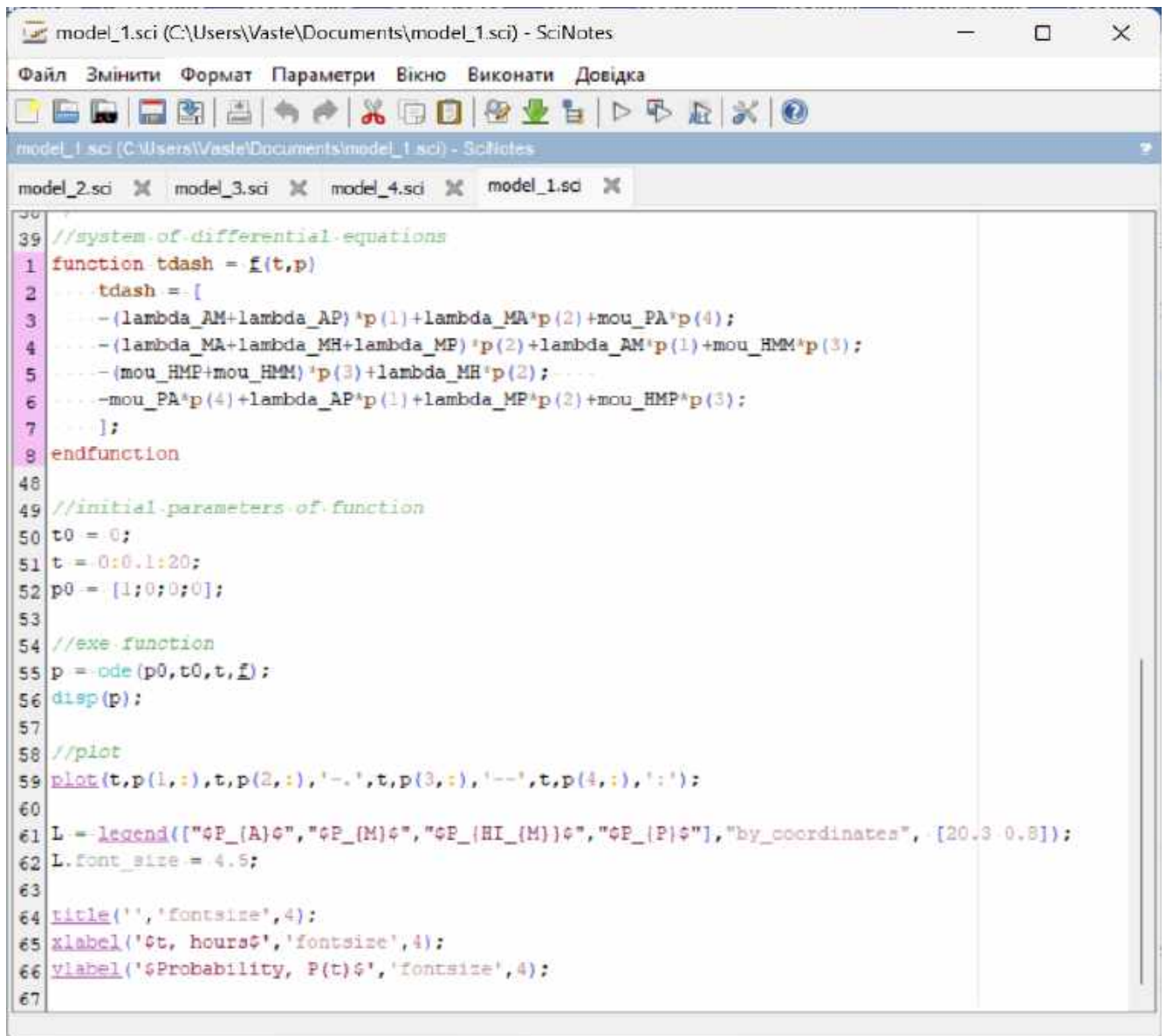
Запропонована послідовність забезпечує послідовний перехід від експертного оцінювання характеристик якості ЛМІ на основі AR до формування узагальненого показника та практичних рекомендацій щодо їх удосконалення. Такий підхід дозволяє поєднати суб'єктивні експертні судження з формалізованими показниками готовності системи та забезпечує науково обґрунтовану оцінку впливу ЛМІ на основі AR на ефективність систем моніторингу.

4.3 Програмні засоби симуляції марковських моделей готовності

У межах даного дисертаційного дослідження для розроблення, симуляції та аналізу марковських моделей готовності складних технічних систем були використані програмні засоби для проведення математичних розрахунків Scilab та MATLAB, які є поширеними інструментами для наукових і інженерних розрахунків. Застосування цих інструментів зумовлене їхніми розвиненими можливостями роботи з матрицями, чисельного розв'язання систем диференціальних рівнянь, а також широким набором засобів для графічної інтерпретації результатів моделювання.

У середовищі Scilab були розроблені скрипти для задання інтенсивностей переходів між станами марковської моделі (рисунок 4.6). На основі цієї матриці реалізовано чисельне розв'язання системи диференціальних рівнянь Колмогорова–Чепмена, що описують динаміку ймовірностей перебування системи в кожному зі станів. Для цього використовувалися вбудовані засоби розв'язання звичайних

диференціальних рівнянь, що забезпечують достатню точність та стабільність обчислень при довготривалій симуляції.



```

39 //system of differential equations
1 function tdash = f(t,p)
2     tdash = [
3         -(lambda_AM+lambda_AP)*p(1)+lambda_MA*p(2)+mou_PA*p(4);
4         -(lambda_MA+lambda_MH+lambda_MP)*p(2)+lambda_AM*p(1)+mou_HMM*p(3);
5         -(mou_HMP+mou_HMM)*p(3)+lambda_MH*p(2);
6         -mou_PA*p(4)+lambda_AP*p(1)+lambda_MP*p(2)+mou_HMP*p(3);
7     ];
8 endfunction
48
49 //initial parameters of function
50 t0 = 0;
51 t = 0:0.1:20;
52 p0 = [1;0;0;0];
53
54 //exe function
55 p = ode(p0,t0,t,f);
56 disp(p);
57
58 //plot
59 plot(t,p(1,:),t,p(2,:), '-.',t,p(3,:), '-.',t,p(4,:), ':');
60
61 L = legend(['%P_A%', '%P_M%', '%P_HI_M%', '%P_P%'], 'by_coordinates', [20.3 0.8]);
62 L.font_size = 4.5;
63
64 title('','fontsize',4);
65 xlabel('%t, hours%', 'fontsize',4);
66 ylabel('%Probability, P(t)%', 'fontsize',4);
67

```

Рисунок 4.6 – Скрипт для ОФМО у Scilab

В ході виконання моделювання виявилось, що Scilab погано пристосований для моделювання багатфрагментної марковської моделі. Тому було прийнято рішення виконати моделювання моделі M4 у середовищі MATLAB (рисунок 4.7). За допомогою скриптів MATLAB виконувалася параметризація моделей готовності, дослідження впливу інтенсивностей відмов і відновлення на імовірності станів, а розвинені графічні можливості MATLAB дозволили

побудувати часові діаграми зміни ймовірностей станів, порівняльні графіки для різних сценаріїв та наочно представити результати чисельних експериментів.



```

21 taim_interval=20;
22 options = odeset('RelTol',1e-9, 'AbsTol',1e-9);
23
24 [V1,E1] =fM21();
25 grPlot_marker(V1,E1,'d','%d', '%.2e',0.3);
26
27 A=matrixA(V1,E1);
28 P0=[1 zeros(1, size(V1,1)-1)];
29 [t0,P01] = ode15s(@stiff,[0 taim_interval],P0,options);
30 %A=P01(:,1);
31
32 figure(2);
33 plot(t0, P01(:,1) + P01(:,7), '--','Color',[0 1 0], 'LineWidth', 3); % стан 1: зелений
34 hold on;
35 plot(t0, P01(:,2)+ P01(:,8), '-', 'Color',[0.9 0.5 0.3], 'LineWidth', 2); % стан 2: жовтий
36 plot(t0, P01(:,3)+ P01(:,9), '-.','Color',[0 0 1], 'LineWidth', 2); % стан 3: блакитний
37 plot(t0, P01(:,4)+ P01(:,10), '-.','Color',[1 0 0], 'LineWidth', 2); % стан 4: червоний
38 %plot(t0, P01(:,5)+ P01(:,11), '-*','Color',[1 0 1], 'LineWidth', 2); % стан 5: пурпурний
39 %plot(t0, P01(:,6)+ P01(:,12), '-.-','Color', [0.4 0.8 1], 'LineWidth', 2); % стан 6: коричневий (RGB)
40 hold off;
41 set(get(gcf,'CurrentAxes'),'FontName','Arial','FontSize',16, 'FontWeight','bold');
42 xlabel('t, hours');
43 ylabel('Probability, P(t)');
44 legend({'P_A','P_M','P_P','P_H_I_M'}, 'Location','eastoutside');
45 %legend({'P_A','P_M','P_P','P_H_I_M','P_F_M','P_F_M_R'}, 'Location','eastoutside');
46 grid on;

```

Рисунок 4.7 – Скрипт для багатофрагментної моделі у MATLAB

Застосування даного підходу забезпечило відтворюваність результатів моделювання та можливість швидкої модифікації програмного коду при зміні структури марковської моделі або значень її параметрів. Використання двох програмних середовищ дало змогу виконати задачу симуляції моделей різного рівня складності. У підсумку використані програмні засоби створили ефективну основу для комплексного дослідження марковських моделей готовності та обґрунтування наукових результатів даної дисертаційної роботи.

4.4 Програмний засіб проведення експертного оцінювання якості людино-машинних систем доповненої реальності «Survey Insight AI Web-App»

В умовах зростання кількості застосунків на основі AR та скорочення циклів розроблення особливої ваги набувають цифрові сервіси, що автоматизують процес

оцінювання UX. Традиційні методи (інтерв'ю, анкетування, спостереження, лабораторні тести) є ефективними, але часто потребують значних часових і людських ресурсів, а також експертної інтерпретації результатів. У цьому контексті перспективним напрямом є використання інтелектуальних веб-додатків, які поєднують автоматизований збір даних, аналітику та генерацію зрозумілих рекомендацій, у тому числі із застосуванням моделей штучного інтелекту (AI).

Інтелектуалізація подібного сервісу може бути забезпечена шляхом інтеграції з ChatGPT –інструментом, здатним генерувати узагальнення, пояснення та рекомендації на основі структурованих вхідних даних природною мовою. Такий підхід дозволяє виходити за межі простого збереження результатів опитувань і побудови візуалізацій, забезпечуючи перетворення числових оцінок у змістовні аналітичні висновки.

Зокрема, система набуває здатності автоматично ідентифікувати проблемні аспекти ЛМІ, інтерпретувати можливі причини зниження показників якості, формувати обґрунтовані рекомендації щодо вдосконалення, а також здійснювати пріоритизацію запропонованих змін. У результаті підвищується аналітична цінність отриманих даних та спрощується процес їх інтерпретації.

Таким чином, запропонований підхід розширює функціональні можливості системи та робить її корисною не лише для дослідників користувацького досвіду, але й для розробників програмного забезпечення та менеджерів продукту, які приймають рішення щодо розвитку та оптимізації інтерфейсів.

Розроблення подібного веб-додатку потребує комплексного підходу, що охоплює проєктування архітектури, побудову схеми бази даних, реалізацію серверної логіки, створення зручного ЛМІ та інтеграцію з модулем AI. Для реалізації зазначених вимог доцільним є використання сучасного стеку веб-розробки: Node.js як продуктивного середовища для серверної частини, Strapi як системи керування вмістом для керування сутностями та інтерфейсами прикладного програмування (англ. Application Programming Interface, API), MySQL як надійної реляційної системи управління базами даних для зберігання результатів, а також React / Next.js для створення клієнтської частини з високою

швидкодією та компонентною структурою. Для візуалізації даних у додатку застосовуються такі інструменти, як Chart.js і D3.js, що забезпечують наочне подання статистики та порівнянь.

З практичного погляду інтелектуальний веб-додаток оцінювання якості ЛМІ на основі AR може виконувати такі функції:

- організовувати інтерактивне опитування користувачів за визначеними аспектами якості ЛМІ на основі AR;
- зберігати результати тестування й історію відповідей у базі даних;
- обчислювати узагальнені показники (середні значення, розподіли, порівняння за аспектами);
- візуалізувати результати у вигляді діаграм і графіків;
- автоматично генерувати текстові висновки та рекомендації для покращення ЛМІ на основі ChatGPT API;
- забезпечувати масштабування під різні типи додатків AR і сценарії оцінювання UX.

Практичне значення отриманого результату полягає у можливості використання розробленого веб-застосунку як універсальної платформи для оцінювання якості ЛМІ на основі AR, що забезпечує інтеграцію процесів збору, оброблення та інтерпретації даних у єдиному інформаційному середовищі. Запропонована архітектура характеризується модульністю та масштабованістю, що дозволяє гнучко адаптувати її до різних предметних областей і умов застосування.

Реалізовані функціональні модулі, зокрема підсистема збору даних (опитування), аналітичний модуль, засоби візуалізації результатів та модуль формування висновків із використанням AI, забезпечують підтримку повного циклу оцінювання якості – від первинного отримання даних до формування узагальнених показників і рекомендацій щодо вдосконалення ЛМІ. Використання інтерактивних засобів візуалізації сприяє підвищенню наочності результатів аналізу, тоді як застосування інтелектуальних алгоритмів дозволяє автоматизувати процес інтерпретації даних та зменшити вплив суб'єктивних факторів.

Крім того, запропоноване рішення може бути використане не лише для оцінювання якості ЛМІ на основі AR, а й адаптоване для ширшого спектра задач, пов'язаних із дослідженням користувацького досвіду в інтерактивних інформаційних системах. Зокрема, його доцільно застосовувати в системах, що потребують оперативного аналізу UX у режимі, наближеному до реального часу, а також у процесах проєктування, тестування та вдосконалення інтерфейсів у різних галузях. Таким чином, отриманий результат має значний прикладний потенціал та може слугувати основою для подальшого розвитку інструментальних засобів оцінювання якості ЛМВ.

Одним із ключових завдань під час проєктування системи є вибір архітектурної моделі, яка забезпечує ефективну взаємодію між усіма складовими: користувачем, сервером, базою даних та зовнішнім інтелектуальним сервісом. Для розроблення інтелектуального веб-додатку оцінювання якості ЛМІ на основі доповненої реальності обрано клієнт–серверну архітектуру з використанням REST API, що є доцільним для масштабованих веб-рішень із розділенням логіки представлення та обробки даних.

Клієнт–серверна модель передбачає поділ системи на дві основні частини:

- клієнтську, що відповідає за інтерфейс користувача, введення відповідей, перегляд діаграм та зручність використання ітв;
- серверну, що виконує обробку запитів, валідацію, агрегацію та збереження даних, а також інтеграцію з ChatGPT API для формування текстових висновків.

Такий підхід забезпечує незалежність між рівнями системи: ЛМІ можна змінювати без модифікації серверної логіки, а сервер – масштабувати чи розширювати (додавати нові типи опитувань, модулі аналітики) без втручання у клієнтську частину.

Клієнтська частина реалізується з використанням React у поєднанні з Next.js, що дозволяє будувати сучасний інтерфейс опитування та аналітики із швидким оновленням даних. Завдяки компонентній моделі React спрощується реалізація динамічних елементів: прогрес проходження опитування, формування блоків

питань, фільтри результатів, діаграми тощо. Next.js додатково забезпечує оптимізацію продуктивності, маршрутизацію та можливість серверного рендерингу там, де це доцільно (наприклад, для сторінок звітів або загального доступу).

Серверна частина системи реалізована на основі платформи Node.js, що забезпечує використання неблокуючої моделі введення/виведення та ефективну обробку великої кількості асинхронних запитів. Такий підхід дозволяє досягти високої продуктивності та масштабованості веб-застосунку, що є особливо важливим у задачах, пов'язаних із обробленням потокових даних і взаємодією з користувачами в режимі, наближеному до реального часу.

Для побудови серверної логіки, реалізації API та керування сутностями даних використано систему керування контентом Strapi. Застосування даного інструментарію суттєво спрощує процес створення опису моделей даних у вигляді структурованих типів сутностей, а також забезпечує зручне адміністрування через інтерактивну панель керування. Крім того, Strapi надає можливості гнучкого налаштування прав доступу, інтеграції з зовнішніми сервісами та розширення функціональності за рахунок використання плагінів.

У сукупності використання Node.js та Strapi дозволяє сформувати надійну, масштабовану та легко розширювану серверну архітектуру, що відповідає вимогам сучасних інформаційних систем і забезпечує ефективну підтримку процесів оцінювання якості людино-машинних інтерфейсів.

Система керування базами даних MySQL використовується для збереження та оброблення структурованих даних, зокрема інформації про користувачів, опитування, питання, аспекти оцінювання, отримані відповіді, підсумкові показники, автоматично згенеровані висновки, а також часові мітки подій. Така організація даних забезпечує цілісність, узгодженість і можливість ефективного керування інформаційними ресурсами системи.

Використання реляційної моделі даних є обґрунтованим, оскільки предметна область характеризується наявністю чітко визначених зручність використання'язків між сутностями, що дозволяє формалізувати структуру даних

у вигляді взаємопов'язаних таблиць із підтримкою механізмів цілісності. Це забезпечує надійне зберігання інформації, мінімізує ризик виникнення дублювань і помилок, а також спрощує супровід і модифікацію бази даних.

Крім того, MySQL забезпечує високу продуктивність при виконанні запитів вибірки та агрегації даних, що є критично важливим для формування аналітичних звітів, зокрема за визначеними часовими інтервалами, версіями ЛМІ на основі AR або групами користувачів. Підтримка індексування, оптимізації запитів та механізмів транзакцій дозволяє забезпечити швидкий вибірковий доступ до даних і гарантувати їхню цілісність у багатокористувацькому середовищі. Таким чином, використання MySQL сприяє ефективній реалізації підсистеми зберігання даних у межах розробленої інформаційної технології оцінювання якості ЛМІ.

Вагому роль у функціонуванні системи відіграє інтеграція ChatGPT API, який забезпечує реалізацію інтелектуального аналізу даних. На серверному рівні формується узагальнений контекст, що включає агреговані оцінки за визначеними аспектами, опис сценаріїв використання AR (за наявності), а також стислий аналіз текстових коментарів респондентів.

Зазначений контекст передається до AI-моделі, яка на його основі генерує структурований текстовий зручність використання. Результати оброблення включають узагальнену характеристику сильних і слабких сторін ЛМІ, інтерпретацію можливих причин отриманих оцінок, зокрема низьких показників, а також формування рекомендацій щодо вдосконалення. У разі необхідності рекомендації можуть бути впорядковані за пріоритетністю.

Для забезпечення взаємодії між компонентами системи використовується протокол HTTP/HTTPS як базовий транспортний рівень та формат обміну даними JSON. Такий підхід забезпечує уніфікований спосіб передачі структурованої інформації між клієнтською частиною, сервером, системою керування базою даних, а також зовнішніми сервісами штучного інтелекту.

Використання зазначених технологій забезпечує міжплатформену сумісність, спрощує інтеграцію різнорідних компонентів і підвищує гнучкість архітектури системи. Крім того, стандартизований формат обміну даними дозволяє

легко масштабувати систему та розширювати її функціональність шляхом підключення додаткових модулів без суттєвої модифікації існуючої архітектури. Зокрема, це стосується реалізації функцій експорту аналітичних звітів, порівняльного аналізу версій інтерфейсів, а також інтеграції із зовнішніми аналітичними платформами та сервісами обробки даних.

Таким чином дане архітектурне рішення (рисунок 4.8) поєднує простоту реалізації, гнучкість у масштабуванні та можливість інтеграції з інтелектуальними сервісами, що робить її ефективною для побудови веб-рішень у сфері оцінювання ЛМІ на основі AR.

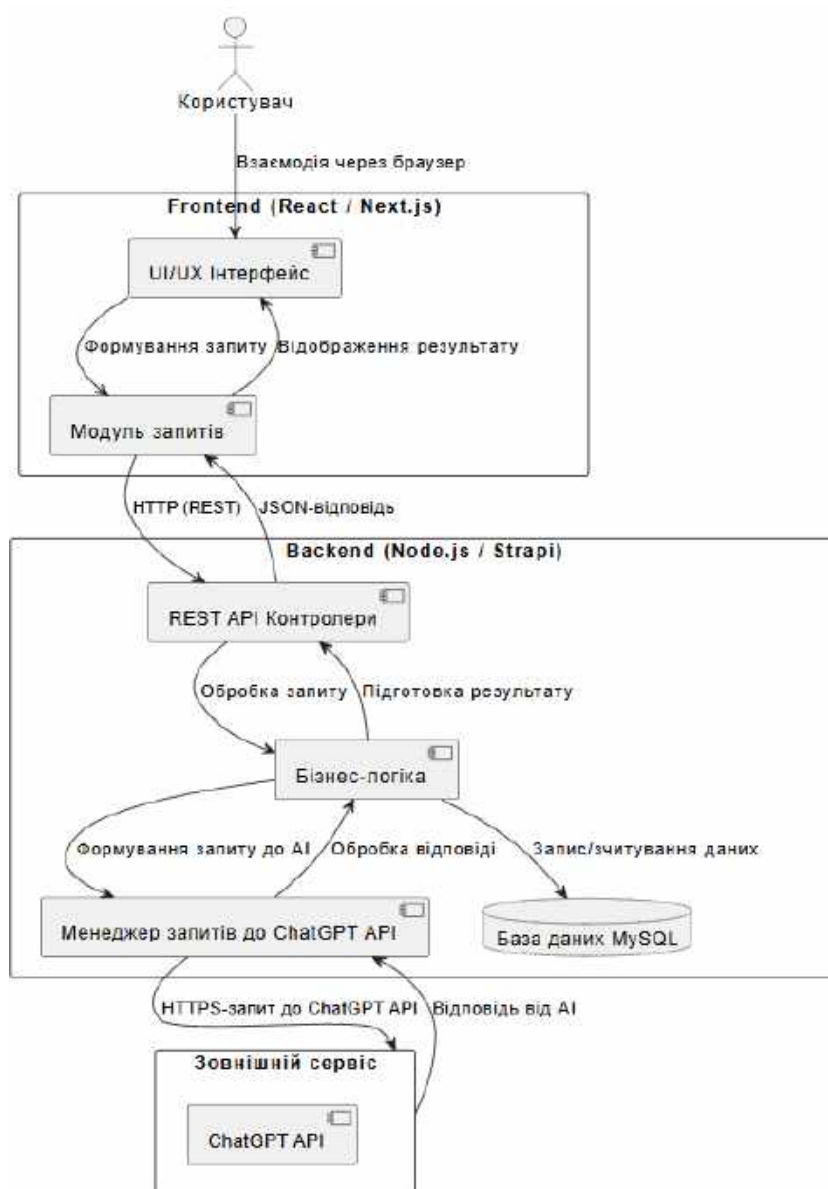


Рисунок 4.8 – Архітектура програмного засобу

4.5 Аналіз результатів впровадження розроблених методів та засобів

Отримані в ході виконання дисертаційного дослідження результати аналізу та порівняння існуючих методів оцінювання якості інтерфейсів на основі доповненої реальності, приклади оцінювання якості людино-машинних інтерфейсів на основі доповненої реальності з використанням розробленого методу та основні наукові положення про використання запропонованих методів та розробленої інформаційної технології були використані при виконанні проєктах кафедри на замовлення МОН України, в навчальному процесі при підготовці лекційних матеріалів, матеріалів для практикумів, при обґрунтуванні та формуванні вимог до надійності та живучості обладнання безпілотних систем, а також в об'єктах індустрії.

Результати дисертаційного дослідження впроваджено:

– у навчальному процесі кафедри кібербезпеки та інтелектуальних інформаційних технологій «ХАІ» у вигляді методичного забезпечення для проведення лабораторних занять в навчальних дисциплінах «Розробка проєктів доповненої реальності» та «Технології віртуальної та доповненої реальності», а також при виконанні кваліфікаційних робіт магістрів кафедри за спеціальністю «Комп'ютерна інженерія»;

– при виконанні науково-дослідницької роботи «Наукові засади і методи забезпечення гарантоздатності флотів БПЛА інтелектуальних систем моніторингу потенційно небезпечних і військових об'єктів» (№ Д/Р 0121U112172 впродовж 2022–2023 розширен реальність.);

– при тестуванні оновленої версії порталу «Ліси України» в Українському ордена "Знак пошани" науково-дослідному інституті лісового господарства та агролісомеліорації ім. Г. М. Висоцького Державного агентства лісових ресурсів України та Національної академії наук України.

Впровадження цих результатів надало змогу:

- підвищити показники надійності і живучості програмних пристроїв та безпілотних систем, систем Інтернету речей та інших програмно-апаратних рішень для перспективних застосувань в рамках виконання науково-дослідних проєктів. Кількісні оцінки позитивного ефекту за показниками безвідмовності, готовності та живучості надано в розділах 2-3, де ілюструються рівні їх зростання залежно від значень параметрів ПП, засобів зовнішньої реконфігурації безпілотних систем;
- покращити наочність, фундаментальність та практичну спрямованість навчальних курсів, які викладаються на кафедрі та університеті, а також курсів розроблених в рамках міжнародних проєктів.

4.6 Висновок за четвертим розділом

У даному розділі сформовано комплексний підхід до програмної підтримки процесів оцінювання якості ЛМІ на основі AR і дослідження марковських моделей готовності. Показано, що поєднання формалізованого опису процесів за допомогою IDEF0-діаграм, скриптових засобів чисельного моделювання та прикладного програмного забезпечення створює цілісне середовище для проведення аналітичних і експериментальних досліджень.

Використання IDEF0-діаграм дозволило структуровано описати процес оцінювання якості ЛМІ на основі AR, чітко визначити вхідні та вихідні дані, керуючі впливи і використовувані ресурси. Такий підхід забезпечив прозорість логіки оцінювання, узгодженість окремих етапів процесу та можливість його подальшої формалізації і автоматизації.

Розроблені скрипти в середовищах проведення математичних розрахунків Scilab та MATLAB забезпечили реалізацію симуляції марковських моделей готовності та аналіз динаміки ймовірностей станів. Застосування цих програмних засобів дозволило автоматизувати розрахунки, підвищити точність досліджень і наочно представити результати у вигляді графіків та діаграм.

Окреме прикладне програмне забезпечення для проведення оцінювання якості ЛМІ на основі AR забезпечило практичну реалізацію розроблених методик, збирання та обробку результатів оцінювання, а також інтеграцію з результатами моделювання. У сукупності використані програмні засоби симуляції, скрипти та формалізовані діаграми утворюють єдину методологічну та інструментальну основу дослідження.

Таким чином, розділ демонструє, що застосування сучасних програмних засобів і формальних методів моделювання дозволяє забезпечити системність, відтворюваність і достовірність оцінювання якості ЛМІ на основі AR та аналізу готовності систем, що є важливою передумовою для обґрунтування наукових результатів дисертаційної роботи.

ВИСНОВКИ

1. У дисертаційній роботі розв'язано актуальну науково-прикладну задачу і розроблено методи оцінювання якості людино-машинних інтерфейсів на основі доповненої реальності для безпілотних систем моніторингу потенційно небезпечних територій. Підвищення якості ЛМІ досягається завдяки: по-перше, підвищенню повноти оцінки якості з урахуванням додаткових характеристик, обумовлених використанням доповненої реальності; по-друге, уточненню впливу цих характеристик на якість експертним методом; по-третє, визначенню впливу характеристик ЛМІ та оператора на готовність системи в цілому. Одержано низку нових наукових результатів.

2. Удосконалено теоретико-множинну модель і архітектуру системи моніторингу потенційно небезпечних територій, де керування безпілотними літальними апаратами здійснюється з використанням інтерфейсів людино-машинної взаємодії на основі доповненої реальності, що дає змогу обґрунтовувати функціональні та нефункціональні вимоги, а також модифікувати модель життєвого циклу таких систем.

3. Удосконалено метод оцінювання якості інтерфейсів людино-машинної взаємодії на основі доповненої реальності для систем моніторингу шляхом формування профілю вимог та множини відповідних евристик, експертного оцінювання значень спеціальних метрик та визначення інтегрованого показника якості, що забезпечує підвищення достовірності оцінки.

4. Вперше запропоновано метод оцінювання готовності систем моніторингу потенційно небезпечних територій з інтерфейсами людино-машинної взаємодії на основі доповненої реальності, що, на відміну від відомих, базується на одно- та багатофрагментних марковських моделях, які враховують характеристики реактивності та безпомилковості дій операторів, часткові відмови та наявність резервних безпілотних літальних апаратів, що надає змогу аналізувати вплив значень параметрів при розрахунку функції готовності системи та здійснювати їх вибір для забезпечення відповідності вимогам.

5. Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості використання розроблених методів та інформаційної технології для проєктування, аналізу та вдосконалення людино-машинних інтерфейсів доповненої реальності безпілотних систем моніторингу, підвищення якості операторської діяльності та зменшення ймовірності помилок у реальних умовах експлуатації. Результати можуть бути застосовані у системах екологічного моніторингу, цивільного захисту, військових і рятувальних операціях, інфраструктурному нагляді, а також у навчальних і тренажерних комплексах для підготовки операторів безпілотних платформ.

6. Запропоновані нові наукові та практичні результати забезпечують розвиток підходів до оцінювання якості людино-машинних інтерфейсів доповненої реальності в безпілотних системах моніторингу шляхом поєднання методів експертного оцінювання з математичним апаратом марковських процесів, що дозволяє враховувати вплив людського фактора, відмов технічних компонентів і умов експлуатації на узагальнені показники ефективності та надійності систем. Отримані моделі, критерії та показники розширюють методологічну базу досліджень у галузі оцінювання складних людино-машинних систем.

7. Результати дисертаційної роботи впроваджено:

– у навчальному процесі кафедри кібербезпеки та інтелектуальних інформаційних технологій ХАІ у вигляді методичного забезпечення для проведення лабораторних занять в навчальних дисциплінах «Розробка проєктів доповненої реальності» та «Технології віртуальної та доповненої реальності», а також при виконанні кваліфікаційних робіт магістрів кафедри за спеціальністю «Комп'ютерна інженерія»;

– при виконанні науково-дослідницької роботи «Наукові засади і методи забезпечення гарантоздатності флотів БПЛА інтелектуальних систем моніторингу потенційно небезпечних і військових об'єктів» (№ Д/Р 0121U112172 впродовж 2022–2023 рр.);

– при тестуванні оновленої версії порталу «Ліси України» в Українському ордена "Знак пошани" науково-дослідному інституті лісового господарства та агролісомеліорації ім. Г. М. Висоцького Державного агентства лісових ресурсів України та Національної академії наук України.

7. Подальші дослідження доцільно зосередити на:

– подальшому вдосконаленню методів оцінювання якості людино-машинних інтерфейсів на основі доповненої реальності для безпілотних систем моніторингу потенційно небезпечних територій;

– вдосконаленні процедур проведення експертного оцінювання людино-машинних інтерфейсів на основі доповненої реальності;

– поглибленому дослідженні впливу людино-машинних інтерфейсів на основі доповненої реальності на готовність безпілотних систем моніторингу;

– подальшому розширеному дослідженні особливостей людино-машинної взаємодії технологій доповненої та розширеної реальностей.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Канарський Є. О., Орехов О. О., Стадник А. О. Оцінювання якості систем доповненої реальності: аналіз стану досліджень. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2022. Вип. 4 (70). С. 79–87. DOI: 10.26906/SUNZ.2022.4.079
2. Kanarskyi Y., Orekhov O. Expert evaluation of quality criteria for human-machine interfaces in augmented reality. *Management Information System and Devices*. 2025. No. 187. P. 87–102. DOI: 10.30837/0135-1710.2025.187.087
3. Kanarskyi Y., Kharchenko V., Orekhov O., Ponochovnyi Y. Markov modelling of human-machine interaction in an augmented reality environment for UAV/UGV-based hazardous area monitoring systems. *Radioelectronic and Computer Systems*. 2025. No 4 (116). P. 35–54. DOI: 10.32620/reks.2025.4.03
4. Канарський Є. О., Орехов О. О. Інформаційна технологія оцінювання якості інтерфейсів людино-машинної взаємодії на основі доповненої реальності безпілотних систем моніторингу. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2026. № 1. С. 70–76. DOI: 10.31891/2219-9365-2026-85-9
5. IEEE P2048.1 Standard for Virtual and Augmented Reality: Device Taxonomy and Definitions. New York: IEEE, 2024.
6. Paul Milgram, Haruo Takemura, Akira Utsumi, Fumio Kishino. Augmented reality: A class of displays on the reality-virtuality continuum. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. January 1994. Vol. 2351. DOI:10.1117/12.197321
7. Oppermann L., Prinz W. Introduction to this Special Issue on Smart Glasses. *i-com*. 2016. Vol. 15, no. 2. P. 123–132. DOI: 10.1515/icom-2016-0028
8. Henson R. *Weather on the Air: A History of Broadcast Meteorology*. Boston, MA: American Meteorological Society, 2013. 264 p. DOI: 10.1007/978-1-935704-00-3

9. Caudell T. P., Mizell D. W. Augmented reality: an application of heads-up display technology to manual manufacturing processes. *Twenty-Fifth Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS-25)*: Proc. Int. Conf., Kauai, HI, USA, January 07–10, 1992. Vol. 2. P. 659–669. DOI: 10.1109/HICSS.1992.183317
10. Rekimoto J. Augmented reality using the 2D matrix code. *Interactive Systems and Software IV*. Tokyo: Kindaikagaku-sha, 1996. P. 199–208.
11. Lupescu M. E., Silvestru C. I., Drăistaru A. Ş. The impact of using social media in adult education. *Procedia Computer Science*. 2023. Vol. 225. P. 861–871. DOI: 10.1016/j.procs.2023.01.231
12. Stolojescu-Crisan C., Crisan C., Butunoi B. Human–machine interaction in augmented reality: A systematic literature review. *Applied Sciences*. 2026. Vol. 16, no. 4. Article no. 2009. DOI: 10.3390/app16042009
13. Himavamshi S., Bharath A., Srikanth G., Balaji K. Exploring the frontiers: A comprehensive review of augmented reality and virtual reality in manufacturing and industry. *International Journal of Current Science Research and Review*. 2024. Vol. 7, no. 9. P. 7208–7219. DOI: 10.47191/ijcsrr/V7-i9-38
14. Schein K. E., Rauschnabel P. A. Augmented reality in manufacturing: Exploring workers’ perceptions of barriers. *IEEE Transactions on Engineering Management*. 2023. Vol. 70, no. 10. P. 3344–3357. DOI: 10.1109/TEM.2021.3093833
15. Mariukhovych T., Mokliak V. Effectiveness of using augmented reality technology in the educational process. *Pedagogy and Psychology*. 2024. Vol. 10, no. 4. P. 9–16. DOI: 10.52534/msu-pp4.2024.09
16. Kakungulu S. J. Augmented reality in education: Enhancing learning experiences. *IAA Journal of Arts and Humanities*. 2025. Vol. 12, no. 1. P. 23–28. DOI: 10.59298/IAAJAH/2025/1212328

17. Kazlaris G. C., Keramopoulos E., Bratsas C., Kokkonis G. Augmented reality in education through collaborative learning: A systematic literature review. *Multimodal Technologies and Interaction*. 2025. Vol. 9, no. 9. P. 94. DOI: 10.3390/mti9090094
18. Eckert M., Volmerg J. S., Friedrich C. M. Augmented reality in medicine: Systematic and bibliographic review. *JMIR mHealth and uHealth*. 2019. Vol. 7, no. 4, article no. e10967. DOI: 10.2196/10967
19. Rama A., Caruso T. J. Innovation in simulation: Using augmented reality and artificial intelligence for human-centered medical education. *Medical Research Archives*. 2025. Vol. 13, No. 7. DOI: 10.18103/mra.v13i7.6788
20. Baashar Y., Alkawsy G., Ahmad W. N. W., Alhussian H., Alwadain A., Capretz L. F., Babiker A., Alghail A. Effectiveness of using augmented reality for training in the medical professions: Meta-analysis. *JMIR Serious Games*. 2022. Vol. 10, no. 3, article no. e32715. DOI: 10.2196/32715
21. Bhatarai R., Banihashemi S., Shakouri M., Antwi-Afari M. Integration of augmented reality with building information modeling: Design optimization and construction rework reduction perspective. *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2024. Vol. 32. P. 2233–2254. DOI: 10.1007/s11831-024-10211-6
22. Pan N.-H., Isnaeni N. N. Integration of augmented reality and building information modeling for enhanced construction inspection: A case study. *Buildings*. 2024. Vol. 14, no. 3, article no. 612. DOI: 10.3390/buildings14030612
23. Xu X.-Y., Jia Q.-D., Tayyab S. M. U. Exploring the stimulating role of augmented reality features in e-commerce: A three-staged hybrid approach. *Journal of Retailing and Consumer Services*. 2024. Vol. 77, article no. 103682. DOI: 10.1016/j.jretconser.2023.103682
24. Shrivastava D., Sharma R. AR and VR in the gaming industry. *Turkish Journal of Computer and Mathematics Education (TURCOMAT)*. 2020. Vol. 11, no. 1. P. 1085–1089. DOI: 10.61841/turcomat.v11i1.14405

25. Augmented Reality Market Size, Share & Trends Analysis Report. *Grand View Research*. URL: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/augmented-reality-market> (date of access: 11.02.2026).
26. Kaur K. Designing virtual environments for usability. *City University London*. URL: <http://openaccess.city.ac.uk/7567/> (date of access: 17.08.2025).
27. Sutcliffe A. G., Kaur K. D. Evaluating the usability of virtual reality user interfaces. *Behaviour & Information Technology*. 2000. Vol. 19, no 6. P. 415–426. DOI: 10.1080/014492900750052679.
28. Bowman D. A., Gabbard J. L., Hix D. A survey of usability evaluation in virtual environments: classification and comparison of methods. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*. 2002. Vol. 11, no 4. P. 404–424. DOI: 10.1162/105474602760204309.
29. Gabbard J. L., Hix D. Usability engineering of virtual environments // *Handbook of Virtual Environments*. Boca Raton: CRC Press, 2002. P. 681–699. DOI: 10.1201/9780585399102.
30. Tromp J. G., Steed A., Wilson J. R. Systematic usability evaluation and design issues for collaborative virtual environments. *Teleoperators and Virtual Environments*. 2003. Vol. 12, no. 3. P. 241–267. DOI: 10.1162/105474603765879512
31. Gabbard J. L. Researching usability design and evaluation guidelines for augmented reality (AR) systems. URL: https://www.rkriz.net/sv/classes/ESM4714/Student_Proj/class00/gabbard/index.html (дата звернення: 11.03.2026).
32. Gabbard J. L. et al. Usability engineering: domain analysis activities for augmented-reality systems. *Electronic Imaging 2002*. San Jose, CA: SPIE, 2002. DOI: 10.1117/12.468073.
33. Bach C., Scapin D. L. Obstacles and perspectives for evaluating mixed reality usability. URL: https://www.researchgate.net/publication/221104007_Obstacles_and_Perspectives_for_Evaluating_Mixed_Reality_Usability (дата звернення: 11.03.2026).

34. Träskbäck M. User requirements and usability of mixed reality applications: Licentiate thesis. Helsinki, 2004. 109 p. URL: <https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/48/urn012717.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
35. ISO 9241-210:2019. Ergonomics of human-system interaction – Part 210: Human-centred design for interactive systems. Geneva: International Organization for Standardization, 2019. 48 p. URL: <https://www.iso.org/standard/77520.html>
36. Alzua-Sorzabal A., Linaza M. T., Abad M. An experimental usability study for augmented reality technologies in the tourist sector. *Information and Communication Technologies in Tourism: Proc. Int. Conf., Corfu, Vienna, 2007*. P. 231–242. DOI: 10.1007/978-3-211-69566-1_22
37. Gabbard J. L., Swan J. E. Usability engineering for augmented reality: employing user-based studies to inform design. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*. 2008. Vol. 14, no 3. P. 513–525. DOI: 10.1109/TVCG.2008.24
38. Kostaras N. N., Xenos M. N. Assessing the usability of augmented reality systems. *3th Panhellenic Conference on Informatics: Proc. Int. Conf., Corfu, Greece, 10–12 September, 2009*. P. 197–201.
39. Finstad K. The usability metric for user experience. *Interacting with Computers*. 2010. Vol. 22, no 5. P. 323–327. DOI: 10.1016/j.intcom.2010.04.004
40. Lin H.-C. K. Establishment And Usability Evaluation Of An Interactive Ar Learning System On Conservation Of Fish. URL: <https://files.eric.ed.gov/fulltext/EJ946626.pdf> (date of access: 13.02.2025).
41. Quiñones D., Rusu C. A methodology to establish usability heuristics. *4th International Conference on Advances in Computer-Human Interactions (ACHI 2011): Proc. Int. Conf., Lisbon, Portugal, 2011*. P. 59–64.
42. Ko S. M., Chang W. S., Ji Y. G. Usability principles for augmented reality applications in a smartphone environment. *International Journal of Human-Computer Interaction*. 2013. Vol. 29, no. 8. P. 501–515. DOI: 10.1080/10447318.2012.722466

43. Kalalahti J. Developing usability evaluation heuristics for augmented reality applications : master's thesis. URL: https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/103081/masters_thesis_joanna_kalalahti_31122014.pdf (date of access: 20.02.2025)
44. Tuli N., Mantri A. Usability principles for augmented reality based kindergarten applications. *Procedia Computer Science*. 2020. Vol. 172. P. 679–687. DOI: 10.1016/j.procs.2020.05.089
45. Al-Obaidi A., Master P. Usability principles for augmented reality applications in education. *International Journal of Computer Science and Network Security*. 2022. Vol. 22, no. 1. P. 49–54. DOI: 10.22937/IJCSNS.2022.22.1.8
46. Olsson T. et al. Expected user experience of mobile augmented reality services: a user study in the context of shopping centres. *Personal and Ubiquitous Computing*. 2011. Vol. 17, no. 2. P. 287–304. DOI: 10.1007/s00779-011-0494-x
47. Olsson T. User expectations and experiences of mobile augmented reality services URL: <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-15-2953-5> (date of access: 20.02.2025)
48. Tcha-Tokey K. Towards a model of user experience in immersive virtual environments. *Advances in Human-Computer Interaction*. 2018. Article no. 7827286. DOI: 10.1155/2018/7827286
49. ISO/IEC 25010:2011 Systems and software engineering — System and software quality models. – Geneva: ISO, 2011. – 34 p.
50. Scheibmeir J. Quality Model for Testing Augmented Reality Applications. *10th Annual Ubiquitous Computing, Electronics & Mobile Communication Conference (UEMCON)*: Proc. Int. Conf., New York City, NY, USA, 10–12 October, 2019. DOI: UEMCON47517.2019.8992974
51. David A. The value of visual quality and service quality to augmented reality enabled mobile shopping experience. *Quality Management Journal*. 2021. Vol. 28, no. 3. P. 116–127. DOI: 10.1080/10686967.2021.1920868
52. Duan H. et al. Confusing image quality assessment: towards better augmented reality experience. *arXiv*. 2022. Article no. 2204.04900. DOI: 10.48550/arXiv.2204.04900

53. Leue M. C. A Theoretical Model of Augmented Reality Acceptance. URL: https://agrifecdn.tamu.edu/ertr/files/2014/02/enter2014_RN_93.pdf (last access: 14.02.2025).
54. Kim K. et al. Understanding users' continuance intention toward smartphone augmented reality applications. *Information Development*. 2014. Vol. 32, no. 2. P. 161–174. DOI: 10.1177/0266666914535119
55. da Silva M. M. O. et al. Towards the development of guidelines for educational evaluation of augmented reality. *IEEE Virtual Reality Workshop on K-12 Embodied Learning through Virtual & Augmented Reality (KELVAR): Proc. Int. Conf., Greenville, SC, USA, 19 March, 2016*. DOI: 10.1109/KELVAR.2016.7563677
56. Olsson T. et al. User evaluation of mobile augmented reality scenarios. *Journal of Ambient Intelligence and Smart Environments*. 2012. Vol. 4, no. 1. P. 29–47. DOI: 10.3233/AIS-2011-0127
57. Dünser A., Billingham M. Evaluating augmented reality systems. *Handbook of Augmented Reality*. 2011. P. 289–307. DOI: 10.1007/978-1-4614-0064-6_13
58. Endsley T. C. et al. Augmented reality design heuristics: designing for dynamic interactions. *HFES Annual Meeting*. 2017. Vol. 61, no. 1. P. 2100–2104. DOI: 10.1177/1541931213602007
59. Ejaz A. et al. Graphic User Interface Design Principles for Designing Augmented Reality Applications. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. 2019. Vol. 10, no. 2. DOI: 10.14569/IJACSA.2019.0100228
60. Орехова А. А., Бохан К. А., Харченко В. С. Качество в использовании интерактивных параллельных программных средств. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2012 . № 1 (21). С. 127-131.
61. Orechova A., Orehov O., Kharchenko V. Human-machine interface quality assessment techniques: Green and safety issues. *10th International Conference on Digital Technologies: Proc. Int. Conf., Zilina, Slovakia, 09-11 July, 2014*. DOI: 10.1109/DT.2014.6868723

62. Misse, E. S., Villacrés, S. A., Velasco, P. M. & Andaluz, V. H. Augmented Reality System for the Assistance of Unmanned Aerial Vehicles. *15th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI)*: Proc. Int. Conf., Seville, Spain, 2020. DOI: 10.23919/CISTI49556.2020.9140958
63. Ruano S., Cuevas C., Gallego G., García, N. Augmented Reality Tool for the Situational Awareness Improvement of UAV Operators. *Sensors*. 2017. Vol. 17, no. 2, article no. 297. DOI: 10.3390/s17020297
64. Mutzenich, C., Durant, S., Helman, S. et al. Updating our understanding of situation awareness in relation to remote operators of autonomous vehicles. *Cognitive Research: Principles and Implications*. 2021. Vol. 6, article no. 9. DOI: 10.1186/s41235-021-00271-8
65. Costa C., Gomes E., Rodrigues N. et al. Augmented reality mobile digital twin for unmanned aerial vehicle wildfire prevention. *Virtual Reality*. 2025. Vol. 29, article no. 71. DOI: 10.1007/s10055-025-01145-w
66. Sautenkov O., Yaqoot Y., Lykov A. et al. FlightAR: AR Flight Assistance Interface with Multiple Video Streams and Object Detection Aimed at Immersive Drone Control. *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*: Proc. Int. Conf., Bangkok, Thailand, 2024. P. 614–619. DOI: 10.1109/ROBIO64047.2024.10907428
67. Bagassi S., Fadda T., Corsi M. Advanced human machine interfaces for drone monitoring: assessment of the technological framework for the design of an augmented reality interface. URL: https://www.icas.org/icas_archive/icas2024/data/papers/icas2024_1059_paper.pdf (last accessed: 27.11.2025)
68. Azuma R. T. A survey of augmented reality. *Teleoperators and Virtual Environments*. 1997. Vol. 6, no. 4. P. 355–385. DOI: 10.1162/pres.1997.6.4.355
69. Information Management System for Mine Action (IMSMA). UXO contamination map of Ukraine. URL: <https://ua.imsma.org/portal/apps/webappviewer/index.html?id=814d2770d197474d8ad7e8014c0a275e&locale=uk> (last accessed: 29.12.2025)

70. Green Transformation. In 2024, Ukraine recorded a record number of forest fires. URL: <https://greentransform.org.ua/u-2024-rotsi-v-ukrayini-zafiksovana-rekordna-kilkist-lisovyh-pozhezh/> (last accessed: 29.12.2025)
71. United States Department of Energy. Control of nuclear weapon data. – Washington, 2011.
72. Costa C., Gomes E., Rodrigues N. et al. Augmented reality mobile digital twin for UAV wildfire prevention. *Virtual Reality*. 2025. Vol. 29, article no. 71. DOI: 10.1007/s10055-025-01145-w
73. Sautenkov, O., Yaqoot, Y., Lykov, A. et al. FlightAR: AR Flight Assistance Interface with Multiple Video Streams and Object Detection Aimed at Immersive Drone Control, *2024 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO): Proc. Int. Conf., Bangkok, Thailand, 2024. P. 614–619.* DOI: 10.1109/ROBIO64047.2024.10907428
74. Bagassi S., Fadda T., Corsi M. Advanced human machine interfaces for drone monitoring: assessment of the technological framework for the design of an augmented reality interface. URL: https://www.icas.org/icas_archive/icas2024/data/papers/icas2024_1059_paper.pdf (last accessed: 18.11.2025)
75. Sermarini J., Maraj C., Walters L. C., Mouloua M., Kider J. T. Evaluating the Effectiveness of Augmented Reality Interfaces for Quadrupedal Robot Motion Control. *2025 ACM Symposium on Spatial User Interaction (SUI '25): Proc. Int. Conf., New York, USA, 2025. P. 1–12.* DOI: 10.1145/3694907.3765931
76. Hamacher A., Hafeez J., Csizmazia R., Whangbo T. K. Augmented Reality User Interface Evaluation – Performance Measurement of Hololens, Moverio and Mouse Input. *International Journal of Interactive Mobile Technologies*. 2019. Vol. 13, no. 3. P. 95–107. DOI: 10.3991/ijim.v13i03.10226
77. Chan W. P., Croft M. J. Design and Evaluation of an Augmented Reality Head-Mounted Display Interface for Human-Robot Teams Collaborating in Physically Shared Manufacturing Tasks. *ACM Transactions on Human-Robot Interaction*. 2022. Vol. 11, no 3. P. 1–19. DOI: 10.1145/3524082

78. Graser S., Kirschenlohr F., Böhm S. User Experience Evaluation of Augmented Reality. *17th International Conference on Advances in Human-oriented and Personalized Mechanisms, Technologies, and Services CENTRIC 2024: Proc. Int. Conf.*, Venice, Italy, 2024. P. 23–40. DOI: 10.48550/arXiv.2411.12777
79. Picardi A., Caruso G. User-Centered Evaluation Framework to Support the Interaction Design for Augmented Reality Applications. *Multimodal Technologies and Interaction*. 2024. Vol. 8, no. 5. DOI: 10.3390/mti8050041
80. Chu C.-H., Liu Y.-L. Augmented reality user interface design and experimental evaluation for human-robot collaborative assembly. *Journal of Manufacturing Systems*. 2023. Vol. 68. P. 313–324. DOI: 10.1016/j.jmsy.2023.04.007
81. Mishchuk V., Fesenko H., Kharchenko V. Deep learning models for detection of explosive ordnance using autonomous robotic systems: trade-off between accuracy and real-time processing speed. *Radioelectronic and Computer Systems*. 2024. No. 4. P. 99–111. DOI: 10.32620/reks.2024.4.09
82. Fedorenko G., Fesenko H., Kharchenko V., Kliushnikov I., Tolkunov I. Robotic-biological systems for detection and identification of explosive ordnance: concept, general structure, and models. *Radioelectronic and Computer Systems*. 2023. No. 2. P. 143–159. DOI: 10.32620/reks.2023.2.12
83. Lysyi A., Sachenko A., Radiuk P., Lysyi M. et al. Enhanced fire hazard detection in solar power plants: an integrated UAV, AI, and SCADA-based approach. *Radioelectronic and Computer Systems*. 2025. No. 2. P. 99–117. DOI: 10.32620/reks.2025.2.06
84. Hruschka P., Starke G. arc42 – Architecture documentation template. URL: <https://arc42.org> (last accessed: 20.11.2025)
85. U.S. Nuclear Regulatory Commission. NUREG-0700, Rev. 3. Human–System Interface Design Review Guidelines. Washington, DC: NRC, 2020. 585 p.
86. Usability principles. URL: <https://improvement.stanford.edu/resources/usability-principles> (last accessed: 21.03.2026)

87. NASA Task Load Index. URL: <https://www.nasa.gov/human-systems-integration-division/nasa-task-load-index-tlx/> (last accessed: 21.03.2026)
88. Abakumov, A., Kharchenko, V., & Ponochovnyi, Y. UAV Cyber Resilience Assessment Method: Combining IMECA, Penetration Testing and State-space Markov Modeling. *International Journal of Computing*. 2025. Vol. 24, no. 4, P. 790-801. DOI: 10.47839/ijc.24.4.4346
89. Kharchenko, V., Kliushnikov, I., Rucinski, A., Fesenko, H. & Illiashenko, O. UAV Fleet as a Dependable Service for Smart Cities: Model-Based Assessment and Application. *Smart Cities*. 2022. Vol. 5, no. 3. P. 1151–1178. DOI: 10.3390/smartcities5030058
90. Kabashkin I., Iskakov D., Topilskiy R., Tlepiyeva G., Sultanov T., Sansyzbayeva Z. Communication Infrastructure Design for Reliable UAV Operations in Air Mobility Corridors. *Drones*. 2025. Vol. 9, no. 6, article no. 401. DOI:10.3390/drones9060401
91. Ключніков І. Оцінка безпеки застосування безпілотних літальних апаратів з використанням марковських моделей. *Теоретичні основи розробки та експлуатації систем озброєння*. 2023. №. 4(76). С. 51–57. DOI: 10.30748/soivt.2023.76.05.
92. Kharchenko V., Ponochovnyi Y., Ivanchenko O., Fesenko H., Illiashenko O. Combining Markov and Semi-Markov Modelling for Assessing Availability and Cybersecurity of Cloud and IoT Systems. *Cryptography*. 2022. Vol. 6, no. 3, article no. 44. DOI: 10.3390/cryptography6030044

ДОДАТОК А
АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Затверджую

Проректор з науково-педагогічної роботи

Національного аерокосмічного університету

«Харківський авіаційний інститут»



Андрій ГУМЕННИЙ

2026 року

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

наукових результатів дисертаційної роботи

Канарського Євгенія Олександровича, виконаної на здобуття наукового ступеня
доктора філософії, у навчальному процесі кафедри кібербезпеки та
інтелектуальних інформаційних технологій

Комісія у складі: голови комісії — декана факультету радіоелектроніки, комп'ютерних систем та інфокомунікацій к.т.н. Олексія ОДОКІЄНКА, і членів — доцента кафедри кібербезпеки та інтелектуальних інформаційних технологій, д.т.н. Ігоря КЛЮШНІКОВА, професора кафедри кібербезпеки та інтелектуальних інформаційних технологій, к.т.н. Клайда ФУРМАНОВА, доцента кафедри кібербезпеки та інтелектуальних інформаційних технологій, к.т.н. Вячеслава ДУЖОГО встановила, що наукові результати, а саме:

- метод оцінювання якості інтерфейсів людино-машинної взаємодії на основі доповненої реальності;
 - інформаційна технологія для проведення оцінювання та вибору параметрів інтерфейсів людино-машинної взаємодії на основі доповненої реальності;
 - програмні засоби для проведення оцінювання якості інтерфейсів людино-машинної взаємодії на основі доповненої реальності,
- були використані при розробленні методичного забезпечення, яке стосується викладання питань розроблення та оцінювання якості інтерфейсів на основі доповненої реальності для забезпечення людино-машинної взаємодії.

Зазначені результати реалізовані у навчальному процесі кафедри кібербезпеки та інтелектуальних інформаційних технологій у вигляді методичного забезпечення для проведення лабораторних занять у навчальних дисциплінах «Розробка проєктів доповненої реальності»(4 години) та «Технології віртуальної та доповненої реальності»(4 години), а також при виконанні кваліфікаційних робіт магістрів кафедри за спеціальністю «Комп'ютерна інженерія».

Це дозволило покращити фундаментальність викладання матеріалу з оцінювання якості інтерфейсів людино-машинної взаємодії у сучасних інформаційних технологіях, інтерфейсів на основі доповненої реальності, наочність та практичну спрямованість навчального процесу, якість підготовки фахівців за різними напрямками навчання.

Голова комісії

Члени комісії



Олексій ОДОКІЄНКО

Ігор КЛЮШНІКОВ

Клайд ФУРМАНОВ

Вячеслав ДУЖИЙ

Затверджую

Проректор з наукової роботи

Національного аерокосмічного університету

«Харківський авіаційний інститут»

д-р наук з держ. упр., професор

Світлана ДОМБРОВСЬКА

_____ 2026 року



АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

наукових результатів дисертаційної роботи

Канарського Євгенія Олександровича,

виконаної на здобуття наукового ступеня доктора філософії,

у науково-дослідних проєктах Національного аерокосмічного університету

«Харківський авіаційний інститут»

Комісія у складі: голови — декана факультету радіоелектроніки, комп'ютерних систем та інфокомунікацій к.т.н. Олексія ОДОКІЄНКА і членів — професора кафедри кібербезпеки та інтелектуальних інформаційних технологій, к.т.н. Дмитра УЗУНА, доцента кафедри кібербезпеки та інтелектуальних інформаційних технологій, к.т.н. Артема ТЕЦЬКОГО, доцента кафедри кібербезпеки та інтелектуальних інформаційних технологій, д.т.н. Ігоря КЛЮШНІКОВА встановила, що наукові результати, а саме:

- теоретико-множинна модель і архітектура системи моніторингу потенційно небезпечних територій, де керування безпілотними літальними апаратами здійснюється з використанням інтерфейсів людино-машинної взаємодії на основі доповненої реальності, що дає змогу обґрунтовувати функціональні та нефункціональні вимоги, а також модифікувати модель життєвого циклу таких систем;

- метод оцінювання якості інтерфейсів людино-машинної взаємодії на основі доповненої реальності для систем моніторингу шляхом формування профілю вимог та множини відповідних евристик, експертного оцінювання

значень спеціальних метрик та визначення інтегрованого показника якості, що забезпечує підвищення достовірності оцінки;

– метод оцінювання готовності систем моніторингу потенційно небезпечних територій з інтерфейсами людино-машинної взаємодії на основі доповненої реальності, що, на відміну від відомих, базується на одно- та багатофрагментних марковських моделях, які враховують характеристики реактивності та безпомилковості дій операторів, часткові відмови та наявність резервних безпілотних літальних апаратів, що надає змогу аналізувати вплив значень параметрів при розрахунку функції готовності системи та здійснювати їх вибір для забезпечення відповідності вимогам, реалізовані у вигляді наукових положень і розробок, використаних при виконанні науково-дослідних проєктів за замовленням Міністерства освіти і науки України:

– «Наукові засади і методи забезпечення гарантоздатності флотів БПЛА інтелектуальних систем моніторингу потенційно небезпечних і військових об'єктів» (№ Д/Р 0121U112172, 2021-2023 рр.).

Це дозволило підвищити показники якості та точності оцінювання інтерфейсів людино-машинної взаємодії для інтелектуальних систем, які досліджувалися в рамках виконання НДР впродовж 2022-2023 рр.

Голова комісії

Члени комісії



Олексій ОДОКІЄНКО

Дмитро УЗУН

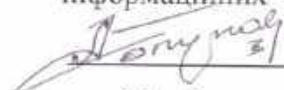
Артем ТЕЦЬКИЙ

Ігор КЛЮШНІКОВ

ЗАТВЕРДЖУЮ

УКРАЇНСЬКИЙ ОРДЕНА «ЗНАК ПОШАНИ»
 НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ ІНСТИТУТ ЛІСОВОГО
 ГОСПОДАРСТВА ТА АГРОЛІСОМЕЛІОРАЦІЇ
 ім. Г. М. ВИСОЦЬКОГО ДЕРЖАВНОГО
 АГЕНТСТВА ЛІСОВИХ РЕСУРСІВ УКРАЇНИ
 ТА НАЦІОНАЛЬНОЇ АКАДЕМІЇ НАУК УКРАЇНИ
 (УкрНДЛГА)

В.о. завідувача відділу новітніх
 інформаційних технологій, к.е.н., с.н.с.

 Анатолій Полупан
 «_20_» березня 2026 року

АКТ

реалізації наукових результатів дисертаційної роботи
 Канарського Євгенія Олександровича,
 виконаної на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Комісія у складі: голови комісії — В.о. завідувача відділу новітніх
 інформаційних технологій, к.е.н., с.н.с.

А.В.Полупан; с.н.с. Богомолів В.В.; с.н.с., к.е.н. І.Г. Филиппова, склала даний
 акт в тому, що при впровадженні інноваційних методів оцінювання якості
 людино-машинних інтерфейсів на основі доповненої реальності було
 використано наступні наукові результати дослідження Канарського Є.О. при
 тестуванні оновленої версії ГЕОПОРТАЛУ «Ліси країни»:

– метод оцінювання якості інтерфейсів людино-машинної взаємодії на
 основі доповненої реальності для систем моніторингу;

– метод оцінювання готовності систем моніторингу потенційно
 небезпечних територій з інтерфейсами людино-машинної взаємодії на основі
 доповненої реальності;

– інформаційна технологія для проведення оцінювання та вибору
 параметрів інтерфейсів людино-машинної взаємодії на основі доповненої
 реальності.

Впровадження результатів дослідження Канарського Є.О. надало змогу:

– підвищити точність оцінювання якості інтерфейсів людино-машинної
 взаємодії на основі доповненої реальності;

– підвищити якість використання інтерфейсів людино-машинної
 взаємодії на основі доповненої реальності;

– більш точно оцінювати готовність системи моніторингу потенційно
 небезпечних територій.

Голова комісії

Анатолій Полупан

ДОДАТОК Б

ЛІСТИНГИ КОДІВ ПРОГРАМНИХ ЗАСОБІВ

Скрипт симуляції ОММ1 у середовищі Scilab.

```

clc;
clear;
clf;

//system variables
//set 1

lambda_AM = 1/1;
lambda_AP = 1/2;
lambda_MA = 1/0.3333;
lambda_MP = 1/2;
lambda_MH = 1/0.0083;
mou_PA = 1/0.5;
mou_HMM = 1/0.0008;
mou_HMP = 1/2;

//set 2
/*
lambda_AM = 1/0.3333;
lambda_AP = 1/5;
lambda_MA = 1/0.1;
lambda_MP = 1/5;
lambda_MH = 1/0.0083;
mou_PA = 1/1;
mou_HMM = 1/0.0028;
mou_HMP = 1/5;
*/
//set 3
/*
lambda_AM = 1/2;
lambda_AP = 1/20;
lambda_MA = 1/0.6666;
lambda_MP = 1/20;
lambda_MH = 1/0.0083;
mou_PA = 1/2;
mou_HMM = 1/0.0083;
mou_HMP = 1/20;
*/
//system of differential equations
function tdash=f(t, p)
    tdash = [
        -(lambda_AM+lambda_AP)*p(1)+lambda_MA*p(2)+mou_PA*p(4);
        -(lambda_MA+lambda_MH+lambda_MP)*p(2)+lambda_AM*p(1)+mou_HMM*p(3);
        -(mou_HMP+mou_HMM)*p(3)+lambda_MH*p(2);
        -mou_PA*p(4)+lambda_AP*p(1)+lambda_MP*p(2)+mou_HMP*p(3);
    ];
endfunction

//initial parameters of function
t0 = 0;
t = 0:0.1:20;
p0 = [1;0;0;0];

//exe function
p = ode(p0,t0,t,f);
disp(p);

//plot

```

```

plot(tp(1,:),tp(2,:),tp(3,:),tp(4,:));

L = legend(["$P_{A}$", "$P_{M}$", "$P_{HI_{M}}$", "$P_{P}$"]);
L.font_size = 4.5;

title('', 'fontsize', 4);
xlabel('$t, hours$', 'fontsize', 4);
ylabel('$Probability, P(t)$', 'fontsize', 4);

```

Скрипт симуляції ОММ2 у середовищі Scilab.

```

clc;
clear;
clf;

//system variables
//set 1

lambda_AM = 1/1;
lambda_AP = 1/2;
lambda_MA = 1/0.3333;
lambda_MP = 1/2;
lambda_MH = 1/0.0083;
mou_PA = 1/0.5;
mou_HMM = 1/0.0008;
mou_HMP = 1/2;
lambda_HMM = 1/5;
lambda_HMMR = 1/10;
mou_MM = lambda_HMM/5;
mou_MHM = 0.8*mou_MM;
mou_MRA = mou_PA;

//set 2
/*
lambda_AM = 1/0.3333;
lambda_AP = 1/5;
lambda_MA = 1/0.1;
lambda_MP = 1/5;
lambda_MH = 1/0.0083;
mou_PA = 1/1;
mou_HMM = 1/0.0028;
mou_HMP = 1/5;
lambda_HMM = 1/10;
lambda_HMMR = 1/100;
mou_MM = lambda_HMM/20;
mou_MHM = (0.5*mou_MM);
mou_MRA = mou_PA;
*/
//set 3
/*
lambda_AM = 1/2;
lambda_AP = 1/20;
lambda_MA = 1/0.6666;
lambda_MP = 1/20;
lambda_MH = 1/0.0083;
mou_PA = 1/2;
mou_HMM = 1/0.0083;
mou_HMP = 1/20;
lambda_HMM = 1/20;
lambda_HMMR = 1/1000;
mou_MM = lambda_HMM/100;
mou_MHM = (0.2*mou_MM);
mou_MRA = mou_PA;
*/

//system of differential equations

```

```

function tdash=f(t, p)
    tdash = [
        -(lambda_AM+lambda_AP)*p(1)+mou_PA*p(4)+lambda_MA*p(2)+mou_MRA*p(6);
        -(lambda_MA+lambda_MH+lambda_MP)*p(2)+lambda_AM*p(1)+mou_HMM*p(3)+mou_MM*p(5);
        -(mou_HMM+mou_HMP+lambda_HMMR+lambda_HMM)*p(3)+lambda_MH*p(2)+mou_MHM*p(5);
        -mou_PA*p(4)+lambda_AP*p(1)+lambda_MP*p(2)+mou_HMP*p(3);
        -(mou_MM+mou_MHM)*p(5)+lambda_HMM*p(3);
        -mou_MRA*p(6)+lambda_HMMR*p(3);
    ];
endfunction

//initial parameters of function
t0 = 0;
t = 0:0.1:20;
p0 = [1;0;0;0;0;0];

//exe function
p = ode(p0,t0,t,f);
disp(p);

//plot
plot(tp(1,:),tp(2,:),tp(3,:),tp(4,:),tp(5,:),tp(6,:));
L = legend(["$P_{A}$", "$P_{M}$", "$P_{HL_{M}}$", "$P_{P}$", "$P_{F_{M}}$", "$P_{F_{MR}}$"]);

//plot(tp(1,:),tp(2,:),'-',tp(3,:),'-',tp(4,:),':',tp(1:)+p(2:)+p(3:));
//L = legend(["$P_{A}$", "$P_{M}$", "$P_{HL_{M}}$", "$P_{P}$", "$A(t)$", "by_coordinates", [51 0.8]);

//plot(tp(1,:),':',tp(2,:),'-',tp(3,:),'-',tp(4,:),'-');
//L = legend(["$P_{A}$", "$P_{M}$", "$P_{HL_{M}}$", "$P_{P}$", "by_coordinates", [20.5 0.8]);

L.font_size = 4.5;
title('','fontsize',4);
xlabel('$t, hours$', 'fontsize',4);
ylabel('$Probability, P(t)$', 'fontsize',4);

```

Скрипт симуляції ОММЗ у середовищі Scilab.

```

clc;
clear;
clf;

function dx=f(t, x)
// Параметри

//коєфіцієнти
K_AL = 0.2;
K_LMP = 1;
K_LP = 1;
K_MPL = 1;
K_MPHMP = 1;
K_MPP = 1;
K_HMPMP = 1;
K_HMPP = 1;

//змінні
lambda_AM = 1/1;
lambda_AP = 1/2;
lambda_MA = 1/0.3333;
lambda_MP = 1/2;
lambda_MH = 1/0.0083;
mou_PA = 1/0.5;
mou_HMM = 1/0.0008;
mou_HMP = 1/2;
lambda_AL = lambda_MP*K_AL;
//lambda_AL = 1/10;
mou_LMP = lambda_AM*K_LMP;

```

```

lambda_MMP = lambda_AL;
mou_LP = lambda_AP*K_LP;
lambda_MPL = lambda_MA*K_MPL;
lambda_MPHMP = lambda_MH*K_MPHMP;
lambda_MPP = lambda_MP*K_MPP;
mou_HMPMP = mou_HMM*K_HMPMP;
mou_HMPP = mou_HMP*K_HMPP;

dx = zeros(7,1);

// P(Sa)
dx(1) = lambda_MA*x(2) + mou_PA*x(3) - (lambda_AM + lambda_AP + lambda_AL)*x(1);

// P(Sm)
dx(2) = lambda_AM*x(1) + mou_HMM*x(4) - (lambda_MA + lambda_MP + lambda_MH + lambda_MMP)*x(2);

// P(Sp)
dx(3) = lambda_AP*x(1) + lambda_MP*x(2) - mou_PA*x(3) + mou_HMP*x(4) + mou_LP*x(5) + lambda_MPP*x(6) +
mou_HMPP*x(7);

// P(HIm)
dx(4) = lambda_MH*x(2) - (mou_HMM + mou_HMP)*x(4);

// P(DI)
dx(5) = lambda_AL*x(1) + lambda_MPL*x(6) - (mou_LP + mou_LMP)*x(5);

// P(Smp)
dx(6) = lambda_MMP*x(2) + mou_LMP*x(5) + mou_HMPMP*x(7) - (lambda_MPL + lambda_MPHMP + lambda_MPP)*x(6);

// P(HImp)
dx(7) = lambda_MPHMP*x(6) - (mou_HMPMP + mou_HMPP)*x(7);

endfunction

// Початкові умови
x0 = [1; 0; 0; 0; 0; 0; 0];

t0 = 0;
tf = 20;
dt = 0.1;
t = t0:dt:tf;

// Інтегрування
y = ode(x0, t0, t, f);

disp(y);
// Графіки
//plot(t, y');
plot(t, y(1,:), 't, y(2,:), t, y(3,:), t, y(4,:), t, y(5,:), t, y(6,:), t, y(7,:));
L = legend(['$P_{A}$', '$P_{M}$', '$P_{P}$', '$P_{HI_{M}}$', '$P_{D_{L}}$', '$P_{MP}$', '$P_{HI_{MP}}$']);

//plot(t, y(1,:), 't, y(2,:), '-' , t, y(3,:), '-' , t, y(4,:), '-' );
//L = legend(['$P_{A}$', '$P_{M}$', '$P_{P}$', '$P_{HI_{M}}$', "by_coordinates", [20.5 0.8]);

L.font_size = 4.5;
xlabel('t, hours', 'fontsize', 4);
ylabel('$Probability, P(t)$', 'fontsize', 4);
disp(lambda_AL);

clc;
clear;
clf;

function dx=f(t, x)

```

Скрипт симуляції ОММ4 у середовищі Scilab.

```

// Параметри

// коефіцієнти
K_AL = 0.1;
K_LMP = 1;
K_LP = 1;
K_MPL = 1;
K_MPHMP = 1;
K_MPP = 1;
K_HMPMP = 1;
K_HMPP = 1;

// змінні
lambda_AM = 1/1;
lambda_AP = 1/2;
lambda_MA = 1/0.3333;
lambda_MP = 1/2;
lambda_MH = 1/0.0083;
mou_PA = 1/0.5;
mou_HMM = 1/0.0008;
mou_HMP = 1/2;
lambda_HMM = 1/5;
lambda_HMMR = 1/10;
mou_MM = lambda_HMM/5;
// mou_MM = 0.05;
mou_MHM = 0.8*mou_MM;
mou_MRA = mou_PA;
lambda_AL = lambda_MP*K_AL;
mou_LMP = lambda_AM*K_LMP;
lambda_MMP = lambda_AL;
mou_LP = lambda_AP*K_LP;
lambda_MPL = lambda_MA*K_MPL;
lambda_MPHMP = lambda_MH*K_MPHMP;
lambda_MPP = lambda_MP*K_MPP;
mou_HMPMP = mou_HMM*K_HMPMP;
mou_HMPP = mou_HMP*K_HMPP;

dx = zeros(9,1);

// 1-Sa
dx(1) = lambda_MA*x(2) + mou_PA*x(3) - (lambda_AM + lambda_AP + lambda_AL)*x(1) + mou_MRA*x(9);

// 2-Sm
dx(2) = lambda_AM*x(1) + mou_HMM*x(4) + mou_MM*x(8) - (lambda_MA + lambda_MP + lambda_MH + lambda_MMP)*x(2);

// 3-Sp
dx(3) = lambda_AP*x(1) + lambda_MP*x(2) - mou_PA*x(3) + mou_HMP*x(4) + mou_LP*x(5) + lambda_MPP*x(6) +
mou_HMPP*x(7);

// 4-HIm
dx(4) = lambda_MH*x(2) - (mou_HMM + mou_HMP + lambda_HMM + lambda_HMMR)*x(4) + mou_MHM*x(8);

// 5-DI
dx(5) = lambda_AL*x(1) + lambda_MPL*x(6) - (mou_LP + mou_LMP)*x(5);

// 6-Smp
dx(6) = lambda_MMP*x(2) + mou_LMP*x(5) + mou_HMPMP*x(7) - (lambda_MPL + lambda_MPHMP + lambda_MPP)*x(6);

// 7-HImp
dx(7) = lambda_MPHMP*x(6) - (mou_HMPMP + mou_HMPP)*x(7);

// 8-Fm
dx(8) = lambda_HMM*x(4) - (mou_MM + mou_MHM)*x(8);

// 9-Fmr
dx(9) = lambda_HMMR*x(4) - mou_MRA*x(9);

endfunction

```

```

// Початкові умови
x0 = [1; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0];

t0 = 0;
tf = 20;
dt = 0.1;
t = t0:dt:tf;

// Інтегрування
y = ode(x0, t0, t, f);

disp(y);
// Графіки
//plot(t, y');
plot(t, y(1,:),t, y(2,:),t, y(3,:),t, y(4,:),t, y(5,:),t, y(6,:),t, y(7,:),t, y(8,:),t, y(9,:));
L =
legend(['$P_{A}$','$P_{M}$','$P_{P}$','$P_{HI_{M}}$','$P_{D_{L}}$','$P_{S_{MP}}$','$P_{HI_{MP}}$','$P_{F_{M}}$','$P_{F_{MR}}$']$"]);

//plot(t,y(1,:),'-',t,y(2:),'--',t,y(3:),'-',t,y(4:),'-');
//L = legend(['$P_{A}$','$P_{M}$','$P_{P}$','$P_{HI_{M}}$'],'by_coordinates', [20.5 0.8]);

L.font_size = 4.5;
xlabel('$t, hours$', 'fontsize', 4);
ylabel('$Probability, P(t)$', 'fontsize', 4);

```

Скрипт симуляції MMM у середовищі MATLAB.

Код модуля admin.js

```

module.exports = ({ env }) => ({
  auth: {
    secret: env('ADMIN_JWT_SECRET'),
  },
  apiToken: {
    salt: env('API_TOKEN_SALT'),
  },
  transfer: {
    token: {
      salt: env('TRANSFER_TOKEN_SALT'),
    },
  },
  flags: {
    nps: env.bool('FLAG_NPS', true),
    promoteEE: env.bool('FLAG_PROMOTE_EE', true),
  },
  watchIgnoreFiles: [
    '**/db',
    './logs',

```

```

    '**/logs',
    '**/info.log',
    '**/error.log',
  ],
});

```

Код модуля database.js

```

module.exports = ({ env }) => ({
  connection: {
    client: env("DATABASE_CLIENT", "mysql"),
    connection: {
      host: env("DATABASE_HOST", "localhost"),
      port: env.int("DATABASE_PORT", 8889),
      database: env("DATABASE_NAME", "diploma"),
      user: env("DATABASE_USERNAME", "root"),
      password: env("DATABASE_PASSWORD", "root"),
      ssl: env.bool("DATABASE_SSL", false),
      charset: "utf8mb4",
    },
  },
  debug: false,
  pool: {
    min: 0,
    max: 150,
    createTimeoutMillis: 30000,
    acquireTimeoutMillis: 600000,
    idleTimeoutMillis: 300000,
    reapIntervalMillis: 30000,
    createRetryIntervalMillis: 30000,
    propagateCreateError: false,
  },
  acquireConnectionTimeout: 600000,
  settings: {
    forceMigration: false,
    runMigrations: false,
    useTypescriptMigrations: false,
  },
},
});

```

Код модуля middlewarer.js

```

module.exports = [
  'strapi::errors',
  {
    name: 'strapi::security',
    config: {
      contentSecurityPolicy: {
        useDefaults: true,
        directives: {
          'connect-src': ["'self'", 'https:'],
          'img-src': [
            "'self'",
            'data:',
            'blob:',
            'market-assets.strapi.io',
            'market-api.strapi.io',
            'strapi.io',
          ],
          'script-src': ["'self'", 'cdn.jsdelivr.net', 'blob:'],
          'media-src': [
            "'self'",
            'data:',
            'blob:',
            'market-assets.strapi.io',
            'market-api.strapi.io',
            'strapi.io',
          ],
        },
        upgradeInsecureRequests: null,
      },
    },
  },
  {
    name: 'strapi::cors',
    config: {
      origin: [
        'http://localhost:3000',
        'http://localhost:1337',
        process.env.FRONTEND_URL,
      ].filter(Boolean),
    },
  },
];

```

```

    methods: ['GET', 'POST', 'PUT', 'PATCH', 'DELETE', 'OPTIONS'],
    headers: [
      'Content-Type',
      'Authorization',
      'Origin',
      'Accept',
      'X-Requested-With',
      'Access-Control-Allow-Origin',
    ],
    credentials: true,
    keepHeaderOnError: true,
  },
},
'strapi::poweredBy',
'strapi::logger',
'strapi::query',
{
  name: 'strapi::body',
  config: {
    formLimit: '250mb',
    jsonLimit: '250mb',
    textLimit: '250mb',
    formidable: {
      maxFileSize: 250 * 1024 * 1024,
    },
  },
},
},
{
  name: 'strapi::compression',
  config: {
    br: false,
    gzip: true,
    deflate: false,
  },
},
'strapi::favicon',
'strapi::public',
'strapi::session',
];

```

Код модуля server.js

```

module.exports = ({ env }) => ({
  host: env('HOST', '0.0.0.0'),
  port: env.int('PORT', 1337),
  app: {
    keys: env.array('APP_KEYS'),
  },
  webhooks: {
    populateRelations: env.bool('WEBHOOKS_POPULATE_RELATIONS',
false),
  },
});

```

Код модуля index.js

```

'use strict';

module.exports = {
  register(/* { strapi } */) {},

  async bootstrap({ strapi }) {
    await configurePublicPermissions(strapi);
  },
};

async function configurePublicPermissions(strapi) {
  try {
    console.log('🔧 Configuring public permissions...');

    const publicRole = await strapi
      .query('plugin::users-permissions.role')
      .findOne({ where: { type: 'public' } });

    if (!publicRole) {
      console.log(' Public role not found, skipping permissions setup');
      return;
    }

    const publicPermissions = await strapi
      .query('plugin::users-permissions.permission')

```

```

    .findMany({ where: { role: publicRole.id } });

console.log(`Found ${publicPermissions.length} permissions for public role`);

let enabledCount = 0;
for (const permission of publicPermissions) {
  if (!permission.enabled) {
    await strapi.query('plugin::users-permissions.permission').update({
      where: { id: permission.id },
      data: { enabled: true },
    });
    enabledCount++;
    console.log(` ${permission.controller}.${permission.action}`);
  }
}

if (enabledCount > 0) {
  console.log(`Enabled ${enabledCount} permissions for public role!`);
} else {
  console.log('All permissions already enabled!');
}
} catch (error) {
  console.error(' Error configuring public permissions:', error.message);
}
}

```

Код модуля `schema.json`

```

{
  "kind": "collectionType",
  "collectionName": "ai_insights",
  "info": {
    "singularName": "ai-insight",
    "pluralName": "ai-insights",
    "displayName": "AI Insight",
    "description": "AI-generated insights for aspects and overall analysis"
  },
  "options": {
    "draftAndPublish": false
  },
  "pluginOptions": {},

```

```

"attributes": {
  "aspect": {
    "type": "relation",
    "relation": "manyToOne",
    "target": "api::aspect.aspect"
  },
  "content": {
    "type": "text",
    "required": true
  },
  "isGeneral": {
    "type": "boolean",
    "default": false
  },
  "generatedAt": {
    "type": "datetime"
  }
}
}
}

```

Код модуля ai-insight.js

```

'use strict';

const { createCoreController } = require('@strapi/strapi').factories;

module.exports = createCoreController('api::ai-insight.ai-insight', ({ strapi }) =>
({
  async getLatest(ctx) {
    try {
      const insights = await strapi.entityService.findMany('api::ai-insight.ai-
insight', {
        populate: ['aspect'],
        sort: { generatedAt: 'DESC' },
      });

      const groupedInsights = {
        byAspect: {},
        general: null,
      };

```

```

    insights.forEach(insight => {
      if (insight.isGeneral) {
        if (!groupedInsights.general || new Date(insight.generatedAt) > new
Date(groupedInsights.general.generatedAt)) {
          groupedInsights.general = insight;
        }
      } else if (insight.aspect) {
        const aspectId = insight.aspect.id;
        if (!groupedInsights.byAspect[aspectId] || new Date(insight.generatedAt) >
new Date(groupedInsights.byAspect[aspectId].generatedAt)) {
          groupedInsights.byAspect[aspectId] = insight;
        }
      }
    });

    return ctx.send(groupedInsights);
  } catch (error) {
    strapi.log.error('Error fetching insights:', error);
    return ctx.internalServerError('Failed to fetch insights');
  }
},
));

```

Код модуля ai-insight.js

```

'use strict';

module.exports = {
  routes: [
    {
      method: 'GET',
      path: '/ai-insights/latest',
      handler: 'ai-insight.getLatest',
      config: {
        policies: [],
        middlewares: [],
      },
    },
  ],
};

```

Код модуля analytics.js

```
'use strict';

module.exports = {
  async getAnalytics(ctx) {
    try {
      const strapi = global.strapi;

      const aspects = await strapi.entityService.findMany('api::aspect.aspect', {
        populate: ['questions'],
      });

      const answers = await strapi.entityService.findMany('api::answer.answer', {
        populate: ['question', 'question.aspect', 'userResponse'],
      });

      const totalResponses = await strapi.entityService.count('api::user-response.user-response');

      const aspectStats = {};

      aspects.forEach(aspect => {
        aspectStats[aspect.id] = {
          id: aspect.id,
          name: aspect.name,
          description: aspect.description,
          scores: [],
          averageScore: 0,
          responseCount: 0,
        };
      });

      const responseAnswers = {};

      answers.forEach(answer => {
        if (answer.question && answer.question.aspect && answer.userResponse) {
          const aspectId = answer.question.aspect.id;
          const responseId = answer.userResponse.id;
          const isPositive = answer.question.isPositive;
```

```

const score = isPositive ? answer.value : (10 - answer.value);

if (!responseAnswers[responseId]) {
  responseAnswers[responseId] = {};
}

if (!responseAnswers[responseId][aspectId]) {
  responseAnswers[responseId][aspectId] = [];
}

responseAnswers[responseId][aspectId].push(score);
}
});

```

```

Object.values(responseAnswers).forEach(userAspects => {
  Object.entries(userAspects).forEach(([aspectId, scores]) => {
    const avgScore = scores.reduce((a, b) => a + b, 0) / scores.length;
    aspectStats[aspectId].scores.push(avgScore);
  });
});

```

```

Object.values(aspectStats).forEach(stat => {
  if (stat.scores.length > 0) {
    stat.averageScore = stat.scores.reduce((a, b) => a + b, 0) /
stat.scores.length;
    stat.minScore = Math.min(...stat.scores);
    stat.maxScore = Math.max(...stat.scores);
    stat.responseCount = stat.scores.length;
  }
});

```

```

const analyticsData = {
  totalResponses,
  aspects: Object.values(aspectStats),
  rawData: {
    answers: answers.length,
    questions: await strapi.entityService.count('api::question.question'),
  },
};

```

```

return ctx.send(analyticsData);

```

```

    } catch (error) {
      strapi.log.error('Error fetching analytics:', error);
      return ctx.internalServerError('Failed to fetch analytics');
    }
  },
};

```

Код модуля `globals.css`

```

@tailwind base;
@tailwind components;
@tailwind utilities;

:root {
  --foreground-rgb: 0, 0, 0;
  --background-start-rgb: 214, 219, 220;
  --background-end-rgb: 255, 255, 255;
}

@media (prefers-color-scheme: dark) {
  :root {
    --foreground-rgb: 255, 255, 255;
    --background-start-rgb: 0, 0, 0;
    --background-end-rgb: 0, 0, 0;
  }
}

body {
  color: rgb(var(--foreground-rgb));
  background: linear-gradient(
    to bottom,
    transparent,
    rgb(var(--background-end-rgb))
  )
  rgb(var(--background-start-rgb));
}

@layer utilities {
  .text-balance {
    text-wrap: balance;
  }
}

```

```

}

/* Custom scrollbar */
::-webkit-scrollbar {
  width: 8px;
  height: 8px;
}

::-webkit-scrollbar-track {
  background: #f1f1f1;
}

::-webkit-scrollbar-thumb {
  background: #888;
  border-radius: 4px;
}

::-webkit-scrollbar-thumb:hover {
  background: #555;
}

```

Код модуля `layout.js`

```

import { Inter } from 'next/font/google'
import './globals.css'
import { Toaster } from 'react-hot-toast'

const inter = Inter({ subsets: ['latin', 'cyrillic'] })

export const metadata = {
  title: 'AR Interface Analysis',
  description: 'Web application for AR interface analysis and evaluation',
}

export default function RootLayout({ children }) {
  return (
    <html lang="en">
      <body className={inter.className}>
        {children}
        <Toaster position="top-right" />
      </body>
    </html>
  )
}

```

```

    </html>
  )
}

```

Код модуля page.js

```

'use client';

import { useEffect, useState } from 'react';
import { useRouter } from 'next/navigation';
import { motion } from 'framer-motion';
import { fetchAnalytics, fetchAIInsights } from '@lib/api';
import ResponseDistribution from '@components/ResponseDistribution';
import DetailedBarChart from '@components/DetailedBarChart';
import ScoreDistributionChart from '@components/ScoreDistributionChart';
import TrendLineChart from '@components/TrendLineChart';
import AspectComparison from '@components/AspectComparison';
import ResponseHeatmap from '@components/ResponseHeatmap';
import QuickStats from '@components/QuickStats';
import AIInsightCard from '@components/AIInsightCard';
import StatsCard from '@components/StatsCard';
import LoadingSpinner from '@components/LoadingSpinner';
import Footer from '@components/Footer';
import MockDataBanner from '@components/MockDataBanner';
import ThankYouBanner from '@components/ThankYouBanner';
import CallToActionBanner from '@components/CallToActionBanner';

export default function HomePage() {
  const router = useRouter();
  const [analytics, setAnalytics] = useState(null);
  const [insights, setInsights] = useState(null);
  const [loading, setLoading] = useState(true);
  const [insightsLoading, setInsightsLoading] = useState(true);
  const [surveyCompleted, setSurveyCompleted] = useState(false);

  useEffect(() => {
    loadData();

    if (typeof window !== 'undefined') {
      const completed = localStorage.getItem('surveyCompleted');
      setSurveyCompleted(!completed);
    }
  });
}

```

```

    }
  }, []);

const loadData = async () => {
  try {
    setLoading(true);
    const analyticsData = await fetchAnalytics();
    setAnalytics(analyticsData);
    setLoading(false);

    setInsightsLoading(true);
    const insightsData = await fetchAllInsights();
    setInsights(insightsData);
    setInsightsLoading(false);
  } catch (error) {
    console.error('Error loading data:', error);
    setLoading(false);
    setInsightsLoading(false);
  }
};

if (loading) {
  return (
    <div className="min-h-screen flex items-center justify-center">
      <LoadingSpinner size="lg" />
    </div>
  );
}

return (
  <div className="min-h-screen bg-gradient-to-br from-gray-50 to-gray-100
flex flex-col">
    <!-- Mock Data Banner - hidden for now -->
    <!-- <MockDataBanner /> -->

    <!-- Header -->
    <header className="bg-white shadow-sm">
      <div className="max-w-7xl mx-auto px-4 py-6 sm:px-6 lg:px-8">
        <h1 className="text-3xl font-bold text-gray-900">
          AR Interface Analysis Dashboard
        </h1>

```

```

    <p className="mt-2 text-gray-600">
      Comprehensive analysis of AR interface accessibility and usability
    </p>
  </div>
</header>

<main className="flex-1 max-w-7xl mx-auto px-4 py-8 sm:px-6 lg:px-8 w-
full">

  {/* Banner - either Thank You or Call to Action */}
  <motion.div
    initial={{ opacity: 0, y: 20 }}
    animate={{ opacity: 1, y: 0 }}
    transition={{ duration: 0.5 }}
  >
    {surveyCompleted ? <ThankYouBanner /> : <CallToActionBanner />}
  </motion.div>

  {/* Stats Cards */}
  <motion.div
    initial={{ opacity: 0, y: 20 }}
    animate={{ opacity: 1, y: 0 }}
    transition={{ duration: 0.5, delay: 0.1 }}
    className="grid grid-cols-1 md:grid-cols-3 gap-6 mb-8"
  >
    <StatsCard
      title="Total Responses"
      value={analytics?.totalResponses || 0}
      color="primary"
    />
    <StatsCard
      title="Total Questions"
      value={analytics?.rawData.questions || 0}
      color="green"
    />
    <StatsCard
      title="Total Answers"
      value={analytics?.rawData.answers || 0}
      color="blue"
    />
  </motion.div>

```

```

{/* Charts */}
{analytics && analytics.aspects && analytics.aspects.length > 0 && (
◇
  {/* Quick Stats Summary */}
  <motion.div
    initial={{ opacity: 0, y: 20 }}
    animate={{ opacity: 1, y: 0 }}
    transition={{ duration: 0.5, delay: 0.2 }}
    className="mb-8"
  >
    <QuickStats aspects={analytics.aspects} />
  </motion.div>

  {/* Main Charts Row */}
  <motion.div
    initial={{ opacity: 0, y: 20 }}
    animate={{ opacity: 1, y: 0 }}
    transition={{ duration: 0.5, delay: 0.4 }}
    className="grid grid-cols-1 lg:grid-cols-2 gap-6 mb-8"
  >
    <DetailedBarChart aspects={analytics.aspects} />
    <ResponseDistribution aspects={analytics.aspects} />
  </motion.div>

  {/* Additional Charts Row */}
  <motion.div
    initial={{ opacity: 0, y: 20 }}
    animate={{ opacity: 1, y: 0 }}
    transition={{ duration: 0.5, delay: 0.5 }}
    className="grid grid-cols-1 lg:grid-cols-2 gap-6 mb-8"
  >
    <ScoreDistributionChart aspects={analytics.aspects} />
    <TrendLineChart aspects={analytics.aspects} />
  </motion.div>

  {/* More Visualizations */}
  <motion.div
    initial={{ opacity: 0, y: 20 }}
    animate={{ opacity: 1, y: 0 }}
    transition={{ duration: 0.5, delay: 0.55 }}
    className="grid grid-cols-1 lg:grid-cols-2 gap-6 mb-8"

```

```

    >
      <AspectComparison aspects={analytics.aspects} />
      <ResponseHeatmap aspects={analytics.aspects} />
    </motion.div>
  </>
)}
{/* AI Insights */}
<motion.div
  initial={{ opacity: 0, y: 20 }}
  animate={{ opacity: 1, y: 0 }}
  transition={{ duration: 0.5, delay: 0.6 }}
  className="mb-8"
  >
  <h2 className="text-2xl font-bold text-gray-900 mb-6">AI Insights</h2>
  {/* Aspect Insights */}
  {analytics && analytics.aspects && analytics.aspects.length > 0 && (
    <div className="grid grid-cols-1 md:grid-cols-2 gap-6 mb-8">
      {analytics.aspects.map((aspect) => (
        <AIInsightCard
          key={aspect.id}
          insight={insights?.byAspect?.[aspect.id]}
          isLoading={insightsLoading}
          title={aspect.name}
        />
      ))}
    </div>
  )}
  {/* General Insight - below aspect insights */}
  <div className="mt-8">
    <AIInsightCard
      insight={insights?.general}
      isLoading={insightsLoading}
      title="General Overview"
    />
  </div>
</motion.div>
</main>
<Footer />
</div>
);
}

```

Код модуля api.js

```

import axios from 'axios';
import {
  mockQuestions,
  generateMockAnalytics,
  mockAIInsights,
  MOCK_DATA_MESSAGE,
} from './mockData';

const API_URL = process.env.NEXT_PUBLIC_API_URL ||
'http://localhost:1337/api';

const api = axios.create({
  baseURL: API_URL,
  headers: {
    'Content-Type': 'application/json',
  },
  timeout: 5000, // 5 second timeout
});

let useMockData = false;
let mockDataMessageShown = false;

const showMockDataMessage = () => {
  if (!mockDataMessageShown && typeof window !== 'undefined') {
    console.log('%c' + MOCK_DATA_MESSAGE, 'background: #0ea5e9; color:
white; padding: 8px; border-radius: 4px; font-weight: bold;');
    mockDataMessageShown = true;
  }
};

export const fetchQuestions = async () => {
  if (useMockData) {
    showMockDataMessage();
    await new Promise((resolve) => setTimeout(resolve, 500));
    return mockQuestions;
  }

  try {
    const response = await api.get('/questions', {
      params: {

```

```

        populate: ['aspect', 'image'],
        sort: 'order:asc',
      },
    });
    return response.data.data;
  } catch (error) {
    console.warn('Failed to fetch questions from backend, using mock data:',
error.message);
    useMockData = true;
    showMockDataMessage();
    return mockQuestions;
  }
};

```

```

export const fetchAnalytics = async () => {
  if (useMockData) {
    showMockDataMessage();
    // Simulate network delay
    await new Promise((resolve) => setTimeout(resolve, 800));
    return generateMockAnalytics();
  }

  try {
    const response = await api.get('/analytics');
    return response.data;
  } catch (error) {
    console.warn('Failed to fetch analytics from backend, using mock data:',
error.message);
    useMockData = true;
    showMockDataMessage();
    return generateMockAnalytics();
  }
};

```

```

export const fetchAllInsights = async () => {
  if (useMockData) {
    showMockDataMessage();
    // Simulate network delay
    await new Promise((resolve) => setTimeout(resolve, 1000));
    return mockAllInsights;
  }
};

```

```

    try {
      const response = await api.get('/ai-insights/latest');
      return response.data;
    } catch (error) {
      console.warn('Failed to fetch AI insights from backend, using mock data:',
error.message);
      useMockData = true;
      showMockDataMessage();
      return mockAIInsights;
    }
  };

export const submitSurvey = async (data) => {
  if (useMockData) {
    showMockDataMessage();
    // Simulate network delay
    await new Promise((resolve) => setTimeout(resolve, 1500));
    console.log('Mock survey submission (data not saved):', data);
    return {
      message: 'Survey submitted successfully (mock mode)',
      userResponse: { id: Date.now() },
    };
  }

  try {
    const response = await api.post('/user-responses/submit', data);
    return response.data;
  } catch (error) {
    console.warn('Failed to submit survey to backend, using mock mode:',
error.message);
    useMockData = true;
    showMockDataMessage();
    return {
      message: 'Survey submitted successfully (mock mode - data not saved)',
      userResponse: { id: Date.now() },
    };
  }
};

export const isUsingMockData = () => useMockData;

```

```
export default api;
```

Код модуля `chartUtils.js`

```
// Utility functions for calculating chart statistics

/**
 * Calculate min, max, average for each aspect
 */
export const calculateAspectStatistics = (aspects) => {
  return aspects.map((aspect) => {
    if (!aspect.scores || aspect.scores.length === 0) {
      return {
        ...aspect,
        min: 0,
        max: 0,
        average: 0,
      };
    }

    const scores = aspect.scores;
    const min = Math.min(...scores);
    const max = Math.max(...scores);
    const average = scores.reduce((a, b) => a + b, 0) / scores.length;

    return {
      ...aspect,
      min: parseFloat(min.toFixed(2)),
      max: parseFloat(max.toFixed(2)),
      average: parseFloat(average.toFixed(2)),
    };
  });
};

/**
 * Prepare data for radar chart (like Dota 2 hero stats)
 */
export const prepareRadarData = (aspects) => {
  const stats = calculateAspectStatistics(aspects);
```

```

return stats.map((aspect) => ({
  aspect: aspect.name,
  max: aspect.max,
  average: aspect.average,
  min: aspect.min,
}));
});

/**
 * Calculate distribution of scores (0-10 range)
 */
export const calculateScoreDistribution = (aspects) => {
  const distribution = Array(11).fill(0).map((_, i) => ({
    score: i,
    count: 0,
  }));

  aspects.forEach((aspect) => {
    if (aspect.scores) {
      aspect.scores.forEach((score) => {
        const roundedScore = Math.round(score);
        if (roundedScore >= 0 && roundedScore <= 10) {
          distribution[roundedScore].count++;
        }
      });
    }
  });

  return distribution;
};

```

Код модуля mockData.js

```

export const mockAspects = [
  {
    id: 1,
    name: 'Accessibility',
    description: 'How accessible the interface is for all users',
  },
  {
    id: 2,

```

```

    name: 'Usability',
    description: 'Ease of use and user experience',
  },
  {
    id: 3,
    name: 'Performance',
    description: 'Speed and responsiveness',
  },
  {
    id: 4,
    name: 'Visual Design',
    description: 'Aesthetic quality and visual appeal',
  },
  {
    id: 5,
    name: 'Intuitiveness',
    description: 'How intuitive and easy to understand',
  },
];

```

```

export const mockQuestions = [
  {
    id: 1,
    text: 'Does the interface provide voice guidance for visually impaired users?',
    aspect: {
      id: 1,
      name: 'Accessibility',
    },
    isPositive: true,
    image: null,
    order: 1,
  },
  {
    id: 2,
    text: 'How difficult is it to navigate through the AR interface?',
    aspect: {
      id: 2,
      name: 'Usability',
    },
    isPositive: false, // Higher difficulty = worse
    image: null,
  },
];

```

```
    order: 2,
  },
  {
    id: 3,
    text: 'Does the interface respond quickly to your gestures and inputs?',
    aspect: {
      id: 3,
      name: 'Performance',
    },
    isPositive: true,
    image: null,
    order: 3,
  },
  {
    id: 4,
    text: 'Are the visual elements clear, well-designed, and aesthetically pleasing?',
    aspect: {
      id: 4,
      name: 'Visual Design',
    },
    isPositive: true,
    image: null,
    order: 4,
  },
  {
    id: 5,
    text: 'How confusing is the interface layout and menu structure?',
    aspect: {
      id: 5,
      name: 'Intuitiveness',
    },
    isPositive: false, // Higher confusion = worse
    image: null,
    order: 5,
  },
];

const mockUserResponses = [
  {
    id: 1,
    firstName: 'Alice',
```

```
    lastName: 'Johnson',
    email: 'alice@example.com',
    submittedAt: '2024-12-15T10:30:00Z',
  },
  {
    id: 2,
    firstName: 'Bob',
    lastName: 'Smith',
    email: 'bob@example.com',
    submittedAt: '2024-12-16T14:20:00Z',
  },
  {
    id: 3,
    firstName: 'Carol',
    lastName: 'Williams',
    email: 'carol@example.com',
    submittedAt: '2024-12-17T09:15:00Z',
  },
  {
    id: 4,
    firstName: 'David',
    lastName: 'Brown',
    email: 'david@example.com',
    submittedAt: '2024-12-18T16:45:00Z',
  },
  {
    id: 5,
    firstName: 'Emma',
    lastName: 'Davis',
    email: 'emma@example.com',
    submittedAt: '2024-12-19T11:00:00Z',
  },
];
```

```
const mockAnswers = [
  { id: 1, questionId: 1, userId: 1, value: 7 },
  { id: 2, questionId: 2, userId: 1, value: 3 },
  { id: 3, questionId: 3, userId: 1, value: 8 },
  { id: 4, questionId: 4, userId: 1, value: 9 },
  { id: 5, questionId: 5, userId: 1, value: 2 },
```

```

    { id: 6, questionId: 1, userId: 2, value: 6 },
    { id: 7, questionId: 2, userId: 2, value: 4 },
    { id: 8, questionId: 3, userId: 2, value: 7 },
    { id: 9, questionId: 4, userId: 2, value: 8 },
    { id: 10, questionId: 5, userId: 2, value: 3 },

    { id: 11, questionId: 1, userId: 3, value: 8 },
    { id: 12, questionId: 2, userId: 3, value: 2 },
    { id: 13, questionId: 3, userId: 3, value: 9 },
    { id: 14, questionId: 4, userId: 3, value: 10 },
    { id: 15, questionId: 5, userId: 3, value: 1 },

    { id: 16, questionId: 1, userId: 4, value: 5 },
    { id: 17, questionId: 2, userId: 4, value: 5 },
    { id: 18, questionId: 3, userId: 4, value: 6 },
    { id: 19, questionId: 4, userId: 4, value: 7 },
    { id: 20, questionId: 5, userId: 4, value: 4 },

    { id: 21, questionId: 1, userId: 5, value: 9 },
    { id: 22, questionId: 2, userId: 5, value: 2 },
    { id: 23, questionId: 3, userId: 5, value: 10 },
    { id: 24, questionId: 4, userId: 5, value: 9 },
    { id: 25, questionId: 5, userId: 5, value: 1 },
  ];

export const generateMockAnalytics = () => {
  const aspectScores = {};
  mockAspects.forEach((aspect) => {
    aspectScores[aspect.id] = {
      id: aspect.id,
      name: aspect.name,
      description: aspect.description,
      scores: [],
      averageScore: 0,
      responseCount: 0,
    };
  });

  // Group answers by user and calculate scores
  const userAspectScores = {};

```

```

mockAnswers.forEach((answer) => {
  const question = mockQuestions.find((q) => q.id === answer.questionId);
  if (!question) return;

  const aspectId = question.aspect.id;
  const userId = answer.userId;
  const isPositive = question.isPositive;

  // Calculate score (invert if negative question)
  const score = isPositive ? answer.value : 10 - answer.value;

  // Initialize user aspect scores
  if (!userAspectScores[userId]) {
    userAspectScores[userId] = {};
  }
  if (!userAspectScores[userId][aspectId]) {
    userAspectScores[userId][aspectId] = [];
  }

  userAspectScores[userId][aspectId].push(score);
});

// Calculate average scores per user per aspect
Object.values(userAspectScores).forEach((userScores) => {
  Object.entries(userScores).forEach(([aspectId, scores]) => {
    const avgScore = scores.reduce((a, b) => a + b, 0) / scores.length;
    aspectScores[aspectId].scores.push(avgScore);
  });
});

// Calculate statistics for each aspect
Object.values(aspectScores).forEach((stat) => {
  if (stat.scores.length > 0) {
    stat.averageScore = stat.scores.reduce((a, b) => a + b, 0) / stat.scores.length;
    stat.minScore = Math.min(...stat.scores);
    stat.maxScore = Math.max(...stat.scores);
    stat.responseCount = stat.scores.length;
  }
});

return {



```

```

totalResponses: mockUserResponses.length,
aspects: Object.values(aspectScores),
rawData: {
  answers: mockAnswers.length,
  questions: mockQuestions.length,
},
};
};

```

```

// Mock AI insights (AI generation currently disabled)
export const mockAIInsights = {
  byAspect: {
    1: {
      id: 1,
      content:
        ' AI insights generation is currently disabled. To enable AI-powered
analysis, uncomment the AI generation code in backend/src/api/user-
response/controllers/user-response.js and add your OPENAI_API_KEY to
backend/.env',
      aspect: {
        id: 1,
        name: 'Accessibility',
      },
      isGeneral: false,
      generatedAt: new Date().toISOString(),
    },
    2: {
      id: 2,
      content:
        ' AI insights generation is currently disabled. To enable AI-powered
analysis, uncomment the AI generation code in backend/src/api/user-
response/controllers/user-response.js and add your OPENAI_API_KEY to
backend/.env',
      aspect: {
        id: 2,
        name: 'Usability',
      },
      isGeneral: false,
      generatedAt: new Date().toISOString(),
    },
    3: {

```

```

    id: 3,
    content:
      '🤖 AI insights generation is currently disabled. To enable AI-powered
analysis, uncomment the AI generation code in backend/src/api/user-
response/controllers/user-response.js and add your OPENAI_API_KEY to
backend/.env',
    aspect: {
      id: 3,
      name: 'Performance',
    },
    isGeneral: false,
    generatedAt: new Date().toISOString(),
  },
  4: {
    id: 4,
    content:
      '🤖 AI insights generation is currently disabled. To enable AI-powered
analysis, uncomment the AI generation code in backend/src/api/user-
response/controllers/user-response.js and add your OPENAI_API_KEY to
backend/.env',
    aspect: {
      id: 4,
      name: 'Visual Design',
    },
    isGeneral: false,
    generatedAt: new Date().toISOString(),
  },
  5: {
    id: 5,
    content:
      '🤖 AI insights generation is currently disabled. To enable AI-powered
analysis, uncomment the AI generation code in backend/src/api/user-
response/controllers/user-response.js and add your OPENAI_API_KEY to
backend/.env',
    aspect: {
      id: 5,
      name: 'Intuitiveness',
    },
    isGeneral: false,
    generatedAt: new Date().toISOString(),
  },

```

```

    },
  },
  general: {
    id: 6,
    content:
      '🤖 AI insights generation is currently disabled. To enable comprehensive AI-
      powered analysis with detailed recommendations, you need to: 1) Uncomment the AI
      generation code in backend/src/api/user-response/controllers/user-response.js, 2) Add
      your OPENAI_API_KEY to backend/.env file. Once enabled, the system will
      automatically generate intelligent insights based on all survey responses.',
    aspect: null,
    isGeneral: true,
    generatedAt: new Date().toISOString(),
  },
};

```

```

// Helper function to check if we should use mock data
export const shouldUseMockData = () => {
  // Check if backend URL is configured
  const apiUrl = process.env.NEXT_PUBLIC_API_URL;
  return !apiUrl || apiUrl.includes('localhost:1337');
};

```

```

// Success message for mock data
export const MOCK_DATA_MESSAGE = '🇮🇹 Using demo data - backend is not
connected. Your responses will not be saved.';

```