

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ, ІНЖЕНЕРІЇ ТА ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА ЦИВІЛЬНОЇ ТА ПРОМИСЛОВОЇ БЕЗПЕКИ

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач випускової кафедри

_____ Б.Д. Халмурадов

“ ___ ” _____ 2023р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
(ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)**

ВИПУСКНИКА ОСВІТНЬО–КВАЛІФІКАЦІЙНОГО РІВНЯ

“МАГІСТР ”

Тема: «Ризик орієнтований підхід до вибору режимів експлуатації повітряних суден системи міської повітряної мобільності»

Виконавець: _____ студентка ЦБ-201нз, Кажан Катерина Іванівна
(студент, група, прізвище, ім'я, по-батькові)

Керівник: доктор технічних наук, професор Третьяков Олег Вальтерович
науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ім'я, по-батькові)

Нормоконтролер: _____
(підпис)

Федина В.П.
(П.І.Б.)

Київ 2023

НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет екологічної безпеки, інженерії та технологій

Кафедра цивільної та промислової безпеки

Спеціальність 263 «Цивільна безпека» Освітньо-професійна програма «Техногенна та промислова безпека в транспортній галузі»

Завідувач випускової кафедри

_____ Б.Д. Халмурадов

“ ____ ” _____ 2023р.

ЗАВДАННЯ

на виконання кваліфікаційної роботи

Кажан Катерини Іванівни

(П.І.Б. випускника)

1. Тема дипломної роботи: «Ризик орієнтований підхід до вибору режимів експлуатації повітряних суден системи міської повітряної мобільності» затверджена наказом ректора від 10.10.2023 №2075/ст.

2. Термін виконання роботи: з 2 жовтня 2023 року по 28 грудня 2023 року.

3. Вихідні дані до проекту: матеріали отримані під час проходження переддипломної практик, аналіз літературних даних, технічні та експлуатаційні характеристики повітряних суден.

4. Зміст пояснювальної записки: вступ, аналіз елементів системи міської повітряної мобільності та основних техногенних загроз, чинників впливу на довкілля; розробка методу багатокритеріальної оптимізації ефективності системи міської повітряної мобільності, сценарний аналіз та ілюстрація можливостей розробленого підходу, рекомендації щодо зниження рівнів техногенних ризиків системи.

5. Перелік обов'язкового ілюстративного матеріалу: таблиці, рисунки, діаграми.

6. Календарний план-графік

№ пор.	Завдання	Термін виконання	Відмітка про виконання
1.	Аналіз елементів системи міської повітряної мобільності та основних техногенних загроз	2 жовтня 2023- 20 жовтня 2023	
2.	Дослідження особливостей сприйняття населенням новітній технологій системи міської повітряної мобільності	20 жовтня 2023- 31 жовтня 2023	
3.	Оцінка переваг та недоліків системи міської повітряної мобільності в контексті сталого розвитку міського середовища	1 листопада 2023- 10 листопада 2023	
4.	Дослідження методів оцінки ризику третьої сторони при експлуатації повітряних суден системи міської повітряної мобільності	11 листопада 2023 – 17 листопада 2023 року	
5.	Розробка методу багатокритеріальної оптимізації ефективності системи міської повітряної мобільності. Розробка та аналіз сценаріїв експлуатації повітряних суден	17 листопада 2023 року – 27 листопада 2023	
6.	Розробка рекомендацій щодо зниження ризиків третьої сторони та чинників, що впливають на навколишнє середовище Висновки та рекомендації до кваліфікаційної роботи	29 листопада 2023 року – 15 грудня 2023	
7.	Передзахист кваліфікаційної роботи	15 грудня 2023	
8.	Захист кваліфікаційної роботи	29 грудня 2023	

7. Дата видачі завдання: “03” грудня 2023р

Керівник кваліфікаційної роботи:

(підпис керівника)

Третьяков О.В.
(П.І.Б.)

Завдання прийняв до виконання:

(підпис керівника)

Кажан К.І.
(П.І.Б.)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломного проекту бакалавра «Ризик орієнтований підхід до вибору режимів експлуатації повітряних суден системи міської повітряної мобільності»: 90 с., __ рис., __ табл., __ дод., __ джерел.

Об'єкт дослідження: методи зниження техногенних ризиків та чинників впливу на довкілля та населення при впровадженні та експлуатації системи міської повітряної мобільності.

Мета роботи: розробка багатокритеріального ризик-орієнтованого підходу для вибору оптимальних маршрутів та режимів експлуатації повітряних суден системи міського повітряного транспорту.

Методи дослідження: аналіз наукової інформації, методи математичного моделювання для оцінки ризиків та прогнозування експозиції небезпек, багатокритеріальної оптимізації, синтезу для розроблення моделей; аналітичний та експертний методи.

Результати магістерської роботи рекомендується використовувати на підготовчих етапах впровадження системи міського повітряного транспорту, в тому числі при виборі локацій злітно-посадкових майданчиків, обґрунтуванні маршрутів руху, проведенні процедури оцінки впливу на довкілля та оцінці готовності населення до використання новітніх транспортних засобів.

**МІСЬКА ПОВІТРЯНА МОБІЛЬНІСТЬ, РИЗИК ТРЕТЬОЇ СТРОНИ, МЕТОДИ
ЗНИЖЕННЯ ТЕХНОГЕННИХ РИЗИКІВ, ПОВІТРЯНЕ СУДНО**

ЗМІСТ

УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ.....	6
ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТЕХНОГЕННИХ РИЗИКІВ СИСТЕМИ МІСЬКОЇ ПОВІТРЯНОЇ МОБІЛЬНОСТІ В КОНТЕКСТІ СТАЛОГО РОЗВИТКУ	10
1.1. Характеристика системи міської повітряної мобільності.....	10
1.2. Основні типи повітряних суден системи міської повітряної мобільності та умови їх експлуатації	18
1.3. Особливості сприйняття суспільством основних техногенних та інших загроз при впровадженні системи міських повітряних перевезень.....	36
1.4. Переваги та виклики використання повітряних суден системи міської повітряної мобільності в контексті сталого розвитку урбанізованого середовища	41
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА ПІДХОДУ ДЛЯ ЗНИЖЕННЯ ТЕХНОГЕННИХ РИЗИКІВ ПІД ЧАС ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПОВІТРЯНИХ СУДЕН СИСТЕМИ МІСЬКОЇ ПОВІТРЯНОЇ МОБІЛЬНОСТІ.....	49
2.1 Ризик-орієнтовані методи для зниження техногенних загроз.....	49
2.2 Практика управління ризиками третьої сторони в цивільній авіації.....	52
2.3 Методи оцінки ризику третьої сторони	57
2.4 Додаткові обмеження та ризики, пов'язані з експлуатацією системи повітряного міського транспорту.....	68
2.5 Метод максимуму ентропії для оптимізації роботи системи міських повітряних перевезень із урахуванням ризиків техногенного характеру	75
РОЗДІЛ 3. ОБГРУНТУВАННЯ ВИБОРУ РЕЖИМІВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ СИСТЕМИ МІСЬКИХ ПОВІТРЯНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ	84
3.1 Підготовка вихідних даних для опису розрахункових сценаріїв за визначеними критеріями.....	84
3.2 Розрахункові сценарії для міських повітряних перевезень за критерієм ризик третьої та щільності населення.....	88
3.3 Рекомендації щодо зниження техногенного та екологічного навантаження на довкілля при експлуатації повітряних суден системи міської транспортної мобільності.....	96
ВИСНОВКИ.....	101
СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	103
ДОДАТОК I.....	108

УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

AAM – Advanced Air mobility – Удосконалена повітряна активність

FAA (USA) – Federal Aviation Administration (USA) – Федеральне авіаційне управління (США)

EASA – European Aviation Safety Agency – Європейське агентство авіаційної безпеки

ENVISA – європейська компанія, яка спеціалізується на наданні наукових та консалтингових послуг у сфері сталого розвитку цивільної авіації

eVTOL – електричні повітряні судна з вертикальним зльотом та посадкою

ICAO – International Civil Aviation Organization – Міжнародна організація цивільної авіації

NASA – National Aeronautics and Space Administration – Національне управління з аеронавтики і дослідження космічного простору

SRIA – Strategic Research and Innovation Agenda – Програма стратегічних досліджень та інновацій Європейського Союзу

UAM – Urban Air Mobility – міська повітряна мобільність

ЄС – Європейський Союз

ООН – Організація Об'єднаних Націй

ПС – повітряне судно

ПС UAM – повітряне судно системи міської повітряної мобільності

ВСТУП

Розвиток повітряного транспорту завжди був потужним каталізатором культурних, політичних і технологічних змін. Немає сумнівів, що наступне століття запровадить революційна нові види транспорту, серед яких міська повітряна мобільність (UAM) виглядає найбільш перспективною.

Нові технології, такі як підвищення ємності батарей та електричні силові установки, дозволяють розвивати нові тип повітряних суден (ПС) для міської повітряної мобільності.

Міська повітряна мобільність як система повітряного транспорту для пасажирів та вантажів у міському середовищі та його навколишніх зонах, може бути запроваджена в Європі протягом 3-5 років, пропонуючи потенціал для зелених та швидших рішень у сфері мобільності.

UAM використовує передові системи повітряного транспорту для забезпечення ефективних та надійних авіаперельотів у межах та поблизу міських територій. Це означає використання електричних ПС, таких як дрони, повітряні таксі та ПС з вертикальним зльотом і посадкою, пілотованими та керованими віддалено тощо.

Проривні технології в авіаперевезеннях приносять численні переваги, але можуть формувати додаткові ризики, які можуть уповільнювати їх впровадження як за рахунок технологічних викликів, так і через несприйняття населенням новітніх типів ПС, що будуть асоціюватися з додатковими загрозами. Це питання важливе для всіх учасників процесу перевезень (персоналу та пасажирів) та осіб, не залучених безпосередньо в процес перевезень, але таких, що можуть постраждати від можливих аварій або надзвичайних ситуацій з ПС UAM (третя сторона).

У великих містах удосконалення заходів безпеки для третьої сторони, може бути складним багатокритеріальним завданням. Поточні стандарти безпеки, які обмежуються внутрішніми вимогами до безпеки експлуатації ПС, зазвичай нехтують цим аспектом. Проте практика доводить, що велика кількість операцій в авіаперевезеннях потребує додаткових заходів для захисту населення від

додаткових техногенних ризиків, пов'язаних з експлуатацією новітніх типів ПС системи UAM. Важливо враховувати громадську безпеку та обмеження при плануванні транспортних маршрутів у містах, щоб уникнути можливих загроз для мешканців і інфраструктури.

Метою дослідження є розробка багатокритеріального ризик-орієнтованого підходу для вибору оптимальних маршрутів та режимів експлуатації повітряних суден системи міського повітряного транспорту.

Для досягнення поставленої мети було вирішено наступні завдання:

- проаналізовано основні елементи системи міського повітряного транспорту в контексті техногенної безпеки та сталого розвитку;
- досліджено чинники, які можуть впливати на ефективність експлуатації системи UAM та, зокрема на вибір режимів експлуатації ПС системи міського повітряного транспорту;
- досліджено методи управління системою UAM та типові оптимізаційні завдання;
- розроблено ризик-орієнтований підхід до управління режимами експлуатації міського повітряного транспорту;
- наведено результати для імовірних сценаріїв експлуатації ПС системи UAM;
- сформовано рекомендації на основі виконаних розрахунків.

Об'єктом дослідження є експлуатація повітряних суден системи міського повітряного транспорту.

Предметом дослідження є методи зниження техногенних ризиків та чинників впливу на довкілля та населення при впровадженні та експлуатації системи міської повітряної мобільності.

Під час даної роботи було використані такі методи дослідження: аналіз наукової інформації з літературних джерел, методи математичного моделювання для оцінки ризиків та прогнозування експозиції небезпек, а також багатокритеріальної оптимізації, синтезу для розроблення моделей, рекомендацій щодо зниження техногенних ризиків та інші. Аналітичний та експертний методи

використано з метою оцінки впливу обраних критеріїв на довкілля та населення, а також для прогнозування техногенних ризиків.

Відмінність результатів даного дослідження від отриманих раніше полягає у розробленні нового підходу до завдання оптимізації макросистеми зважаючи на імовірні характеристики мікростанів цієї системи, який реалізовано за рахунок методів максимуму ентропії системи. Застосування методів цієї групи дозволяє знаходити можливі розв'язки, здійснюючи мінімальні зміни стану системи. Це дозволяє зменшувати час розрахунків, а також при наявності вже існуючої системи здійснювати мінімальні зміни у функціонуванні налагоджених зв'язків.

Результати наукового дослідження було представлено для апробації на конференціях: у м. Києві (конференція «АВІА-2023», квітень 2023, доповідь «Electric and hybrid aircraft in terms of noise reduction», та доповідь «Моделювання авіаційного шуму в межах процедури оцінки впливу на довкілля для проекту будівництва та реконструкції аеропорту», матеріали обох у співавторстві) та Харкові (конференція «Проблеми Інформатизації – 2023», доповіді «Техногенні ризики авіатранспортної системи» та «Екологічні та техногенні загрози надзвукових повітряних суден», матеріали обох у співавторстві).

Практична цінність отриманих результатів лежить у необхідності розробки прикладних продуктів, які дозволять приймати швидкі управлінські рішення при управлінні системою УАМ з новітніми видами ПС. Результати дослідження також будуть корисними на підготовчих етапах впровадження системи міського повітряного транспорту, в тому числі при виборі локацій злітно-посадкових майданчиків, обґрунтуванні маршрутів руху, проведенні процедури оцінки впливу на довкілля та оцінці готовності населення до використання новітніх транспортних засобів.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТЕХНОГЕННИХ РИЗИКІВ СИСТЕМИ МІСЬКОЇ ПОВІТРЯНОЇ МОБІЛЬНОСТІ В КОНТЕКСТІ СТАЛОГО РОЗВИТКУ

1.1. Характеристика системи міської повітряної мобільності

Згідно з ООН, у травні 2018 року близько 55% світового населення мешкає у містах, що на 13% більше, ніж раніше [4]. Прогнозується, що до 2050 року ця цифра зросте до 68%. Понад 37 мегаполісів із понад 10 мільйонами жителів були зафіксовані у 2018 році, і очікується, що до 2030 року ця кількість збільшиться до 47. Цей постійний приріст населення міст викликає проблеми з інфраструктурою та транспортом, що призводить до заторів та обмеження швидкості руху.

Деякі заходи можуть допомогти зменшити затори, скоротити витрати палива та викиди в містах. Наприклад, покращення громадського транспорту, регулювання транспортного потоку в режимі реального часу, вибір оптимальних маршрутів, субсидування громадського автобусного сполучення, створення безпечних велосипедних доріжок і постійний моніторинг дорожніх умов для раннього виявлення джерел заторів. Однак усі ці заходи розглядають автомобільний транспорт як здебільшого двовимірний рух, що відбувається лише в одному шарі безпосередньо біля доріг. Нетрадиційний метод, який може допомогти зменшити транспортне навантаження на дороги та скоротити час для тривалих поїздок у містах, полягає у використанні третього виміру (висоти), що дозволяє пересуватися без обмеження прив'язок до асфальтованих шляхів на землі. Величезний простір приземної зони може вмістити повітряні маршрути для пересування з пункту «А» в пункт «Б». Ця концепція тривимірного транспорту є життєздатною завдяки міській повітряній мобільності (UAM) – рис. 1.1.

Міська повітряна мобільність (UAM) – це нова, безпечна, надійна та стійка система повітряних перевезень для пасажирів та вантажів у міському середовищі, що працює на основі нових технологій та інтегрована у багатомодальні транспортні перевезення. Перевезення планується здійснюється електричними літаками, що

злітають і приземлюються переважно вертикально і при цьому можуть бути як віддалено керованими або з пілотом на борту.

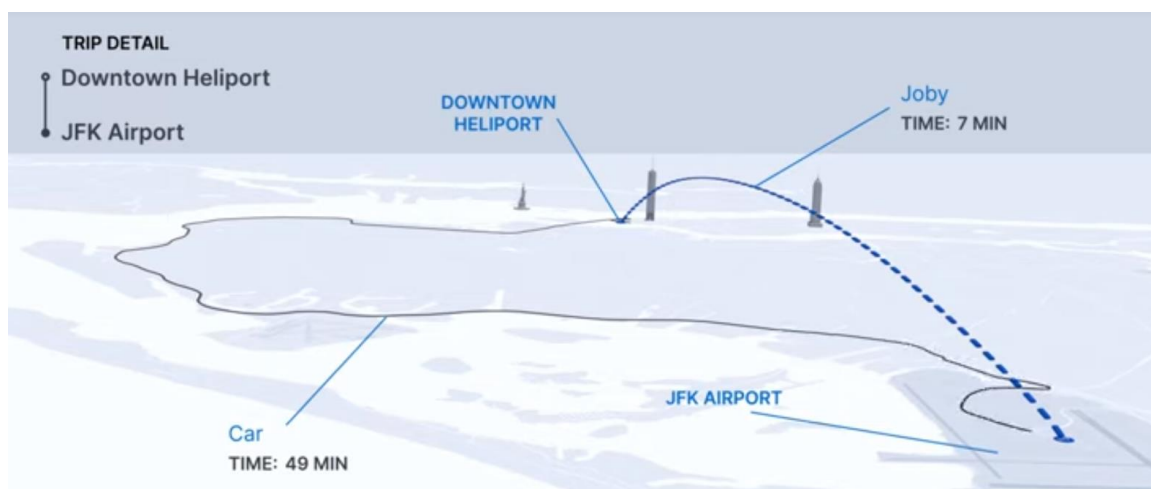


Рис. 1.1 – Порівняння ефективності автомобіля та повітряного судна в часових термінах: відстань між Нью-Йорком та аеропортом JFK, яку автомобіль (car) долає за 49 хвилин проти ПС (Joby Aviation) – за 7 хвилин.

Розвиток системи UAM стає можливим завдяки сучасним проривним технологіям у сфері легких полімерних матеріалів, застосування електричних двигунів, збільшенню ємності батареї, а також сучасним системам керування літальними апаратами. За оцінками EASA [1] очікується, що до 2030 року до 300 мільйонів осіб будуть проживати в містах з інтенсивним використанням повітряних суден (ПС) UAM.

Потенційні переваги системи UAM є досить переконливими:

- Скорочення витрат часу на дорогу;
- Зменшення кількості наземного транспорту;
- Скорочення споживання викопного палива та викидів парникових газів;
- Зменшення кількості нещасних випадків з травмуванням та смертельними наслідками;
- Економічні вигоди: створення нового ринку виробників та надання послуг, а також нові робочі місця.

Так, за оцінками EASA [1] очікується відкриття додаткових 90 000 робочих місць в Європейському регіоні в сфері надання нових послуг.

Окремі країни та організації нині орієнтуються на концепцію Удосконаленої повітряної активності (Advanced Air mobility, AAM), яку розробила NASA та підтримує FAA (USA), намагаючись підкреслити відсутність обмежень використання такої системи виключно урбанізованими територіями [2]. При цьому система UAM розглядається як підсистема нижчого рівня по відношенню до AAM. FAA в свою чергу на законодавчому рівні впроваджує AAM як систему транспортування людей та їх власності між двома точками, використовуючи ПС з просунутими технологіями, включаючи електричні ПС, або електричні ПС з вертикальним зльотом та посадкою (eVTOL) в обох контрольованому та неконтрольованому повітряних просторах [2].

При цьому, в широкому сенсі, основними елементами як системи UAM, так і більш масштабної AAM (що може використовуватися як над урбанізованими територіями, так і в якості міжміських перевезень, приміських, перевезень у віддалені куточки країни з туристичною метою тощо) є:

Управління системою

1. Державні авіаційні органи влади
2. Інші органи влади
3. Міжвідомчі робочі групи
4. Населення

Технологічна довершеність

5. Виробники UAM
6. Оператори UAM
7. Обслуговування ПС UAM та інших необхідних ресурсів

Експлуатація системи

8. Типи ПС UAM
9. Сітка злітно-посадкових майданчиків та інша інфраструктура
10. Маршрути руху ПС
11. Служби управління повітряним рухом
12. Служби безпеки

Також додаткові елементи можуть бути виділені залежно від умов експлуатації та правового поля країни, де така система впроваджується.

В даній роботі досліджується експлуатація ПС системи UAM, зважаючи що саме на цьому рівні можуть виникати додаткові техногенні ризики та загрози.

Перелічені елементи по'язані як горизонтальними, так і вертикальними зв'язками. Такі зв'язки добре визначені в звіті NASA [3] в вигляді основних компонентів системи UAM, які і визначають її межі (рис. 1.2).

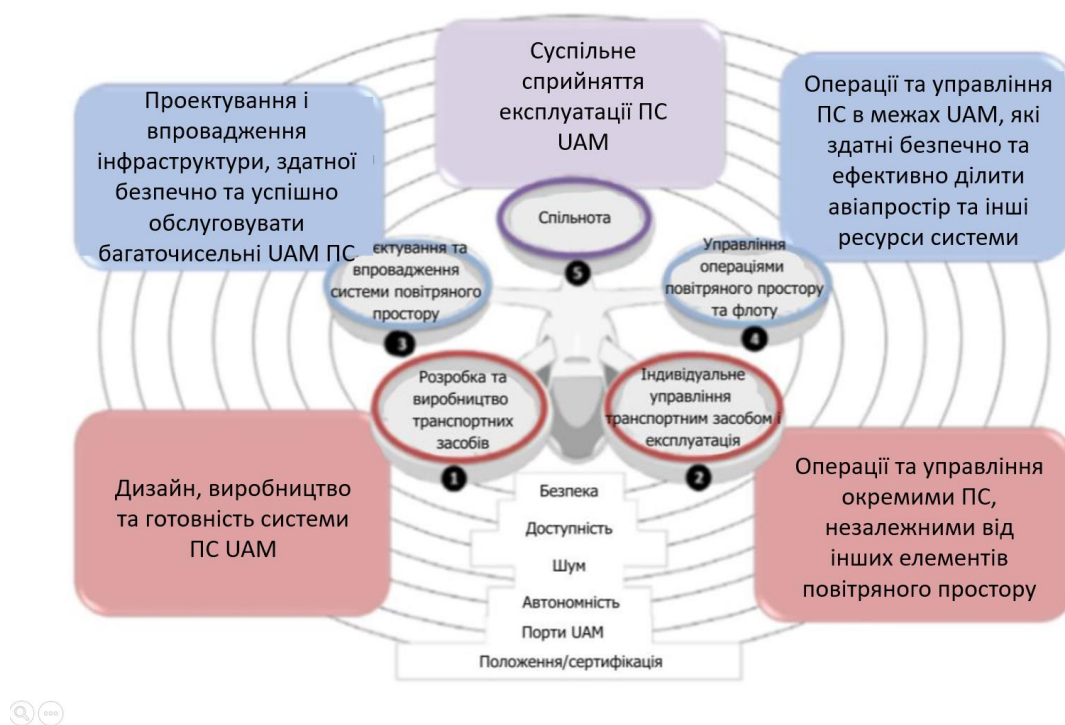


Рис. 1.2. Структура системи UAM [3]

Згідно зі схемою рис.1.2, структура системи UAM включає два напрями, що стосуються транспортного засобу, два - щодо повітряного простору та один, що стосується громадськості. Для напрямів транспортного засобу та повітряного простору, напрями зліва на рис. 1.2 стосуються проектування та виробництва транспортних засобів чи повітряного простору, а напрями справа акцентуються на експлуатації. П'ять напрямів включають:

- Напрямок 1. Розробка та виробництво транспортного засобу: проектування, сертифікація та виробництво ПС, що придатні до польотів, здатних виконувати місії, безпечно працюючи в усіх погодних умовах, необхідних для місії, з достатнім комфортом для пасажирів та достатньо низьким рівнем шуму.

- Напрямок 2. Індивідуальне керування та операції ПС: безпечна експлуатація ПС UAM в межах та навколо міст, зберігаючи відповідність усім необхідним правилам та процедурам експлуатації.

- Напрямок 3. Проектування та впровадження системи повітряного простору: Розробка, регулювання та управління повітряним простором та супутніми наземними спорудами для забезпечення безпечних, ефективних та надійних польотів UAM в межах та навколо міст.

- Напрямок 4. Управління повітряним простором та експлуатація парку ПС: надання послуг управління повітряним простором, а також послуг управління парком ПС, які забезпечують безпечну, ефективну, масштабовану та стійку експлуатацію UAM в межах та навколо міст.

- Напрямок 5. Інтеграція у спільноту: досягнення загального сприйняття UAM в межах та навколо міст за допомогою вирішення соціальних питань, пов'язаних з UAM, таких як безпека, захищеність, доступність, шум, приватність та легальність.

Відповідно до перелічених напрямів розвитку можуть бути визначені і обмеження системи UAM [3] – рис. 1.3 та табл. 1.

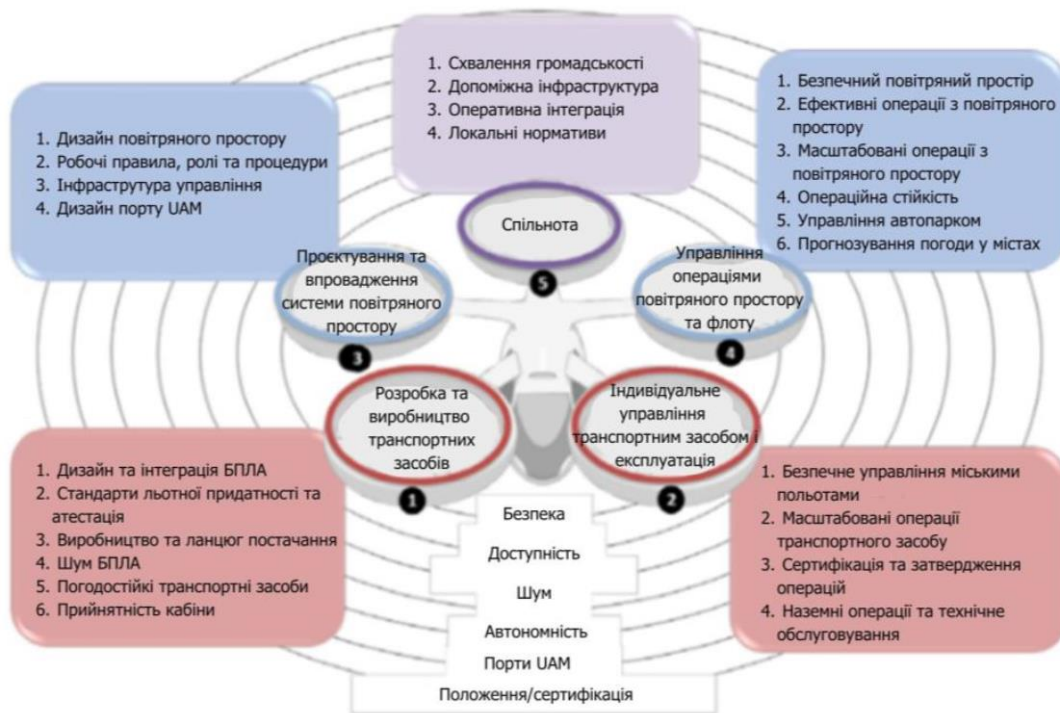


Рис. 1.3 – Бар'єри системи UAM

Таблиця 1.1 – Основні напрями розвитку та бар'єри системи UAM

Назва активності	Опис активностей
Напрямок 1. Розробка та виробництво транспортних засобів	
Проектування та інтеграція транспортного засобу	Виклики в розробці «здатних до місії» інтегрованих ПС, які сумісні з портами UAM і відповідають усім необхідним атрибутам, щоб бути безпечними; експлуатаційно та економічно конкурентоспроможні з конкуруючими видами транспорту; екологічно відповідальними і мати захист від цифрових атак.
Стандарти сертифікації льотної придатності	Виклики з початковою та триваючою сертифікацією нових та/або ПС, що стрімко розвиваються, економічно ефективним способом, включаючи розробку вимог до сертифікації та засобів відповідності для транспортних засобів і силових установок, а також забезпечення гармонізованих міжнародних правил і стандартів.
Шум транспортного засобу	Виклики в розробці ПС з прийнятними характеристиками шуму, такими як гучність і роздратування, на всіх етапах польоту, включаючи руління, зліт/відліт, заходження на посадку та посадку, а також крейсерський політ.
Погодостійкі транспортні засоби	Виклики в розробці ПС, які здатні безпечно здійснювати польоти та зберігати контроль майже за будь-яких погодних умов, включаючи обледеніння, блискавку, сильний вітер, низьку видимість, велику щільність висоти та екстремальні температури.
Прийнятність кабіни	Виклики у розробці ПМ, які забезпечують прийнятний рівень комфорту для пасажирів і захисту корисного навантаження, включаючи врахування якості пересування, шуму в салоні, внутрішнього клімат-контролю та вібрації.
Виробництво та ланцюг постачання	Виклики в розробці безпечних, сертифікованих, великих обсягів, доступних, надійних і швидких виробничих можливостей, а також надійної та масштабованої екосистеми ланцюга постачання.
Напрямок 2. Індивідуальне управління транспортним засобом і експлуатація	
Індивідуальне управління транспортним засобом і експлуатація	Проблеми з можливостями для безпечного, ефективного та зручного планування та виконання польотів у міських районах, включаючи навігаційні характеристики, достатні для міського середовища в умовах надзвичайно низької видимості, забезпечення контрольованого польоту для безпечного керування надзвичайними ситуаціями (включаючи кібератаки), а також дотримання правил і інші обмеження, такі як обмеження шуму.
Дедалі більше автоматизованих операцій транспортних засобів	Виклики у розробці високоавтоматизованих можливостей і відповідних операційних процедур для забезпечення економічно ефективно масштабованості шляхом збільшення співвідношення операцій транспортного засобу з операторами та допоміжним персоналом.
Сертифікація та схвалення діяльності	Проблеми в розробці основи та відповідних методів відповідності для цілісної сертифікації вдосконаленої автоматизації, людей та експлуатації літака UAM, а також правил і процесів затвердження для комерційних міських операцій.
Наземні операції та технічне обслуговування	Виклики з інструкціями та вимогами щодо забезпечення безпечного та ефективного технічного обслуговування та регулярного обслуговування транспортних засобів між рейсами, включаючи міркування щодо конструкції та експлуатації порту UAM.

Назва активності	Опис активностей
Напря́м 3. Проектування та впровадження системи повітряного простору	
Дизайн повітряного простору	Проблеми розробки та впровадження практичного, здійсненого, гнучкого, масштабованого, реалізованого та справедливого дизайну повітряного простору для операцій UAM, який включає міркування щодо сумісності різноманітних місій і типів ПС, розміщення UAM порти, щоб мінімізувати проблеми громади, такі як шум і конфіденційність, а також кумулятивні викиди флоту (включаючи шум і CO ₂) для місцевих громад.
Робочі правила, ролі та процедури	Виклики в розробці операційних правил, ролей, процедур і концепцій управління повітряним простором, які забезпечують безпечну та ефективну роботу та сумісні з міським середовищем, масштабовані операції, оперативну сумісність і погодні умови.
Інфраструктура засобів керування	Проблеми з розробкою та впровадженням економічно життєздатним способом достатньої, стійкої та безпечної інфраструктури зв'язку, навігації, спостереження та інформації та інфраструктури засобів контролю, включаючи спектрально ефективні канали зв'язку, навігаційні послуги, включаючи, але не обмежуючись системою глобального позиціонування, метеоспостереження високої роздільної здатності поблизу землі, можливість обліку ПС; і функціональність у міських каньйонах.
Дизайн майданчиків та вертипортів UAM	Проблеми з розумінням розробки інструкцій щодо оптимального дизайну порту UAM і процедур для підтримки очікуваної кількості операцій, включаючи безпечне поведіння з надзвичайними ситуаціями, мінімізацію шумового впливу та розробку інструкцій і стандартів проектування.
Напря́м 4: Управління повітряним простором і флотом	
Безпечні операції в повітряному просторі	Проблеми в розробці та впровадженні системи управління операціями в повітряному просторі та відповідних правил, які забезпечують безпечну, захищену, стійку, безпосередню роботу кількох транспортних засобів у обмеженому міському середовищі та забезпечують оперативну сумісність різноманітних місій і типів ПС, у тому числі в неномінальній ситуації.
Ефективні операції в повітряному просторі	Проблеми в розробці та впровадженні системи управління операціями в повітряному просторі, яка забезпечує обраний користувачем маршрут, одночасно забезпечуючи справедливий, передбачуваний доступ до повітряного простору на вимогу для різноманітних місій і типів транспортних засобів, включаючи застарілі та нові операції.
Масштабовані операції в повітряному просторі	Проблеми в розробці та впровадженні масштабованої системи управління операціями в повітряному просторі, щоб забезпечити більші обсяги повітряного руху
Стійкі операції в повітряному просторі	Проблеми в розробці та впровадженні системи управління експлуатацією повітряного простору, яка дозволяє плавно погіршити роботу UAM у відповідь на ненавмисні збої в роботі UAM-служб, таких як втрата GPS, польотних послуг, інформації про погоду; проблеми з портом UAM; і атаки на кібербезпеку.
Управління парком ПС	Виклики з масштабованими, безпечними, захищеними, доступними та ефективними службами керування операціями парку ПС, які забезпечують безпечну навігацію та ефективне керування ПС в мережі UAM оператора, одночасно керуючи

Назва активності	Опис активностей
	непередбаченими ситуаціями, задовольняючи потреби місії та мінімізуючи вплив викидів автопарку (включно з шумом і CO ₂) у спільноті.
Міський прогноз погоди	Проблеми з прогнозуванням погоди з просторовою та часовою роздільною здатністю, необхідною для підтримки безпечної роботи UAM, одночасно максимізуючи продуктивність ПС і парку в межах їх робочих можливостей, зон роботи та фактичної погоди.
Напрямок 5: Інтеграція в громаду	
Схвалення громадськості	Проблеми в досягненні суспільного визнання концепції UAM через занепокоєння щодо таких питань, як безпека, ризики, що не стосуються користувачів, безпека, доступність, наслідки збільшення автоматизації, шум і конфіденційність, а також відсутність консенсусу щодо суспільної цінності UAM.
Допоміжна інфраструктура	Виклики у розробці та впровадженні допоміжної інфраструктури, необхідної для інтеграції операцій UAM у міські райони, включаючи порти UAM, енергетичну інфраструктуру та полігони.
Оперативна інтеграція	Проблеми впровадження інтеграції мультимодального транспорту, яка враховує пов'язані з експлуатацією впливи на суспільство, включаючи безпеку пасажирів і вантажів, захист від зловмисного використання транспортних засобів і атак на відмову в обслуговуванні, а також плавну деградацію транспортної екосистеми у відповідь на збій послуг UAM.
Міське нормативне середовище та відповідальність	Проблеми в прийнятті законів і нормативних актів, що регулюють діяльність UAM (таких як зонування, конфіденційність і норми щодо шуму), прагнення до узгодженості між робочими місцями (такими як штати та муніципалітети); і розробка основи для визначення відповідальності, пов'язаної з розробкою та експлуатацією все більш автоматизованих і автономних систем.

Аналіз даних про потенційні перепони для розбудови системи UAM [3], дозволяє визначити кілька найбільш значимих викликів, які притаманні для всіх напрямів розвитку системи UAM:

- Безпека польотів. Проблеми у створенні транспортної системи UAM з рівнями безпеки, прийнятними як для користувачів, так і для широкої громадськості.

- Авіаційна безпека. Проблеми у визначенні технологій, політик, стандартів і рекомендованих практик для забезпечення прийнятної фізичної та кібербезпеки для всіх елементів системи UAM.

- Доступність. Проблеми у створенні транспортної системи UAM, яка є конкурентоспроможною за вартістю з іншими поширеними видами транспорту, щоб нею могли користуватися багато людей і підприємств.

- Шум. Проблеми у розробці та експлуатації літаків і парку ПС UAM таким чином, щоб створювати прийнятний шумовий вплив на пасажирів і громади, в яких вони працюють, включаючи дизайн повітряного простору та експлуатаційні міркування, що впливають на частоту польотів або вплив багатьох транспортних засобів, що працюють над головою одночасно.

- Автономність. Виклики, пов'язані з розробкою автономності ПС UAM та пов'язаних з ними правил, політики, стандартів і рекомендованих практик, які регулюють і допомагають забезпечити їх безпечно впровадження в систему повітряного транспорту з високим ступенем масштабування

- Улаштування злітно-посадкових майданчиків. Проблеми у проектуванні, стратегічному розміщенні та будівництві портів UAM, які

(а) можуть обслуговувати велику кількість пасажирів і різні типи ПС;

(б) не впливають неприйнятним чином на безпеку та ефективність системи повітряного простору;

(с) не викликають занепокоєння громадськості щодо шуму, конфіденційності, безпеки та доступності;

- Сертифікація та регуляторне управління. Проблеми, пов'язані з розробкою, впровадженням і дотриманням правил і процесів сертифікації на всіх рівнях управління (федеральному, штатному та місцевому), які працюють разом, щоб забезпечити безпеку та прийнятність UAM суспільством без зайвого обмеження операцій

Перелічені проблеми є основними напрямками діяльності та ранжуванням потенційних загроз для функціонування системи UAM з професійної точки зору. Перелік критеріїв, істотних з точки зору суспільства в цілому та спосіб їх ранжування може відрізнитися.

1.2. Основні типи повітряних суден системи міської повітряної мобільності та умови їх експлуатації

Основні елементи системи UAM включають: ПС та інфраструктурні об'єкти (злітно-посадкові майданчики, вертипорти тощо), повітряний простір та, зокрема, маршрути та місії, які вони здатні виконувати.

Нині існує багато різних новітніх типів ПС, які можуть бути частиною системи UAM. Вони досить сильно різняться зовнішнім виглядом, типом силової установки, розміром та льотно-технічними характеристиками (рис. 1.4).



Рис. 1.4 – Типи ПС UAM

Транспортні засоби UAM

Залежно від типу джерела енергії ПС UAM можуть бути об'єднані в такі групи (табл. 1.2). Електричні ПС – ці транспортні засоби для UAM головним чином працюють на електричних системах. Вони використовують акумулятори для живлення електромоторів, що пропонує більш екологічний та чистий спосіб транспортування порівняно з традиційними двигунами з внутрішнього згорання. Електричні літаки можуть включати як вертикальні злітно-посадкові (eVTOL), так і фіксовані крило конфігурації.

Гібридні електричні літаки – в цих ПС об'єднують електричний привід і традиційні системи викопного палива. Зазвичай вони використовують комбінацію

аккумуляторів і двигунів внутрішнього згорання для генерації енергії, забезпечуючи компроміс між дальністю польоту та ефективністю.

Водневі літаки. Деякі концепції міської повітряної мобільності досліджують використання водневих паливних елементів як альтернативи аккумуляторам чи традиційним паливним системам. Літаки, що працюють на водні, виробляють електроенергію через хімічну реакцію, виділяючи лише водяну пару як продукт, що може мати переваги в плані дальності польоту та зменшення впливу на довкілля.

Літаки на біопаливі. Ще один можливий джерело енергії для ПС UAM - це біопалива, вироблені з відновлюваних органічних матеріалів. Їх можна використовувати в двигунах з внутрішнім згоранням або модифікованих системах приводу для зменшення залежності від викопних палив.

Таблиця 1.2 – Приклади ПС UAM

Група	Назва літака	Вага
Електричні	Joby Aviation	1500 кг
Електричні	Alice Aircraft	3500 кг
Гібридні електричні	Airbus CityAirbus	2000 кг
Гібридні електричні	Hybrid Air Vehicles (HAV)	5000 кг
Водневі	ZeroAvia	1800 кг
Водневі	HES Energy Systems	2500 кг
Літаки на біопаливі	Rolls-Royce E-Fan X	2800 кг
Літаки на біопаливі	BioPulse	2100 кг

Найбільш перспективними та пошреними нині є ПС eVTOL, які мають ряд переваг економічного, екологічного та безпекового характеру.

Залежно від дизайну, розрізняють мультироторні, з рухомим ротором/крилом та традиційні eVTOL (рис 1.5).

Мультироторні eVTOL не мають крил або мають дуже маленькі крила. Вони використовують пропелери або двигуни, що спрямовують свій струмінь вниз, і базують свої маневри на зміні обертів одного або кількох роторів. Багато виробників eVTOL, як-от Lift Aircraft з «Hexa», Rotor X з «RX eTransporter» або SkyDrive з «SD-03», вибрали цю схему для перельотів на короткі дистанції та точного позиціонування в умовах міського середовища eVTOL з системою нахилу.



Рис 1.5 – Типи eVTOL: а - EHang 184; б) Joby Aviation; в) Vertical Aerospace VX4

Конструкція з рухомим гвинтом схожа на підйомно-крейсерський літак, але з рухомим ротором. Це можна зробити двома способами: змусивши ротори нахилитися або зробити все крило рухомим. eVTOL злітають вертикально з двигунами, спрямованими вниз, як мультикоптери, а потім змінюють напрямок, щоб створити більшу тягу горизонтально.

Традиційні eVTOL найбільше схожі на літаки. Вони мають фіксовані крила та ротори, які дозволяють їм злітати вертикально, а інші горизонтальні ротори рухаються горизонтально, коли вони в повітрі. Простота такої конструкції, легкість обслуговування та оптимальна вартість зробили цю конфігурацію улюбленою серед сучасних виробників eVTOL. Приклади eVTOL, що використовують цю конструкцію, включають «VX4» Vertical Aerospace, «ALIA-250» Beta та «Cora» Wisk.

Система управління. Управління цими типами транспортних засобів може бути повністю автономним (керується з землі або з самого літака) або може мати бортовий джойстик для допоміжного ручного керування. Розроблений на основі стандартів якості DO178C і DO254, резервний автопілот Veronte 4x компанії Embention повністю готовий до сертифікації будь-якого типу eVTOL. Autopilot 4x був розроблений таким

чином, щоб не мати єдиної точки відмови, що означає, що навіть якщо одне з ядер виходить з ладу або навіть у разі збою рефері, eVTOL все одно може працювати повністю з другим або навіть третім ядром.

Транспортні засоби UAM можуть бути керованими пілотом, який перебуває на борту ПС, або дистанційно керованими (з землі чи за допомогою автопілоту). Для сприйняття суспільством ПС без пілота на борту ПС очікується що потрібно буде більше часу та ресурсів.

З метою ефективного управління безпекою UAM ПС об'єднують у три групи:

Відкрита категорія: цивільні дрони вагою менше 25 кг утворюють відкриту категорію. Вони універсальні та можуть виконувати такі ролі, як спостереження, моніторинг і невеликі доставки.

Спеціальна категорія: безпілотні літальні апарати з вищими факторами ризику, такі як польоти за межами прямої видимості, перенесення більшого корисного вантажу або робота в міських умовах, потрапляють до цієї категорії. Ці дрони вимагають більш складних механізмів управління та безпеки.

Сертифікована категорія: ця категорія передбачає операції з найвищим ризиком, включаючи авіатаксі, що перевозять пасажирів. Ці літаки потребують суворих процесів сертифікації, подібних до пілотованої авіації, щоб забезпечити безпеку пасажирів.

Відповідно до Регламенту Європейського Союзу 2019/947, дрони для цивільних потреб поділяються на три категорії, враховуючи їхню вагу, технічні характеристики та тип операцій. Перша, найменш ризикована категорія – "відкрита" – є базовою для більшості комерційних дронів. Цю категорію поділено на три підкатегорії для точнішої класифікації та визначення правил експлуатації. Дрони підкатегорії A1 (максимальна вага 250 г) можуть літати в міських районах без додаткових дозволів. A2 (від 250 г до 2 кг) потребують триматися безпечної відстані від людей, тоді як A3 (від 2 до 25 кг) заборонені над натовпом.

Друга категорія – «Спеціальна» – охоплює дрони з більшим ризиком та вагою понад 25 кг, які застосовуються в комерційних та промислових галузях, особливо в

аерофотозйомці та рятувальних операціях. Для цієї категорії потрібний дозвіл від національного авіаційного управління штату реєстрації.

Остання категорія – «Сертифікована» – включає дрони для використання в операціях з високим ризиком, таких як перевезення вантажів або людей. Ці дрони потребують сертифікації EASA та відповідності суворим стандартам безпеки. Для їхньої експлуатації потрібне схвалення компетентного органу та ліцензія для дистанційного пілота. У майбутньому передбачається зростання рівня автоматизації дронів до повністю автономних без необхідності втручання пілота.

Також важливим може виявитися призначення того чи іншого польоту транспортного засобу UAM. Польоти ПС UAM можуть бути використані для спостереження за станом об'єктів чи процесів, а також для вантажних та пасажирських перевезень. Зокрема, найбільш перспективними є такі перевезення [1]:

1. Міські транспортні перевезення:

- 1.1 шатли в аеропорт
- 1.2 фіксована міська мережа перевезень
- 1.3 огляд туристичних місць

2 Приміські або регіональні перевезення до 100 км:

- 2.1 фіксована приміська мережа
- 2.2 гнучкий приміський трансфер з точки в точку

3 Регіональні міжміські перевезення:

- 3.1 фіксована регіональна мережа
- 3.2 гнучкі регіональні перевезення з точки в точку

4 Перевезення в випадку надзвичайних ситуацій:

- 4.1 перша допомога
- 4.2 транспортування пацієнта
- 5 Управління надзвичайними ситуаціями та катастрофами
 - 5.1 оцінка розмірів катастрофи та зони охоплення стихійним лихом
 - 5.2 спостереження за пожежами
 - 5.3 гасіння пожеж
 - 5.4 рятування людей з зони катастрофи чи надзвичайної ситуації

6 Доставка продуктів та товарів

- 6.1 доставка медичних препаратів та матеріалів для госпіталів
- 6.2 доставка життєво-необхідних товарів в регіони з катастрофами
- 6.3 доставка товарів до споживача (остання миля)
- 6.4 доставка в приватні будинки
- 6.5 доставка товарів в хаби міської забудови
- 6.6 доставка важких товарів
- 6.7 доставка товарів для промислового використання
- 6.8 доставка припасів в сільську місцевість

Перелічені транспортні сполучення мають свої особливості та цінність з точки зору суспільства. За умови обмежень пропускної здатності окремих елементів системи UAM функціональне призначення рейсу буде відігравати важливу роль.

Наземна інфраструктура

Для ефективного функціонування системи UAM необхідні вертипорти для обслуговування різних розмірів літаків eVTOL. Наземна інфраструктура вимагатиме комплексної оцінки та проектування, інтегрованого з умовами конкретного міста. Компанії повинні будуть відповідати вимогам інтегрованої UAM ConOps і відповідати нормам на етапах планування, проектування та експлуатації. Перед будівництвом вертипорту оператори повинні переконатися, що вони відповідають усім вимогам щодо безпечної, надійної та масштабованої роботи.⁵ Крім того, важливим буде вирішення питань, пов'язаних із сертифікацією (вертипорти та екіпажі), а також спостереженням і безпекою. до впровадження UAM.

Ми можемо розділити наземну інфраструктуру на пасажирські та вантажні злітно-посадкові майданчики, або ж на три більш широкі категорії: вертихаби, вертипорти та вертистанції (рис. 1.4) [7].

Вертихаби. Подібно до невеликих аеропортів, вертихаби, розташовані на периферії міських або приміських районів, ймовірно, будуть найбільшою наземною інфраструктурою UAM. На додаток до місця посадки та висадки людей і вантажів, хаб може служити центральним місцем для eVTOL, що літають у певній географічній зоні, з принаймні одним хабом у кожному місті. Операторам потрібно буде оснастити

вертихаби інфраструктурою для операцій з технічного обслуговування, ремонту та капітального ремонту для флоту, місцями парковки для далекомагістральних eVTOL і централізованою загальноміською системою керування операціями. Вертихаби можуть бути розроблені відповідно до вимог обслуговування автопарку, а також для стійкості, щоб забезпечити безперервність роботи під час незапланованих збоїв. Необхідно розглянути питання, що виходять за межі операцій флоту, наприклад, надання офісних приміщень для персоналу, а також навчання та розміщення для пілотів та сервісних інженерів.

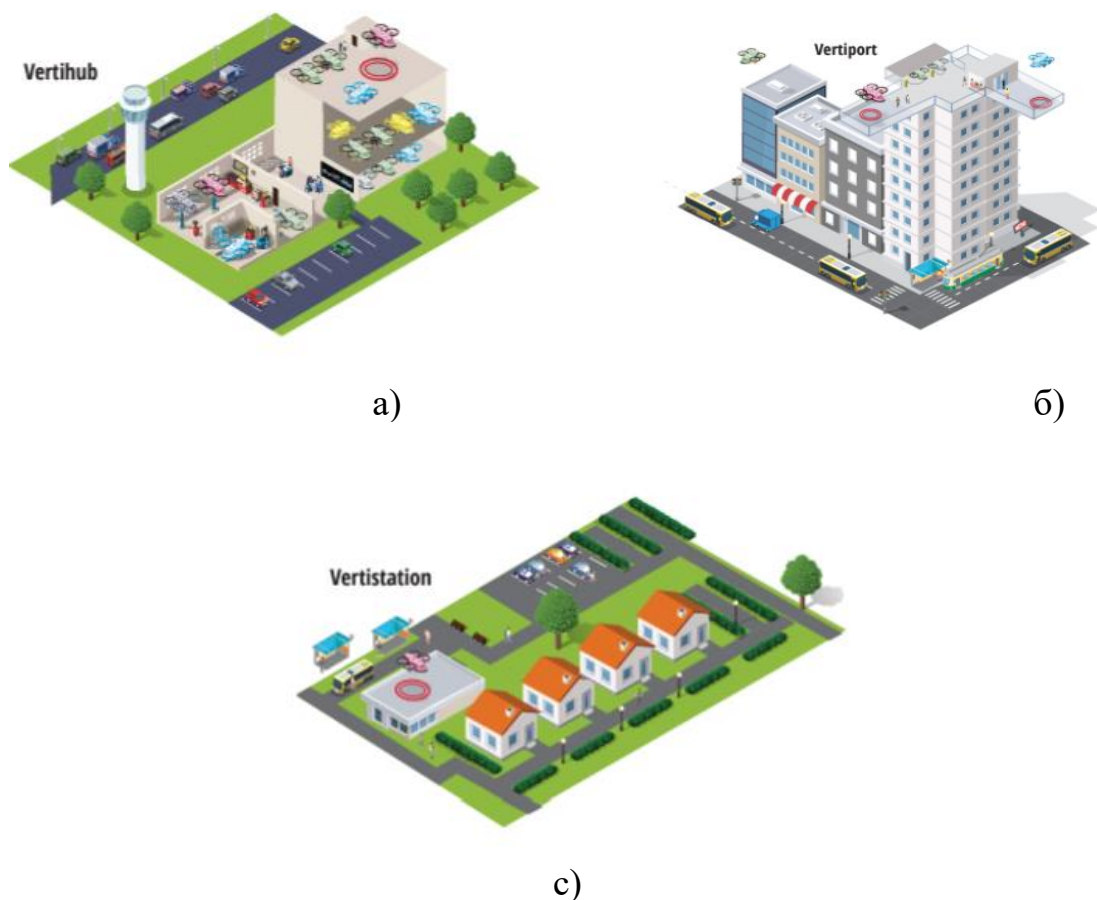


Рис.1.4 – Типи наземної інфраструктури UAM: а) хаб; б) вертипорт; в) вертистанція [7]

Вертипорти – це ключові майданчики для зльоту та посадки у місті. Операторам слід розташовувати їх у центрі та важливих місцях призначення, де інтегруються з іншими видами транспорту, такими як метро та поїзди. Вертипорти можуть потребувати менше місця, ніж хаби, і обладнані системами швидкої зарядки, але, швидше за все, не мають майданчиків для далекомагістральних eVTOL.

Вертистації – це невеликі елементи мережі, які зазвичай мають одну або дві посадкові площадки. Їх можна легко створити на базі існуючих вертолітних майданчиків, враховуючи їхню компактність. Ці майданчики не потребують значних витрат на встановлення, але можуть забезпечувати базові сервіси, такі як моніторинг погоди та контрольно-пропускні пункти. Вони можуть розширити можливості обслуговування в приміських районах та легко інтегруватися з існуючими засобами прийому та доставки вантажів.

Таким чином, спектр транспортних засобів UAM та їх потенційних функціональних можливостей надзвичайно великий: вони істотно різняться та зовнішнім виглядом, вагою, функціональним призначенням, рівнями створюваного шуму, але до всіх цих ПС мають бути застосовані одні й ті ж вимоги безпеки та прийнятні рівні ризику.

Управління повітряних рухом

Для безпечної експлуатації цих нових типів транспортних засобів вони повинні бути інтегровані в існуючий повітряний простір. Різноманітні дослідницькі проекти нині активно працюють над такими завданнями в Європейському регіоні.

Типовий дизайн системи управління повітряним рухом UAM та її взаємодія з системою управління повітряним рухом для традиційних ПС ЦА представлено на рис. 1.5.

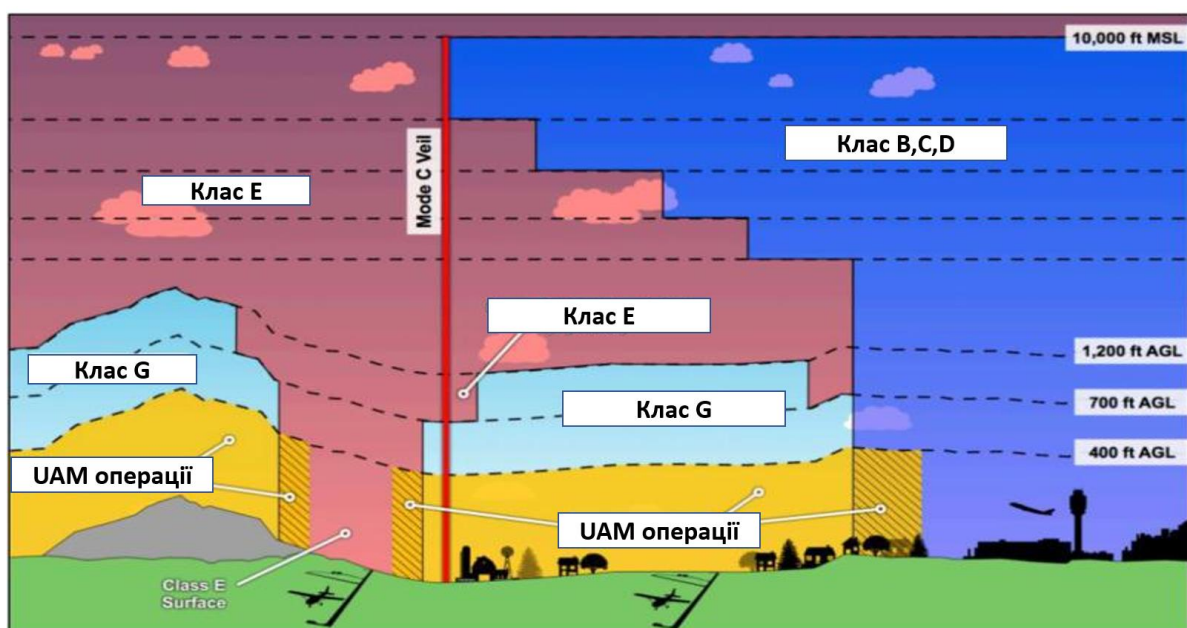


Рис. 1.5 – Спосіб інтеграції системи управління повітряним рухом УТМ в загальну АТМ

Найважливіші виклики та потреби в дослідженнях та інноваціях для повної інтеграції дронів [8]:

- дозрівання, перевірка та розгортання фундаментальних послуг U-space (U1 та U2) по всій Європі;
- розробка розширених служб U-space (U3 і U4) для забезпечення місій UAS/UAM в умовах високої щільності трафіку та складних сценаріїв;
- увімкнення UAM шляхом розробки концепцій і рішень для інтеграції автономних операцій над населеним, складним і перевантаженим середовищем повітряного простору;
- визначення систем та інтерфейсів для бездоганної інтеграції АТМ, UAM та U-space;
- розробка концепцій і рішень з урахуванням соціального визнання, впливу на навколишнє середовище та сталого розвитку (наприклад, UAM шум, візуальне забруднення, конфіденційність, викиди та переробка/управління ресурсами);
- розробка концепцій застосування U-космосу над повітряним простором дуже низького рівня.

Одним із головних викликів на наступні роки буде гармонізація процедур, систем і вимог до транснаціонального впровадження U-space і UAM. Тут буде необхідна тісна координація механізмів впровадження та гнучких систем для врахування національних відмінностей впровадження, щоб запобігти ізольованим рішенням і сприяти поширенню на ринку інноваційних додатків безпілотників і аеротаксі в Європі. Це значною мірою залежатиме від вищих рівнів цифровізації та автоматизації, особливо щодо бачення повної інтеграції пілотованого та безпілотного руху, а в довгостроковій перспективі з іншими видами транспорту (наприклад, поїздами, трамваями, автомобілями, кораблями) в майбутній транспортній системі. Це бачення включено в Стратегію безпілотників ЄС 2.0, а потреби та вимоги,

визначені для реалізації цього бачення, описано в SRIA для Цифрового європейського неба.

Основні напрями для подальших удосконалень, пов'язані з розробкою системи управління повітряним рухом UAM визначені в роботі [35] наступним чином:

- розуміння ключових характеристик ризику, пов'язаного з управлінням повітряним рухом;
- наземний і повітряний ризик;
- розробка моделі повітряного простору, яка підтримуватиме роботу UAM;
- здатність здійснювати деконфлікт, оптимізацію та обробку надзвичайних подій у режимі реального часу 4D;
- розробка конфігурованої, обчислювально масштабованої, високоавтоматизованої системи управління повітряним рухом, яку можна адаптувати для будь-якого міста чи міського середовища.

Це показує, що вплив на рівні техногенного ризику системи управління повітряним рухом буде визначальним, особливо на перших етапах експлуатації системи UAM.

Об'єкти та процеси в навколишньому середовищі як чинники, що визначають структуру системи UAM

Рельєф місцевості та штучні перешкоди мають певні особливості для експлуатації ПС UAM у порівнянні з традиційними літками. Просте порівняння між експлуатацією комерційного літака та автомобіля UAM узагальнено на рис. 1.6 [29].

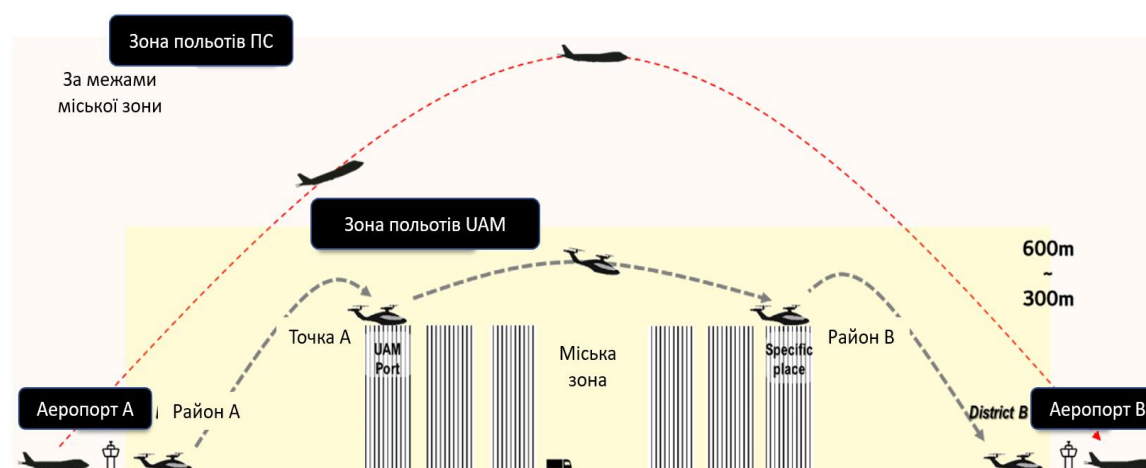


Рис. 1.6 – Маршрути польотів повітряних суден і транспортних засобів UAM

ПС UAM може злітати та приземлятися в будь-якій точці; отже, він може вільно літати за такими маршрутами: Аеропорт А (Район А) ↔ Аеропорт В (Район В), Аеропорт А (Район А) ↔ Порт UAM (Точка А), Порт UAM (Точка А) ↔ Конкретне місце (Точка В), а конкретне місце (точка В) ↔ аеропорт В (район В). Крім того, маршрут кожного району та пункту буде різним залежно від погоди, вітру та стану літака. Таким чином, прогнозування траєкторії польоту літака UAM буде складним завданням.

По-перше, транспортні засоби UAM літають на висоті, яка набагато нижча за висоту траєкторії польоту комерційного ПС, як показано на рис. 1.6. Цю висоту можна порівняти з висотою будівель у місті. По-друге, діапазон коливань траєкторії польоту більший, ніж у комерційних ПС. Традиційні літаки літають за встановленими маршрутами; однак транспортні засоби UAM можуть змінюються та рухаються різними маршрутами.

Наземний ризик включає всі об'єкти та дії, які розташовані на землі — деякі з цих об'єктів та діяльності можуть становити небезпеку та діяти як небезпека для роботи ПС над головою, і, навпаки, робота ПС може становити небезпеку для цих самих об'єктів та дій на землі.

Топографія, інфраструктура, будівлі та людська діяльність, як правило, матимуть багатовимірний просторово-часовий атрибут, який представляє, як ці об'єкти впливають на роботу ПС. Простим прикладом є високий церковний шпиль (рис. 1.6), який тягнеться в повітря, але представляє небезпеку лише для максимальних розмірів шпиля (ширина, довжина та висота) і, якщо його не ідентифіковано та чітко не позначено, може становити небезпеку для ПС, як показано на рис. 1.6. У альтернативному сценарії великий рівнинний і жвавий рекреаційний парк у центрі міста вразливий для літаючих безпілотників, і, можливо, його потрібно буде представити 3D-полігоном, який простягається вертикально до максимальної висоти міського повітряного простору.

Цей тривимірний багатокутник також може мати додаткові часові атрибути, що вказують, коли він може бути відкритим для громадськості та активним (рис. 1.7). Моделювання ризику з точки зору наземних об'єктів, які становлять небезпеку для ПС UAM, зазвичай є простим, оскільки у більшості випадків їх розташування та розміри відомі. Однак ризик моделювання вразливих наземних територій і діяльності в межах міст та приміських територій є проблематичним, оскільки ПС будуть часто перебувати над цими місцями. Крім того, вразливу людську діяльність у реальному часі не завжди легко точно визначити в столичній зоні.

Додаткові набори даних ГІС (наприклад, адміністративні межі, землекористування, територія власників тощо або більш детальні класи землекористування, наприклад, житлові, освітні, рекреаційні, роздрібні, промислові та транспортні) можуть бути необхідні для визначення параметрів функціонування системи UAM, в тому числі в контексті громадської безпеки. Деякі з цих класів можуть бути додатково поділені (наприклад, житлова зона може бути додатково поділена на житло, зелені зони та вулиці), як показано на рис. 1.8.

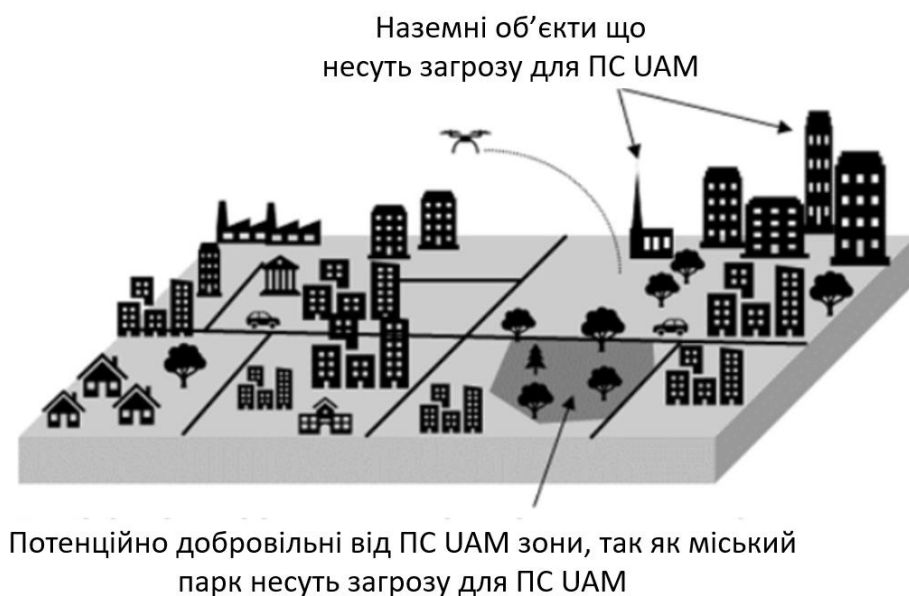


Рис. 1.7 – Потенційні загрози з навколишнього середовища для безпечної експлуатації ПС UAM [35]

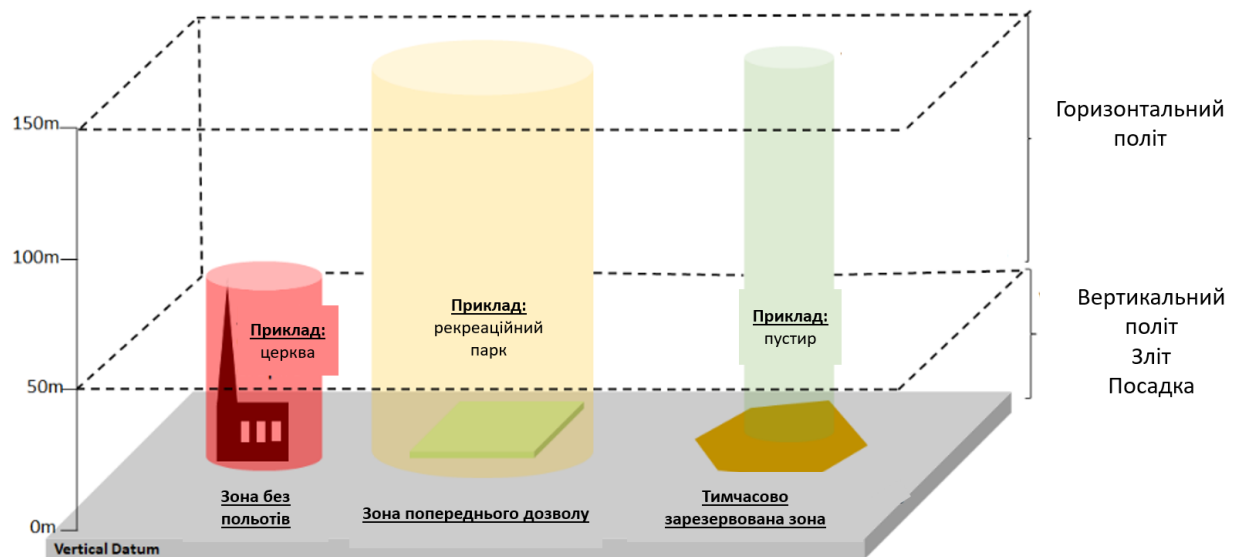


Рис. 1.8 – Шляхи усунення потенційних загроз засобами управління повітряним рухом [35]

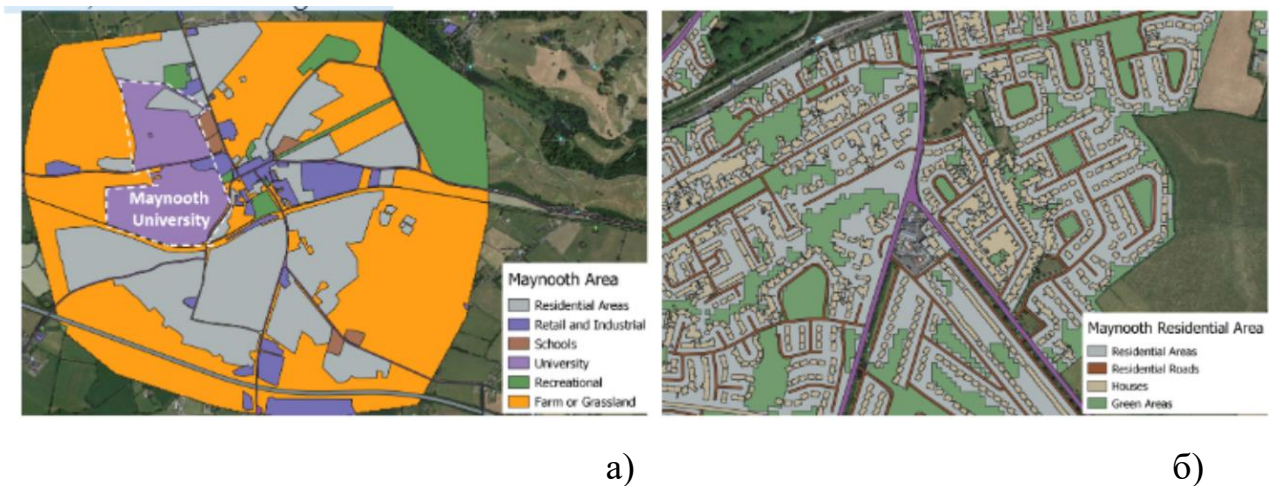


Рис. 1.9 – Приклади даних ГІС щодо призначення територій
 а) зонування міста за функціональним призначенням; б) детальне зонування території

Такими джерелами інформації можуть бути плани міського розвитку, детальні плани територій тощо.

Дані щодо щільності населення

Також при розробленні сітки станцій та маршрутів слід враховувати щільність населення, що проживає на території, що буде обслуговуватися. Карти щільності населення для території, що досліджується (подібні до зображеної на рис. 1.13), слід

використовувати як для розробки маршрутів руху (чи трас руху ПС, рис. 1.14) та для управління ризиками, рівнями шуму та іншими значущими чинниками при експлуатації UAM.

Більшість досліджень використовують дані перепису населення щоб оцінити щільність населення [36], хоча такі дані мають низку недоліків. Зокрема, вони мають низьку просторову роздільну здатність і обмежену часову інформацію.

В дослідженні [37] показано, що щільність населення змінюється залежно від регіональних особливостей. Автори встановили значення щільності населення як 5 на 1 будівлю в містах, 20 на квадратний кілометр у сільськогосподарській місцевості та 10 на квадратний кілометр у лісі. Виходячи з цього припущення, дані перепису та супутникові знімки були використані для уточнення щільності населення.

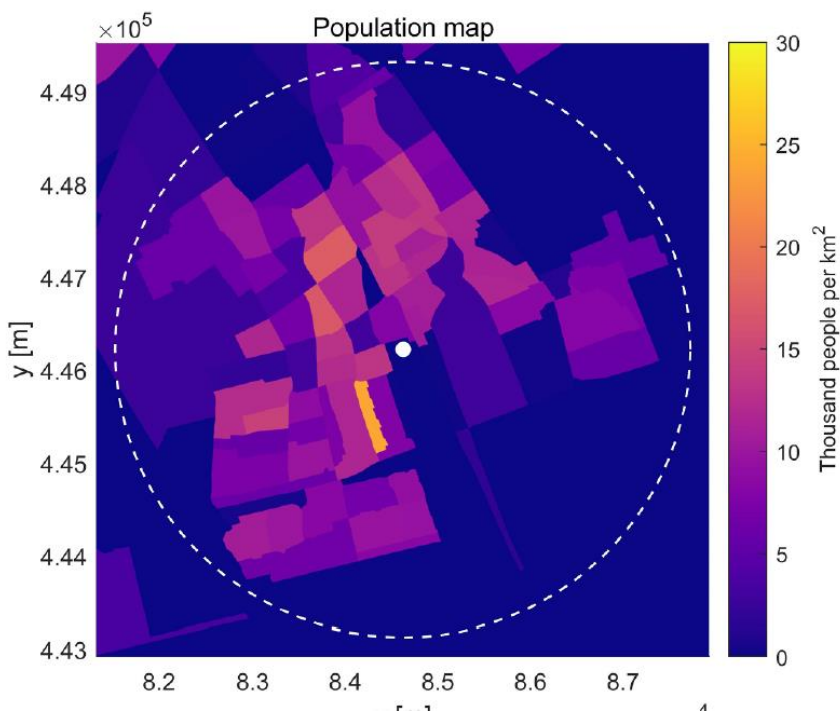


Рис. 1.10 – Розташування хабу, радіус обслуговування та щільність населення, тисячі осіб на 1 км²

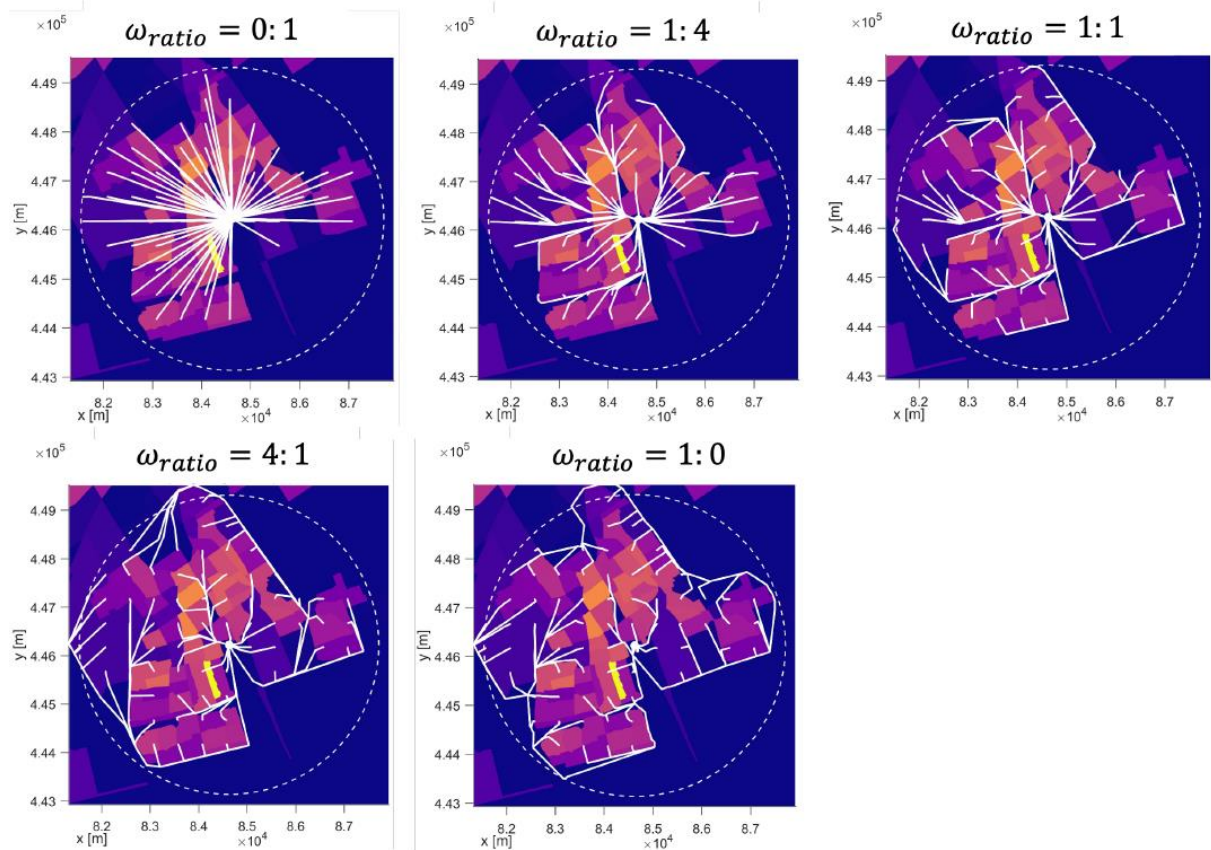


Рис. 1.11 – Прогнозовані маршрути з різними коефіцієнтами ваги ризику ω_{ratio} [13]

Слід відмінити, що для українських міст переважно відсутні офіційні дані щодо щільності населення. Доступні методика визначення щільності населення на основі картографічних матеріалів включають напівемпіричні моделі на основі висотності будівель та щільності їх розташування. Зокрема в [38] розрахунок щільності населення виконано на основі щільності забудови, припускаючи, що щільність забудови корелює з щільністю населення

Метеорологічні параметри

В авіації несприятливі погодні умови регулярно спричиняють затримки та скасування рейсів авіакомпаній. У будь-який рік від 25% до 50% усіх авіаційних подій пов'язані з погодою [39]. Проте серйозність аварій, пов'язаних із погодними умовами, постійно знижується завдяки кращим загальнонаціональним системам прогнозування погоди та попереджень.

Хоча традиційна авіація виграла від цих технологічних удосконалень, вони недостатньо точні, щоб забезпечити підтримку в режимі реального часу для системи UAM. Ця прогалина є серйозним обмеженням для інтеграції UAM, головним чином тому, що погода може порушити міський повітряний рух через [39]:

- знижена витривалість місії – сильний вітер може знизити продуктивність батареї та порушити цілісність польоту. Оподи можуть збільшити опір руху літака і викликати несправність бортової електроніки. Низькі температури можуть зменшити термін служби акумулятора. Ожеледь може накопичуватися на планерах або гвинтах і збільшити вагу дрона

- знижена безпека – вітер і шторм можуть бути небезпечними для ПС на низькій висоті через брак місця для корекції положення, курсу чи висоти. Зміни барометричного тиску можуть спричинити неправильне калібрування висотоміра та спричинити помилки висоти. Видимість і низька стеля можуть знизити ефективність авіоніки, яка дає можливість уникати;

Погодні ризики можна зменшити, створивши динамічні геозони, які змінюються разом із погодою. Однак динамічна геозона настільки хороша, наскільки її підтримують прогнози погоди. Точні прогнози мають вирішальне значення для безпеки UAM і планування маршруту, особливо тому, що процедури уникнення погодних умов зменшують витривалість польоту літака на маршруті .

Також слід зазначити вплив рельєфу місцевості та вертикального профілю міської забудови на формування метеорологічних умов та, зокрема, вітрового режиму (рис. 1.15), що несе потенційну загрозу для легких та надлегких типів ПС UAM.

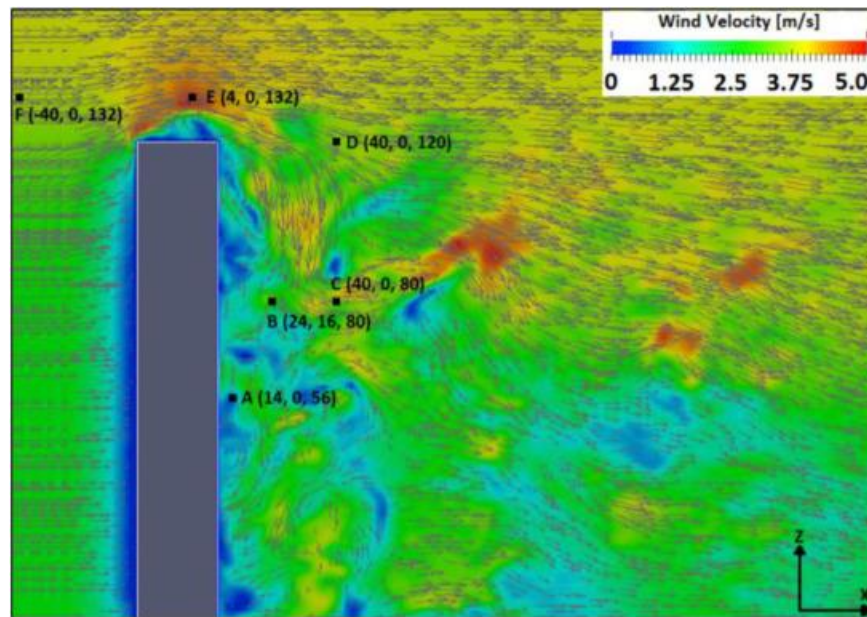


Рис. 1.12 – Швидкість і напрямок вітру навколо будівлі [40], м/с

У міському середовищі тертя між вітром і будівлями створює вихори, які викликають раптові зміни швидкості та напрямку вітру (рис. 1.15). Енергоспоживання літака може збільшитися через додаткову потужність, необхідну для підтримки сталого польоту. Що ще важливіше, пориви вітру можуть спричинити втрату контролю та подолати здатність літака зберігати положення, висоту та стабільність

З міркувань безпеки (і здорового глузду) літак повинен уникати зіткнення з будівлями. Тоді будівлі є «забороненими» зонами, де польоти, зрозуміло, заборонені. Простір за межами забороненої для польотів зони можна використовувати для польотів. Фактор, у цьому випадку безпека, створює просторову оболонку, де все всередині оболонки є забороненою для польотів зоною, а все, що знаходиться поза нею, відкрито для польотів, як показано на рис. 1.16.

Інші фактори: наприклад, шум, візуальне забруднення, пориви вітру (які створюють небезпечний простір для польоту поблизу високих будівель). Знову ж таки, цей простір можна візуалізувати за допомогою вільного простору, який визначає зовнішню межу забороненої для польотів зони. Коли ми додаємо більше факторів, кліренс розширюється, як і безпольотна зона. Отриманий повітряний

простір заповнює простір за межами забороненої для польотів зони, яка створюється шляхом накладання різних меж кліренсу всіх розглянутих факторів (рис. 1.16).

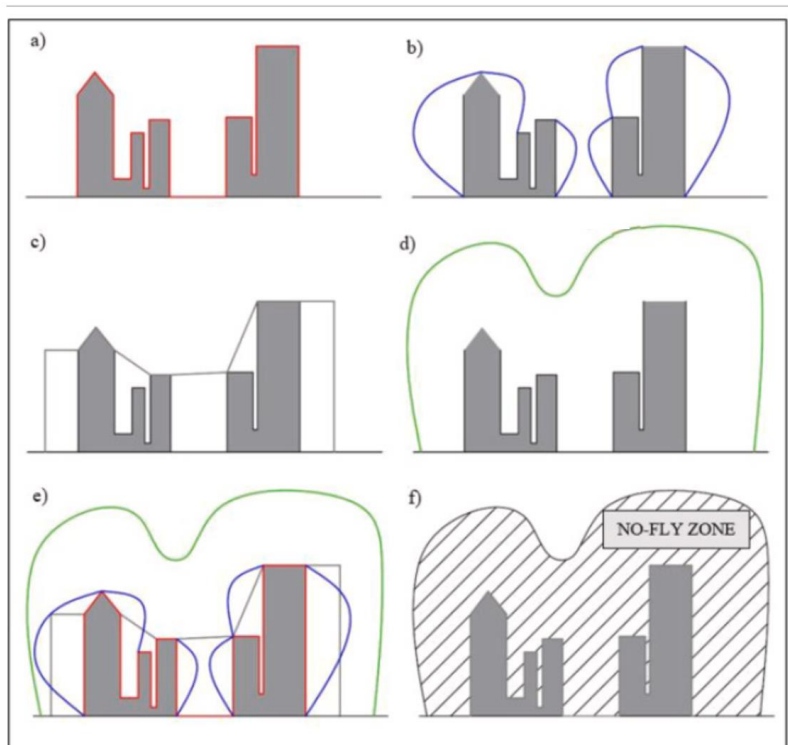


Рис. 1.13 – Кліренс залежить від вибраних змінних: (а) уникнення перешкод; (b) пориви вітру; (c) конфіденційність; (d) шум; (e) порівняння обмежень; (f) отриманий повітряний простір – зона без польотів.

1.3. Особливості сприйняття суспільством основних техногенних та інших загроз при впровадженні системи міських повітряних перевезень

Деякі дослідження вказують на значні потенційні виклики, по'язані з сприйняттям суспільством впровадженням таких проривних технологій. Так, зокрема в джерелах [5,6] наведено результати досліджень про особливості сприйняття ПС UAM громадськістю. Вони виявили, що важливі такі аспекти, як прихильність до автоматизації, безпека та довіра, а також соціальне ставлення.

За результатами дослідження EASA [1] про соціальне сприйняття UAM було виявлено критерії, які найбільше турбують населення: користувачів UAM та людей, що проживають на певній території, для якої планується запуск таких перевезень.

Перш за все слід відмітити, що мешканці Європейського Союзу в цілому позитивно сприймають ідею впровадження системи UAM (рис. 1.14) – більш ніж 83% респондентів.

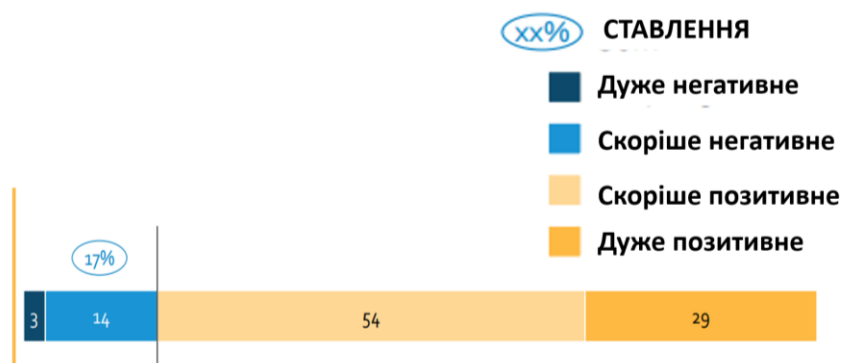


Рис. 1.14 – Результати опитування жителів ЄС щодо їх ставлення до ідеї впровадження [1]: позитивне ставлення (жовтий), негативне ставлення (синій)

Слід зазначити, що в Україні такої підтримки щодо впровадження пілотованих чи безпілотних ПС UAM не можна очікувати після наявного травматичного воєнного досвіду застосування безпілотних літальних апаратів. Тому підготовчий етап перед впровадженням такої системи буде більш тривалим та ємнісним за часовими та ресурсними затратами в порівнянні з досвідом інших регіонів світу. Особливо строгі вимоги та обмеження будуть по'язані з безпековими питаннями, шумовим впливом та маршрутами руху ПС UAM. Тому завдання розроблення підходів для багатокритеріальної оптимізації системи UAM є актуальним.

Успішні зусилля щодо «інтеграції в спільноту» запровадять підходи, які охоплюють всю екосистему, але мають критичний фокус навколо освіти, «вертипортів» і визнання громадськості. Такі проблеми, як нормативно-правові зміни, рівень шуму, соціальні та економічні фактори, роблять інтеграцію в громади значною перешкодою для вдосконаленої повітряної мобільності.

Результати [1] також показали, що пішоходи завжди почувалися безпечніше, розглядаючи пілотований літак, ніж безпілотний, незалежно від розміру чи характеристик літака. Частка людей, які відчувають безпеку як пішоходи з пілотованими повітряними таксі (70%), що летять над їхніми головами, була набагато більшою, ніж з безпілотними (44%) – і все ще вищою, ніж тих, хто відчувається

комфортно з безпілотними дронами доставки (56%). Як і очікувалося, кількість тих, хто спробував би пілотоване повітряне таксі (75 %), була більшою, ніж кількість тих, хто спробував би безпілотне таксі (43 %). Також не дивно, що ті учасники, які були потенційними користувачами аеротаксі, мали вищий рівень комфорту в пілотованих аеротаксі (+13 %), ніж у середньому.

Якісні інтерв'ю також показали, що довіра до пілотованих послуг була вищою, і що респонденти відчували себе більш комфортно при початковій експлуатації пілотованих повітряних таксі. Високий рівень комфорту громадян ЄС у пілотованих повітряних таксі, як пішоходів на вулиці, так і пасажирів, можна пояснити тим фактом, що літаки та їх операції можуть виглядати для неспеціалістів дуже схожими на традиційні авіаційні транспортні засоби та операції, і тим фактом, що традиційна авіація сприймається громадянами як дуже безпечна, принаймні в Європі.

Пішоходи в цілому трохи менше (26% різниці між пілотованими та безпілотними технологіями) стурбовані безпілотними операціями, ніж пасажирів (32%).

Ще один важливий результат було виявлено у аспекті призначення перевезень. Випадки використання в медичних/екстрених випадках вважаються найбільш корисними, незалежно від того, чи йдеться про доставку медичного обладнання безпілотником або термінове транспортування людей.

Наприклад, транспортування поранених до лікарні знайшло підтримку у 41 % випадків, доставка медичного приладдя дроном до лікарні 41 %, транспорт екстреної медичної допомоги (36%) і використання дронів для ліквідації наслідків стихійних лих (28 %). Випадки використання, пов'язані з перевезенням окремих пасажирів, такі як огляд визначних місць на повітряному таксі або переліт з однієї точки міста в іншу, сприймаються як менш корисні.

Таким чином, в реальних умовах експлуатації ПС системи UAM можна зробити припущення, що транспортування з медичною метою або за умов розвитку надзвичайних ситуацій в цілому буде толеруватися суспільством.

Варіанти використання, які представляють загальний суспільний інтерес, зокрема, у сферах охорони здоров'я та безпеки, будуть прийнятні краще, ніж варіанти використання, які задовольняють приватні та індивідуальні потреби.

Однак якісні інтерв'ю також показали, що екстрений чи медичний характер операції не виправдовує будь-яких відхилень від стандартів безпеки чи безпеки. Навпаки, більш високі рівні шуму можуть бути прийнятними, якщо кількість операцій у надзвичайних цілях буде обмежена.

Знову ж таки, використання UAM у надзвичайних ситуаціях було сприйнято як найбільшу додану цінність: 71 % учасників очікували покращення часу реагування у випадку надзвичайної ситуації. Зменшення заторів у середньому посідає друге місце (51 %), за ним слідує очікуване скорочення місцевих викидів (48 %). Краще сполучення з віддаленими районами (41 %) і створення нових робочих місць (32 %) представляють інші сприйняті переваги. Останнє в середньому частіше згадувалося як очікувана перевага людьми молодше 24 років.

Інші особливості сприйняття потенційних вигод від провадження системи UAM за результатами дослідження в різних мегаполісах показано на рис. 1.15: скорочення часу реагування в умовах надзвичайних ситуацій; зменшення корків на дорогах, зменшення емісії, підвищення доступу до віддалених районів, створення нових робочих місць та лідируючі позиції Європи в відповідному сегменті ринку.

В цілому ж, за результатами дослідження (рис. 1.16) [1] було визначено найбільш значущі критерії оптимальної роботи системи UAM для позитивного сприйняття її в суспільстві:

- безпека польотів (44% для дронів доставки та 37% для повітряних таксі);
- авіаційна безпека (39 та 29%);
- глобальні та локальні екологічні виклики (36 та 38%);
- конфіденційність (30 та 19%);
- шум (28 та 38%);
- втрата роботи (30 та 16%);
- візуальне забруднення (19 та 16%).

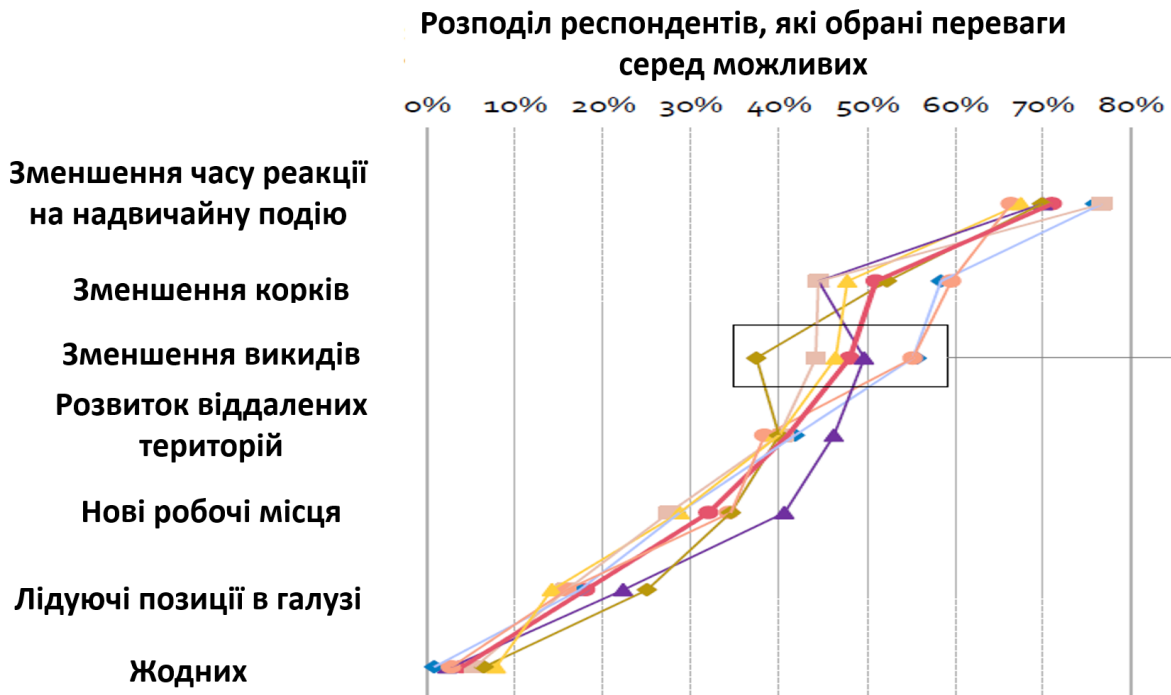


Рис.1.15 – Потенційні переваги системи UAM та їх сприйняття суспільством за результатами опитування в Європейських містах: червоний – разом, фіолетовий – Барселона, синій – Будапешт, оранжевий – Гамбург; рожевий -Мілан; жовтий – Оресунд; охра - Париж

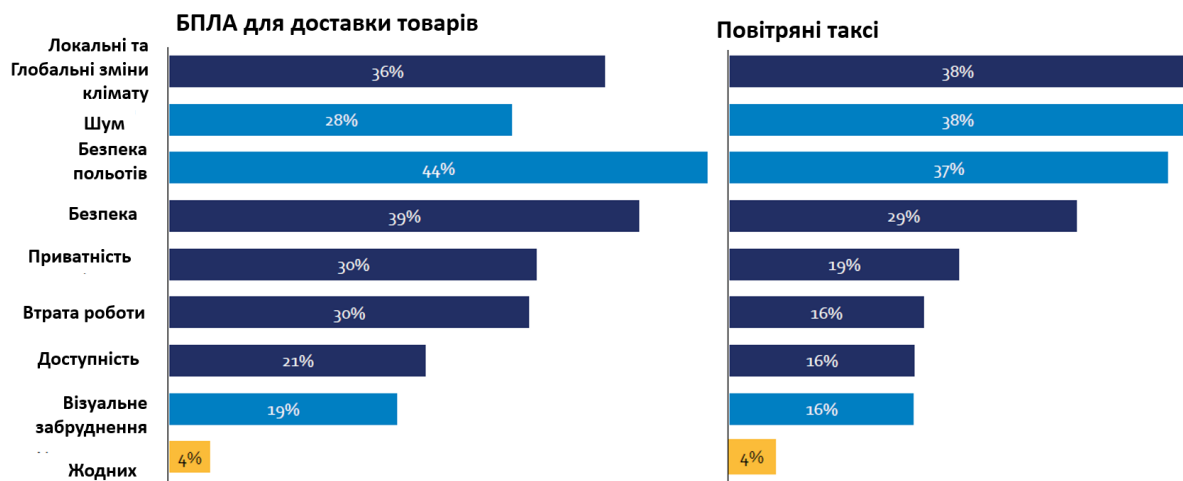


Рис. 1.16 – Відсоток відповідей респондентів щодо значимості проблем та викликів, які можуть створювати дрони (лівий графік) та повітряні таксі (правий графік)

Слід відмітити, що для адекватної оцінки сприйняття ідеї впровадження транспортних засобів системи повітряної мобільності на території України в пост-воєнний період необхідно буде провести аналогічні соціологічні опитування та бути

готовими до негативного ставлення частини суспільства до такого роду перевезень як наслідок травматизуючого досвіду в умовах військових дій.

Такими чином, аналіз результатів дослідження показав, щонайбільше абсолютна загроз побоювань пов'язана з ризиком розвитку авіаційної аварійної події, що потенційно може призвести до травмувань, загибелі пасажирів та пішоходів, а також руйнацій об'єктів на поверхні землі та відповідно, зі збільшенням техногенного ризику в цілому і зокрема, ризиком третьої сторони. Інші чинники можна розглядати як додаткові та такі, що не несуть безпосередньої загрози травмування чи загибелі.

1.4. Переваги та виклики використання повітряних суден системи міської повітряної мобільності в контексті сталого розвитку урбанізованого середовища

З 2007 року більше половини населення світу живе в містах, і, за прогнозами, до 2030 року ця частка зросте до 60 %. Міста та мегаполіси є рушійними силами економічного зростання, що забезпечує близько 60 % світового валового внутрішнього продукту (ВВП). Проте вони на них також припадає близько 70 % глобальних викидів вуглецю та понад 60 % використання ресурсів. На тлі зміни клімату та сміливих стратегій, таких як Європейська зелена угода (рис. 1.17) [41] і Цілі сталого розвитку ООН (рис. 1.18) [42], багато міст і регіонів поставили перед собою амбітні цілі сталого розвитку, спрямовані, серед іншого, на перехід від викопного палива до безвуглецевого поновлювані джерела енергії за відносно короткі періоди часу.



Рис. 1.17 – Ключові напрямки Європейського Зеленого курсу



Рис. 1.18 – Цілі сталого розвитку ООН

У багатьох (якщо не у всіх) випадках ключовим елементом таких амбіцій є повноцінна трансформація системи міського транспорту, яка часто базується на заміні транспортних засобів, що працюють на викопному паливі, більш стійкими видами транспорту, а також шляхом покращення громадського простору, краще транспортне сполучення та покращена логістика. Це вказує на те, що планування міської мобільності є багатовимірним, багатогранним питанням, яке стає дедалі

складнішим. Для досягнення таких цілей необхідним є впровадження новітніх технологій, в тому числі в сфері повітряних міських перевезень.

Міські райони, незалежно від їхнього розміру, стикаються з дедалі гострішими проблемами, такими як розростання міст, зростання населення та збільшення інтенсивності руху, які пов'язані з міською мобільністю. У той же час громадяни висувають ще більші вимоги до систем міського транспорту

UAM зазвичай вважається екологічно чистим видом транспорту, який можна порівняти з електромобілями. Технологічний розвиток, пов'язаний із електричним двигуном, технологією автономного польоту та ємністю акумулятора, зробить більш імовірним масштабне застосування ПС UAM – серед іншого в транспортному секторі. Таке широкомасштабне використання має потенціал для зменшення заторів у містах, оскільки, окрім хабів для зльоту та приземлення, UAM не вимагає ні використання існуючої транспортної системи, ні будівництва нових мереж. Оскільки безпілотники безпосередньо не створюють забруднюючих викидів, вони можуть покращити якість повітря в містах, особливо якщо їм також вдасться зменшити кількість автомобільного транспорту.

Очікується, що в UAM домінуватимуть електричні транспортні засоби, які вважаються більш екологічними, оскільки вони не викидають вихлопних газів безпосередньо в атмосферу. Однак це не так просто: для того, щоб широко оцінити вплив UAM на навколишнє середовище, потрібен перехід до повної оцінки за життєвий цикл [43]. Застосування такого підходу має вирішальне значення у випадку UAM, оскільки відносну вуглецеву нейтральність неможливо оцінити, лише дивлячись на фазу використання. Щодо повної ефективності екосистеми UAM, література надає невелику кількість, але відносно цікавих результатів, які ілюструють: - як вуглецевий нейтралітет UAM не забезпечується апріорно електрифікацією транспортних засобів UAM.

Детальний перелік критеріїв для оцінки ефективності системи UAM в контексті сталого розвитку за повний цикл запропоновано в Білій книзі, розробленій ENVISA [43], а також наведено порівняння з критеріями для оцінки традиційних типів транспорту (див. **табл. 1.3**).

Таблиця 1.3 – Критерії стійкості системи UAM (адаптовано з [43])

№	Індикатор стійкості	Поточний критерій (для наземного міського транспорту)	Новий критерій для транспорту UAM
1	Показник доступності громадського транспорту для найбіднішої верстви населення	Частка населення найбіднішого квартиля сімейного бюджету, необхідна для придбання абонементів на громадський транспорт (необмежений місячний проїзд або еквівалент) у міському районі проживання.	Частка найбіднішого квартиля сімейного бюджету населення, необхідна для регулярного доступу до UAM у міському районі проживання Показник доступності громадського транспорту для маломобільних груп населення
2	Показник доступності громадського транспорту для маломобільних груп населення	Цей показник визначає доступність послуг громадського транспорту для осіб з обмеженою мобільністю. До таких уразливих груп належать особи з вадами зору та слуху та фізичні обмеження, такі як вагітні жінки, користувачі інвалідних візків та засобів пересування, люди похилого віку, батьки та опікуни, які користуються UAM, а також люди з тимчасовими травмами.	Доступність UAM для вразливих груп, у тому числі людей із вадами зору та слуху та фізичних обмежень, таких як вагітні жінки, користувачі інвалідних візків та засобів пересування, люди похилого віку, батьки та опікуни, які користуються UAM, а також люди з тимчасовими травмами
3	Індикатор викидів забруднюючих речовин в повітря	Викиди забруднюючих речовин у атмосферу від усіх видів пасажирського та вантажного транспорту (вихлопних і невихлопних твердих частинок PM _{2,5}) у міській місцевості	Викиди забруднюючих речовин у атмосферу від усіх UAM (гібридних та повністю електричних) у міській місцевості. Вплив будівництва інфраструктури. Викид твердих частинок від джерела електроенергії, оскільки використання UAM в основному переміщує викиди з міста до місця електропостачання
4	Шум	Кількість людей, які зазнали впливу різних діапазонів шуму, пов'язаного з основними дорогами, залізницями та аеропортами.	Кількість людей у межах визначених шумових контурів, пов'язаних з операціями UAM, яких дратує шумове вторгнення від цієї форми мобільності
5	Смертність на дорогах	Смертність на дорогах від усіх транспортних пригод у міській місцевості за рік.	Транспортні засоби UAM, які щороку виходять із катастрофічної несправності, що призводить до аварії або невдалої посадки. Зіткнення в повітрі включено, однак очікується, що їх уникнення є прерогативою впровадження UAM.
6	Індикатор доступу до послуг мобільності	Частка населення з відповідним доступом до послуг мобільності (громадський транспорт).	Частка населення з належним доступом до послуг UAM

№	Індикатор стійкості	Поточний критерій (для наземного міського транспорту)	Новий критерій для транспорту UAM
7	Індикатор викидів парникових газів	Викиди парникових газів всіма видами міського пасажирського та вантажного транспорту	Викиди ПГ від свердловини до ротора транспортом UAM. Необхідно також враховувати вплив будівництва інфраструктури
8	Затори та затримки	Затримки дорожнього руху та громадського транспорту в години пік порівняно з подорожжю у непіковий час (приватний дорожній рух) та оптимальним часом у дорозі громадським транспортом (громадський транспорт).	Затримки в трафіку UAM, пов'язані з погодними умовами, заторами U-Space і плануванням вертипортів
9	Показник енергоефективності	Загальне споживання енергії міським транспортом на пасажиро-км і тонно-км (середньорічне для всіх видів).	Загальне споживання енергії UAM на пасажиро-км і тонно-км. (Оцінка гібридного та повністю електричного UAM для включення виробництва енергії)
10	Індикатор мультимодальної інтеграції	Чим більше видів транспорту доступно на пересадці, тим вищий рівень мультимодальної інтеграції.	Кількість пересадок для UAM, напр. вертипорт поблизу аеропорту або мультимодальних вузлів
11	Показник задоволеності громадським транспортом	Відчуття задоволення від використання громадського транспорту.	Відчутне задоволення від використання UAM
12	Індикатор активних режимів безпеки руху	Смертність користувачів у дорожньо-транспортних пригодах у місті	Інтеграція інформації про аварії та невдалу посадку транспортних засобів UAM у міській зоні
13	Індикатор якості громадських місць	Індикатор якості громадських місць	Не доступний зараз
14	Індикатор часу в дорозі	Тривалість проїзду на роботу або до навчального закладу та назад будь-якими видами транспорту	Тривалість поїздки на роботу чи до навчального закладу та назад за допомогою UAM
15	Індикатор використання простору мобільності	Частка землекористування, зайнятого всіма видами міського транспорту, включаючи пряме та непряме використання	Частка землі, зайнятої об'єктами UAM, включаючи вертипорти
16	Індикатор безпеки	Передбачуваний ризик злочинності та безпека пасажирів у міському транспорті.	Ризик злочинності та безпеки пасажирів в UAM, включаючи оцінку потенціалу впливу кіберзлочинності та безпеки на UAM

Оцінки виконані для індикатору № 3 (індикатор викидів забруднюючих речовин в повітря) показують переваги для ПС UAM в порівнянні з традиційними автомобілями (рис. 1.19) в діапазоні відстаней 35-250 км.

ПС UAM викидає менше парникових газів порівняно з автомобілями з двигуном внутрішнього згорання для поїздок понад 35 км. Однак середня довжина поїздки наземним транспортним засобом становить лише близько 17 км, причому поїздки, що перевищують 35 км, складають менше 15% усіх поїздок автомобіля [44]. Таким чином, поїздки, у яких ПСС є більш стійкими, ніж традиційні автомобілі на викопному паливі. На коротших відстанях енергоємне завсяння ПС домінує в профілі польоту, таким чином перешкоджаючи ПС UAM використовувати ефективні аеродинамічні характеристики під час круїзу. Ефективність стійкості ПС є більш вигідною, коли конкурує з наземними транспортними засобами, які рухаються завантаженими маршрутами або непрямыми маршрутами з вищими коефіцієнтами ланцюга. Порівняльна енергія, викиди та переваги економії часу ПС максимально збільшуються в районах із великими корками або з географічними бар'єрами, які диктують непрямі маршрути для наземного транспорту.

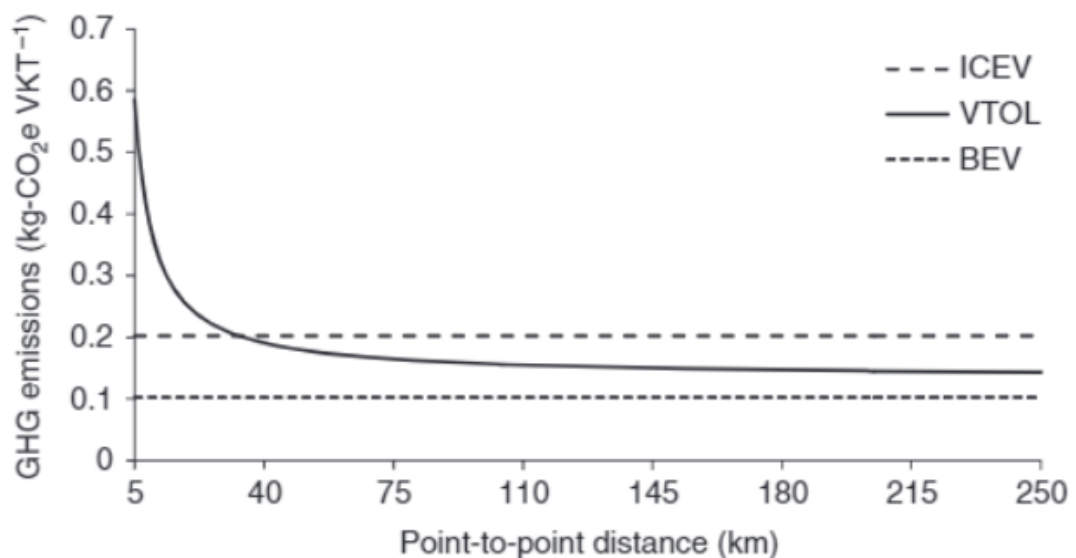


Рис. 1.19 – Викиди парникових газів, нормалізовані на кілометри пробігу автомобіля. Результати викидів для одномісних ПС (VTOL) і наземних транспортних засобів (ICEV – автомобіль з двигуном внутрішнього згорання; BEV - акумуляторний електромобіль) нормалізуються за кілометрами пробігу [44]

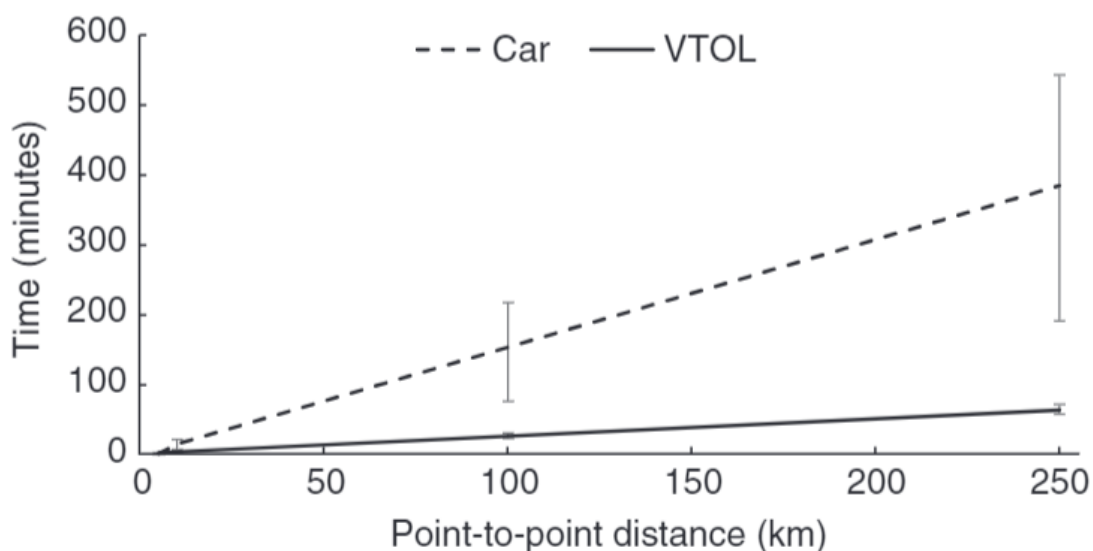


Рис. 1.20 – Час подорожі для ПС системи UAM (VTOL) і наземних транспортних засобів (Car) [44]

Одночасно з цим, при оцінці системи за критерієм № 14 (Індикатор часу в дорозі), ефективність істотно вище для ПС системи UAM (рис. 1.13). Порівняння часу подорожі для ПС системи UAM (VTOL) і наземних транспортних засобів (Car) надаються як функція відстані. Столпчики невизначеності показують вплив варіювання припущень щодо швидкості вітру для VTOL та розподілу руху по міській магістралі для автомобілів.

Висновки до РОЗДІЛУ 1

Таким чином, в даному розділі було проаналізовано основні елементи багатокомпонентної системи міського повітряного транспорту в контексті техногенної безпеки та сталого розвитку. Показано, що основними елементами є повітряні судна UAM, вертипорти (хаби та станції), повітряні траси, а також система управління повітряним рухом.

Визначено додаткові чинники (рельєф, метеорологічні умови, щільність населення, функціональне призначення територій, вертикальний профіль житлової та громадської забудови тощо), які можуть впливати на структуру системи UAM та експлуатацію її окремих елементів та пропускну спроможність.

Потенційно льотно-технічні характеристики ПС системи UAM будуть перебувати в широкому діапазоні, а, отже, до них можуть бути застосовані різноманітні способи управління повітряним рухом, конструювання злітно-посадкових майданчиків тощо.

Проаналізовано чинники, які можуть впливати на ефективність експлуатації системи UAM та, зокрема на вибір режимів експлуатації ПС системи міського повітряного транспорту, а також потенційні труднощі щодо впровадження системи UAM через особливості суспільного сприйняття.

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА ПІДХОДУ ДЛЯ ЗНИЖЕННЯ ТЕХНОГЕННИХ РИЗИКІВ ПІД ЧАС ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПОВІТРЯНИХ СУДЕН СИСТЕМИ МІСЬКОЇ ПОВІТРЯНОЇ МОБІЛЬНОСТІ

2.1 Ризик-орієнтовані методи для зниження техногенних загроз

Згідно з визначенням, яке подано в [9] ризик-орієнтований підхід ототожнюється із прийняттям певних рішень, які забезпечують прийнятний рівень ризику та включає такі етапи:

- оцінка ризику;
- зниження ризику;
- внутрішній контроль, управління та моніторинг ризику.

Загальна схема оцінювання ризику та взаємні зв'язки з всіма циклами управління ризиками наведено на рис. 2.1.

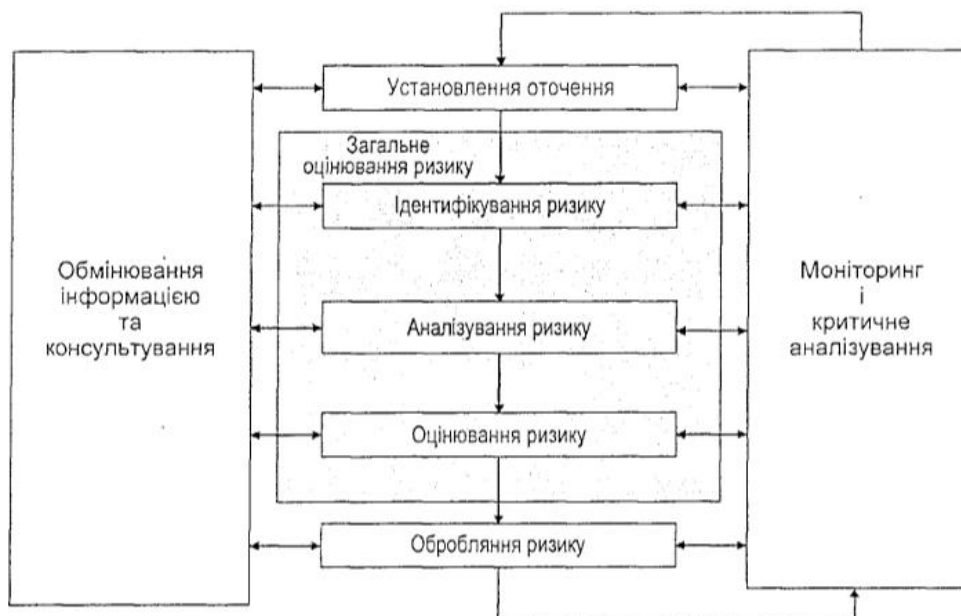


Рис. 2.1 – Роль загального оцінювання ризику в процесі управління ризиком [10]

Оцінка ризиків є ключовим етапом цього підходу, оскільки від її точності залежить ефективність ухвалених заходів.

Це вимагає великих зусиль та професіоналізму фахівців.

На етапі оцінки ризиків проводять: аналіз та оцінку можливих ризиків, вибір найбільш несприятливих сценаріїв, обчислення та оцінку ризику.

Аналіз ризиків - це процес збору та обробки інформації, що допомагає визначити параметри ризику, ідентифікувати його джерела та описати можливі сценарії. Вибір несприятливих ризиків полягає в оцінці ймовірності та можливих наслідків.

Залежно від характеру небажаної події ризик може оцінюватися щодо таких небажаних наслідків:

- загибель людини;
- травмування людини;
- руйнування внаслідок пожежі будинків, споруд, що забезпечують життєдіяльність населення;
- нанесення шкоди оточуючому середовищу.

Під час розрахунку ризику збираються дані аналізу та проводиться обчислення кількісного показника ризику. Методи оцінки ризиків відіграють ключову роль у цьому процесі. Існує багато різних методів, що використовуються для оцінки ризиків, враховуючи міжнародні та національні стандарти, включаючи українські [10-12].

Згідно з рекомендаціями Порядку [11] виявлення загроз розвитку надзвичайних ситуацій, ідентифікація та аналіз техногенного ризику проводиться для визначення найбільш ймовірних сценаріїв розвитку небажаної події в разі виникнення небезпеки, оцінки її наслідків шляхом аналізу інформації про всі потенційні джерела і чинники ризику.

Прийняття управлінських рішень щодо рівні ризику залежатиме від отриманих значень ризику розвитку техногенної аварії при порівнянні їх з нормативними значеннями [11]:

- мінімальний ризик - 10^{-8} ;
- допустимий ризик $1 \cdot 10^{-8}$ - $1 \cdot 10^{-5}$;

- ризик, наближений до гранично допустимого - $1 \cdot 10^{-6}$ до $1 \cdot 10^{-5}$;
- гранично допустимий ризик - $1 \cdot 10^{-5}$.

Методів оцінки ризику, технік та прийомів існує великий спектр (табл. 2.1.), які систематизовано для більш зручного користування в ДСТУ EN ІЕС 31010:2022 «Керування ризиками - методи оцінки ризиків».

Таблиця 2.1 – Методи загального оцінювання ризику за ДСТУ EN ІЕС 31010:2022

№	Методи оцінки	Приклади	
		1	Методи експертних оцінок
2	Методи ідентифікації	класифікації	таксономії
3	Методи аналізу джерел ризику	метод рибної кістки	
4	Методи аналізу заходів управління	аналізування небезпечених чинників та критичні точки контролю	
5	Методики визначення наслідків, ймовірності та ризику	метод аналізу дерев подій	
6	Методики аналізу залежностей	аналізування причинно-наслідкових зв'язків	
7	Методики визначення рівня ризику	токсикологічна оцінка ризику	
8	Методи оцінки значущості ризику	індекси ризику	фронт Парето
9	Методи вибору варіантів	багатокритеріальний аналіз	
10	Методики звітності і записів	аналіз дерев відмов	

Методи оцінювання ризиків обираються на основі цілей дослідження, завдання моделювання, типу та діапазон досліджуваних ризиків, повноти та якості вихідних даних, національні рекомендації чи міжнародні стандарти.

Також вплив матимуть наявні ресурси, складність методики, наявність кваліфікованого персоналу та багато інших штук.

Ризик-орієнтований підхід має на меті забезпечення безпеки різноманітних об'єктів, які мають стратегічне значення для економіки держави. Це включає безпеку промислових та складських будівлі, потенційно небезпечні об'єкти, підприємства, технічні системи та об'єкти із масовим перебуванням людей, такі як аеропорти, морські, річкові, залізничні та автомобільні вокзали республіканського та обласного значення.

Головна мета полягає в ідентифікації потенційних небезпек і ризиків для цих об'єктів, розробці стратегій їх управління та заходів для запобігання можливим аваріям або інцидентом, а також у виявленні та зменшенні можливих наслідків подій, що можуть загрожувати безпеці цих об'єктів.

2.2 Практика управління ризиками третьої сторони в цивільній авіації

У цивільній авіації термін «перша сторона» відноситься до авіаційного персоналу, який надає послуги повітряного транспортування, друга сторона - до пасажирів, які отримують послуги повітряного транспортування. Третя сторона відноситься до людей, які з певних причин піддаються впливу авіації та не мають жодного відношення до польотів, наприклад, люди, які проживають поблизу аеропорту. Виходячи з цього в роботі [34] визначено трьохсторонній ризик при експлуатації дронів наступним чином. Ризик першої сторони поширюється на людей і майно, безпосередньо пов'язане з операціями безпілотної (наприклад, пілот і сам дрон). Ризики другої сторони стосуються людей і власності, які не мають нічого спільного з операціями безпілотної, але безпосередньо отримують вигоди від них (наприклад, вигоди від операційних підрозділів, інфраструктури дронів і доставки посилок). Ризики третіх сторін стосуються персоналу та майна, які не беруть участі в операціях безпілотної або безпосередньо не отримують вигоди від них (наприклад, люди, що рухаються під маршрутом безпілотної) [26].

В цьому дослідженні, масштабуючи зазначені концепції до системи UAM, ризик третьої сторони при експлуатації системи UAM визначається як ризик, який несуть аварії ПС UAM для здоров'я та безпеки людей на землі, які не пов'язані з повітряними перевезеннями, а також загрозу об'єктам господарської діяльності та навколишньому природному середовищу.

Характерною особливістю авіації є той факт, що ризик третьої сторони, створений системою повітряного руху, є найвищим поблизу аеропортів чи злітно-посадкових майданчиків (рис. 2.2).

Це пов'язано з двома факторами: аеропорти є вузлами для повітряного руху з сотнями або навіть тисячами операцій на день для найбільших аеропортів і, по-друге, більшість авіаційних подій та інцидентів відбуваються на етапах зльоту або посадки польоту.



Рис. 2.2 – Приклад результатів оцінювання ризику третьої сторони для аеропорту Миколаїв

Проблеми ризику для третіх сторін багато в чому схожі на вплив шуму чи викидів, створюваного повітряним рухом, оскільки населення, яке живе поблизу аеропортів, мимоволі піддається впливу цих негативних зовнішніх ефектів.

Для вимірювання ризику третьої сторони використовуються дві різні метрики: індивідуальний ризик і суспільний ризик [26].

Індивідуальний ризик залежить від місця розташування і його можна візуалізувати у вигляді контурів ризику.

Під суспільним ризиком зазвичай розуміють зв'язок між частотою та кількістю осіб, які можуть зазнати певної шкоди. Суспільний ризик, з іншого боку, не залежить від місця розташування та визначається на основі кількості мешканців, які знаходяться всередині заданих індивідуальних контурів ризику. Ризик для третьої сторони є найбільшим у безпосередній близькості від злітно-посадкових смуг та подовженої центральної лінії злітно-посадкової смуги, і зменшуються при віддаленні від злітно-посадкової смуги та маршрутів зльоту та заходження на посадку.

Індивідуальні та суспільні значення ризику також можна використовувати для визначення зон громадської безпеки, що обмежують існуючі та нові забудови навколо аеропортів. Важливість ризику навколо аеропортів була визнана у Великій Британії в 1950-х роках, а зони громадської безпеки були введені в 1958 році. У 1990-х роках метод оцінки ризику третіми сторонами навколо аеропортів і визначення відповідних критеріїв оцінки ризику були представлені у звіті NATS для Міністерства транспорту Великої Британії. Як і у Великій Британії, розвиток третьої сторони оцінки ризиків і зон громадської безпеки в Нідерландах був значно прискорений катастрофою Bijlmer у 1992 році, коли вантажний літак E1 A1 впав на багатоповерхові житлові будинки поблизу Амстердама (рис 2.3).

В Україні існувала практика погодження нових об'єктів житлової забудови із урахуванням результатів оцінки ризику третьої сторони до 2022 року. Тому навколо більшості аеропортів України було визначено межі Зон громадської безпеки, які ICAO розглядає як єдиний механізм ефективного захисту населення від ризиків третьої сторони згідно з ICAO Doc 9184 (частина 2). В середині зон громадської безпеки навколо аеропортів рекомендується створення різного ступеню заборон щодо зведення нової забудови. Рекомендації ICAO передбачали знесення всіх житлових будівель в межах таких зон до 2015 року [27].

Визначення зон громадської безпеки ґрунтується на моделюванні індивідуального ризику, що виконано на основі даних про рух ПС для визначення ступеня ризику для населення, що мешкає навколо аеропортів, зважаючи на швидке удосконалення транспортної інфраструктури.

Аеропорт Схіпхол. Голландська методологія оцінки ризику була навіть вписана в авіаційний закон країни в 2003 році. Згідно з цією політикою, нові будівлі не допускаються в межах 10^{-5} індивідуальних контурів ризику, і лише малий бізнес дозволяється в межах $10^{-5} - 10^{-6}$ контури ризику. Це схоже на Сполучене Королівство, де заборонено будівництво нових будівель у межах контуру ризику 10^{-5} (винятки можуть бути зроблені для забудов із низькою щільністю населення) [26].



Рис. 2.3 – Наслідки авіаційної катастрофи 1992 року в Амстердамі (Bijlmer): 39 загиблих на землі та 26 поранених

Існує дві основні європейські моделі ризиків третьої сторони, а саме моделі Великобританії та Нідерландів, розроблені відповідно NATS та NLR. Окрім цих моделей, у цьому звіті розглядалися модель Міністерства оборони США, італійська модель (розроблена Римським університетом Сапієнца для ENAC) та українська модель (3PRisk, розроблена Національним авіаційним університетом). Моделі ризику третьої сторони зазвичай складаються з трьох підмоделей: моделі ймовірності аварії, моделі місця аварії та моделі наслідків аварії. Модель ймовірності аварій дозволяє розрахувати ймовірності аварій для різних класів літаків. На основі показників аварійності а також кількість операцій, ймовірність аварій для різних фаз польоту (посадка, зліт) і типи аварій (недоліт, переліт, відхилення). Частота нещасних випадків (зазвичай надається на 10^6 переміщень) зазвичай визначається на основі історичних даних про нещасні випадки. Центральним елементом моделі розташування аварії є функція щільності ймовірності, що визначає аварію розповсюдження в районі злітно-посадкових смуг і трас. Функції визначення місця події зазвичай відрізняються для різних класів повітряних суден і типів аварій. Модель наслідків аварії дозволяє розрахунок зони ураження та летальності аварії, розкид уламків зазвичай залежить від розміру літака та кількості палива на борту.

Моделі ризиків третьої сторони NLR і NATS мають однаковий базовий підхід і структуру [26]. Основна відмінність між моделями полягає в тому, що модель Великобританії була відкалібрована з використанням глобальних даних про аварії, тоді як голландська модель має відмінні формули для великих аеропортів (розроблених для аеропорту Схіпхол) і регіональних аеропортів. Крім того, моделі Нідерландів і Великобританії відрізняються щодо групування літаків: у моделі NATS класифікація базується на тип експлуатації (пасажирський, непасажирський) і класи повітряних суден, визначені типом двигуна та різними іншими характеристиками (реактивні літаки класу I–IV західного типу, реактивні літаки східного типу, реактивні літаки представницького класу тощо). У моделі NLR, з іншого боку, ймовірність аварій базується на класифікації важкої/легкої ваги, типі експлуатації та поколінні літака. Слід також взяти до уваги, що модель розташування аварій у моделі ризику Великобританії базується на подовжених осьових лініях злітно-посадкової смуги, тоді як модель NLR враховує різні траєкторії або маршрути літака.

Платформа EUROCONTROL IMPACT [26] наразі містить розрахункові модулі для оцінки шуму та авіаційних викидів в аеропортах. І моделі шуму, і моделі палива/викидів працюють на загальних вхідних даних, створених на основі введених користувачем даних і даних у різних довідкових таблицях і таблицях відображення. Примітно, що при моделюванні шуму типи ПС зіставляються з кодами ANP, тоді як при моделюванні викидів відображення включає коди AEM і BADA. Класи ПС також повинні бути пов'язані з ваговими категоріями ПС, які використовуються для визначення зони аварії. Дані про авіакатастрофи можуть бути об'єднані з різних міжнародних, європейських баз даних та інших джерел (державних або приватних), зокрема ECCAIRS, європейської системи звітності про авіакатастрофи, а також з Європейського агентства авіаційної безпеки. Крім того, EUROCONTROL сам збирає дані про аварії та інциденти, пов'язані управлінням повітряним рухом.

Оскільки щорічно інформація про АП оновлюються за рахунок нових статистичних даних, ймовірнісні параметри можуть коригуватися.

Аналогічні наслідки очікуються при експлуатації системи UAM, за виключенням розмірів ПС та особливостей їх експлуатації на невеликих висотах.

В цілому ж встановлення планувальних обмежень щодо використання територій може виявитися гарною стратегією в зоні впливу великих вертипортів та станцій, а також уздовж найбільш щільних маршрутів руху ПС UAM у разі перевищення прийнятних рівнів ризику.

2.3 Методи оцінки ризику третьої сторони

Хоча нині обсяг перевезень UAM у світі не є надто великим, очікується, що світовий ринок комерційних послуг на основі лише безпілотних систем на початку 2030-х років зросте до десятків мільярдів доларів США і близько 1 трильйона доларів США до 2040 [13].

Таким чином, очікується, що в майбутньому буде великий обсяг перевезень UAM та їх щільність у міських районах. Такі операції будуть становити загрозу безпеці людей на землі, що називається ризиком третьої сторони

Ризик третьої сторони викликаний комерційною експлуатацією БПЛА, має бути достатньо пом'якшеним, щоб інші рівні ризику були прийнято безпечними з точки зору суспільства.

Методи планування траєкторії з урахуванням ризиків, описані в літературі [13,14,15], розроблені як важливий засіб для зменшення ризиків для безпеки, які становлять польоти UAM для людей на землі. Ключова відмінність від планування за найкоротшим шляхом полягає в тому, що ризик безпеки враховується у вартості, яку потрібно мінімізувати.

Планування шляху генерує набір маршрутних точок, яким ПС UAM (безпілотне чи пілотоване) повинне слідувати, щоб досягти пункту призначення. Такі точки пропонується в межах даного дослідження вважати контрольними точками. Додатково в контрольних точках можуть бути встановлені не лише вимоги щодо рівнів ризику третьої сторони (чи загального територіального ризику – залежно від поставленого завдання), але і інші значимі з соціальної точки зору критерії (Розділ 1): рівні шуму, віддаленість від соціально чутливих об'єктів та інші.

Планування шляху також має мінімізувати функцію витрат, пов'язану з кожним можливим шляхом. Зазвичай методи планування шляху включають методи на основі графів і вибірки.

Алгоритми на основі графів здійснюють пошук по графу, щоб знайти шлях, який має мінімальну вартість, наприклад алгоритм Дейкстри [14] та його варіанти. Можливе використання алгоритмів на основі ймовірнісного методу дорожніх карт [15] та швидке дослідження випадкового дерева [16]. Метод дорожніх карт відбирає та з'єднує точки в середовищі для побудови дорожньої карти; потім він шукає можливий шлях за допомогою дорожньої карти. Метод швидкого дослідження випадкового дерева формує односпрямоване дерево пошуку від початкової точки до досягнення гілки дерева (мети).

Методи планування сітки маршрутів UAM враховують ризик, який становить для людей на землі політ ПС. Вони використовують карти ризиків для кількісної оцінки ризику польоту над кожною контрольною точкою для кожного ПС [12].

Двоцільова оптимізація також використовується для мінімізації компромісу між ризиком безпеки та дальністю польоту [17]. Деякі методи [18] не використовують карту ризиків для оцінки ризику; вони безпосередньо обчислюють ризик за допомогою методів оцінки ризику, доступних під час планування. Метод планування маршруту з урахуванням ризику ПС UAM ефективно знижує ризик кожного польоту, знаходячи маршрути над районами з низькою щільністю населення.

Аналіз літературних джерел показав, що кількість досліджень щодо вибору оптимальних маршрутів польоту чи режимів експлуатації на основі більшої кількості соціально значимих критеріїв оптимального функціонування системи UAM, є невеликою [13].

Ризики для безпеки, які становить окремий політ ПС UAM для населення, досить добре вивчені [13,18,19]. Загальноприйнятий висновок полягає в тому, що ризик, який представляє кожну годину польоту ПС UAM для наземного населення, має бути на рівні еквівалентного рівня безпеки (Equivalent Level of Safety, ELOS), визначеної ризиком третьої сторони, який створюється за годину польоту комерційного літака [13].

У комерційній авіації більшість смертельних випадків стосуються екіпажу та пасажирів на борту літака. Це пояснює, чому ELOS про очікувану кількість загиблих на землі за годину польоту не є широко використовуваним показником безпеки у комерційній авіації. Показники ризику третьої сторони визначаються з точки зору ризику безпеки для наземного населення через усі щорічні польоти навколо аеропорту [19].

Крім того, існуючі імітаційні моделі оцінки ризику третьої сторони при експлуатації безпілотних літальних апаратів [31–33] були розширені для оцінки цих річних показників ризику третьої сторони.

Для цих керованих суспільством щорічних індикаторів ризику третьої сторони були розроблені моделі, які дозволяють оцінити зміни ризику для людей на землі через зміни кількості рейсів, нових маршрутів вильоту/прибуття, впливу нового аеропорту, ризик будівництва житлового будинку в певній місцевості тощо.

Для розробки основ концепції оцінки та управління ризиком третьої УАМ слід застосовувати всю наявну на поточний момент інформацію про бажані рівні безпеки (нині актуальним є орієнтир на стандарти та вимоги до традиційних ПС цивільної авіації), а також доступні статистичні характеристики щодо аварійності безпілотних літальних апаратів (БПЛА), які вже експлуатуються нині і потенційно будуть становити основу системи УАМ на перших етапах її впровадження.

Систематизованих даних щодо аварійності БПЛА нині не вистачає, хоча окремі результати досліджень вже були опубліковані. Так, за результатами дослідження EASA [23] було оцінено основні потенційні проблеми безпеки польотів БПЛА з акцентом на їх причини, включно з загрозами зіткнення в повітряному середовищі. На графіку (рис 2.2.) показано тенденцію до зростання кількості зареєстрованих подій БПЛА (як аварій, так і інцидентів) за рік з 2010 по червень 2016 р.

Також важливим є визначення класу зазначених подій (рис. 2.4) – так, найбільша кількість припадає на інциденти.

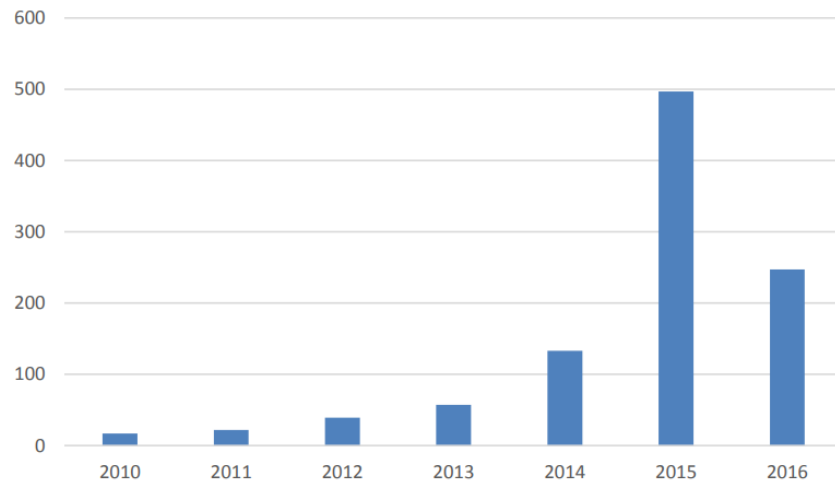


Рис. 2.4 – Статистика аварійних випадків з БПЛА за роками: з 2010 по травень 2016 [23]

Серед всіх подій було 42 аварії (рис. 2.5), більшість з яких сталися внаслідок падіння безпілотника з технічних причин або через втрату керування. Слід також відмітити, що всі події які були зафіксовані в цьому дослідженні не мали смертельних наслідків чи травм.

Результати дослідження [23] дозволяють визначити кілька ключових зон ризику, пов'язаних з експлуатацією БПЛА:

Зона загрози повітряних конфліктів. Повітряний конфлікт у контексті БПЛА охоплює ризик зіткнення в повітрі між безпілотником і ПС (традиційним чи новітнім) у повітрі.

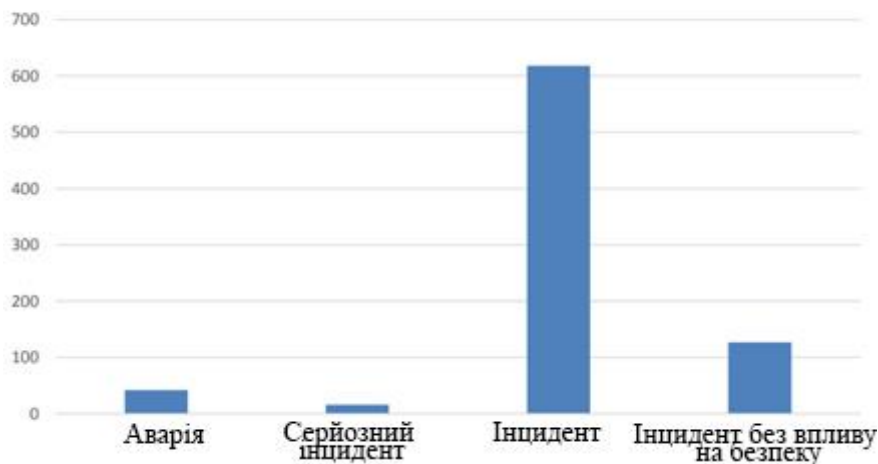


Рис. 2.5 – Класи аварійних ситуації з БПЛА [23]

Збої в роботі ПС UAM охоплюють повний спектр ситуацій втрати контролю ПС. Хоча втрата контролю над БПЛА відрізняються від аналогічних випадків для традиційних ПС, оскільки ризики для людей на борту літака, існує ймовірність травмування людей на землі залежно від планування польоту та режимів експлуатації. Втрата контролю над БПЛА особливо актуальна, оскільки вони будуть працювати ближче до землі, ніж інші типи авіації.

Системні збої: відмова системи керування чи її елементів входять до основних областей ризику. В цьому аспекті слід розміняти відмови двигуна, та відмови інших систем, а також збої програмного забезпечення та каналів передачі даних.

Загрози третій стороні. Остання ключова зона ризику охоплює ризик зіткнень БПЛА з людьми або майном, де вони можуть спричинити загибель, травми чи пошкодження. Не було випадків, пов'язаних із такими смертельними наслідками, але оцінка ризиків на основі сценарію виявила потенційний результат, який слід включити до ключової зони ризику для експлуатації БПЛА.

Відомо, що аварії, пов'язані зі зіткненням БПЛА з людьми на землі, трапляються, наприклад, така подія сталася в США, коли БПЛА використовувався для зйомок ЗМІ. Однак у EASA офіційно про це не повідомлялося. Оскільки галузь безпілотних літальних апаратів є відносно новою, можливо, про травми, спричинені безпілотниками, просто не повідомляють авіаційній владі, а лише фіксують в лікарнях, де постраждалі лікуються, або на рівні місцевих правоохоронних органів. Тому статистика EASA в цьому контексті є неповною.

Результати аналізу основних випадків і, відповідно, потенційних загроз представлено в табл. 2.2. Можна побачити, що 63% подій пов'язані з повітряними конфліктами, який є основною ключовою зоною ризику. Це означає, що порушення повітряного простору та близькість дронів до інших ПС спричиняє значну кількість інцидентів. На цьому етапі варто зазначити, що оприлюднення потенційних ризиків зіткнень традиційної авіації з БПЛА призвело до ряду відкриття непідтверджених випадків з БПЛА. У минулому такі непідтвержені повідомлення вважалися такими, що лежать в зоні впливу проблем зіткнення з птахами.

Характерною особливістю розподілу потенційних загроз за етапами експлуатації БПЛА є відмінність від розподілу аварійних ситуацій за етапами злітно-посадкового циклу у традиційних типів ПС ЦА, що має бути враховано під час розроблення моделей оцінювання ризику (рис. 2.4). Найбільшу імовірність аварійної ситуації маємо для етапів: перебування на маршруті та при заходженні на посадку.

З графіку видно, що найбільша кількість випадків спостерігається у повітряному просторі класу D і G. Це за класифікацією повітряного простору ІСАО (рис. 1.5) контрольований повітряний простір D (для якого польоти за ППП і ПВП дозволені, і всі польоти забезпечуються диспетчерським обслуговуванням, польоти за ППП відокремлені від інших польотів за ППП і отримують інформацію про рух щодо польотів за ПВП, рейси за ПВП отримують інформацію про рух щодо всіх інших рейсів) та неконтрольований повітряний простір G: польоти за ПВП та ПВП дозволені та отримують інформаційні послуги за запитом.

Слід відмітити, що для ПС системи UAM для пасажирських перевезень, геометрія яких близька до традиційних ПС очікується, що розподіл аварійності за етапами злітно-посадкового циклу буде близьким до даних для традиційних ПС (рис. 2.5) [24].

Таблиця 2.2 – Опис ризиків безпеки ПС UAM на прикладі БПЛА (2011-2015)

Безпекові питання		Загальна кількість випадків в 2011-2015 роках			Ключові зони ризику				
		Інциденти	Серйозні інциденти	Аварії	Конфлікти в повітрі	Інші відмови систем	Відмови літака	Відмови двигуна	Конфлікти з третьою стороною
Експлуатаційні	Визначення, виявлення та відновлення відхилення від нормальних умов експлуатації	2	3	5			+		+
	Обслуговування ПС та управління	1	-	3	+		+		+

Безпекові питання	Загальна кількість випадків в 2011-2015 роках			Ключові зони ризику				
	Інциденти	Серйозні інциденти	Аварії	Конфлікти в повітрі	Інші відмови систем	Відмови літака	Відмови двигуна	Конфлікти з третьою стороною
траєкторією польоту								
Порушення ПС контрольованого повітряного простору/	72	2	-	+				
Близькість ПС UAM до інших ПС у неконтрольованому повітряному просторі	45	1	-	+				
Технічні	Збої системи наведення та управління	3	-	3	+	+	+	+
	відмови системи наведення та управління	2	-	2			+	
	відмови силової установки та джерел живлення	0	-	2	+	+	+	+
Людські	Передпольотне планування та підготовка	13	-	-	+	+	+	+
	Знання оператором авіаційної системи	-	-	-	+	+	+	+
	Технічне обслуговування/ Виробництво	-	-	-	+	+	+	+
Відсоток аварій зі смертельними наслідками (2011-2015)	121			52%	8%	7%	6%	4%
Відсоток аварій без смертельних наслідками (2011-2015)	963			11%	3%	8%	8%	2%

Типова методика оцінки ризиків (рис. 2.7), таким чином, може бути застосована лише частково для ПС UAM, які максимально наближені за льотно-технічними

характеристиками до традиційних типів ПС. Тому необхідною є розробка комплексної концепції управління ризиками системи UAM, яка об'єднає безпекові характеристики БПЛА (рис. та ПС UAM більшого розміру для перевезення пасажирів.

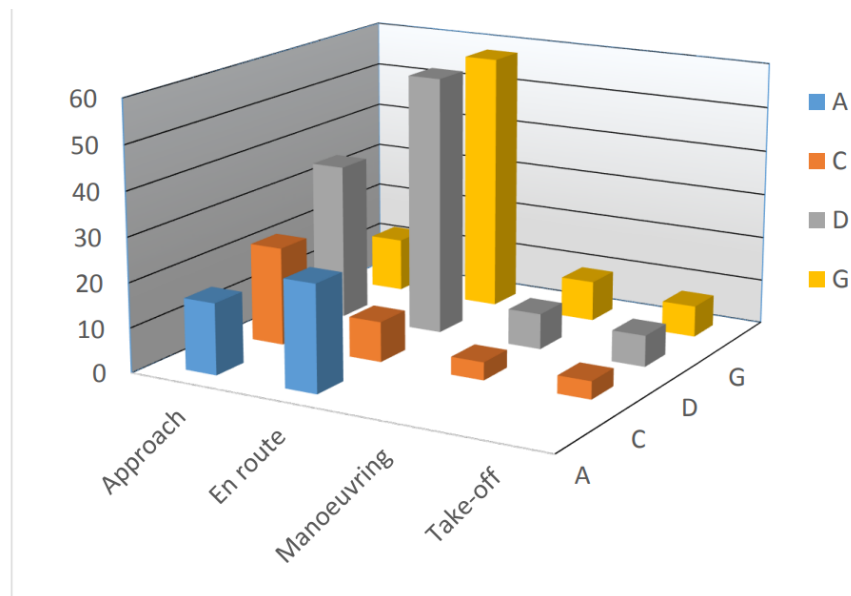


Рис. 2.6 – Події у повітряному просторі за фазою польоту, період: 2010 - травень 2016, A-D – класи повітряного простору: Approach – заходження на посадку; En route – маршрут; Manoeuvring – маневрування; Take-off – зліт

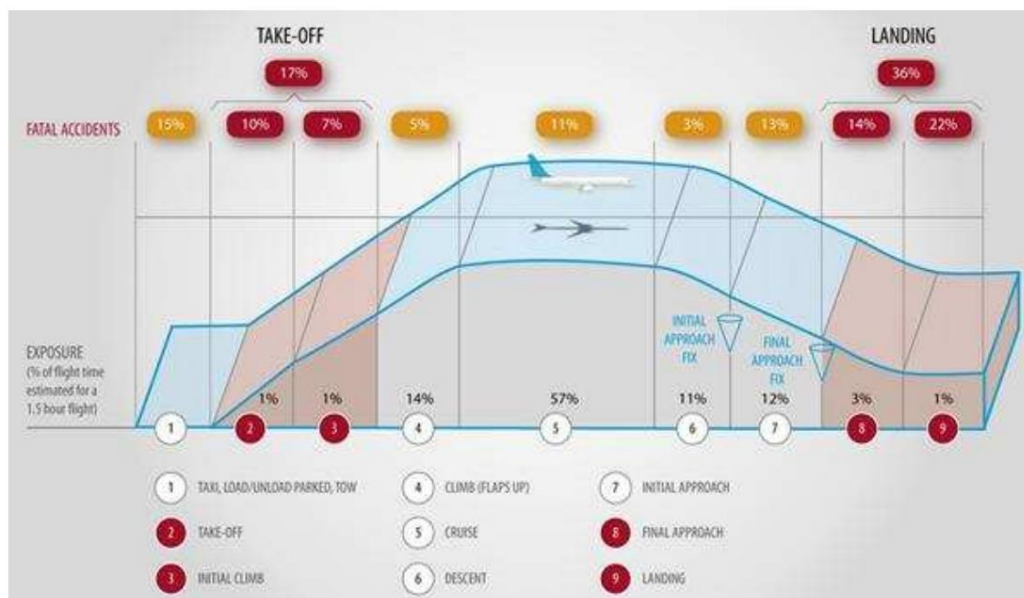


Рис. 2.7 – Розподіл авіаційних подій за етапами злітно-посадкового циклу та відповідний відсоток авіаційних подій з летальними наслідками. Статистичне зведення комерційних рейсів, 1959 – 2008, Boeing [24]: Approach – заходження на посадку; Take-off – зліт

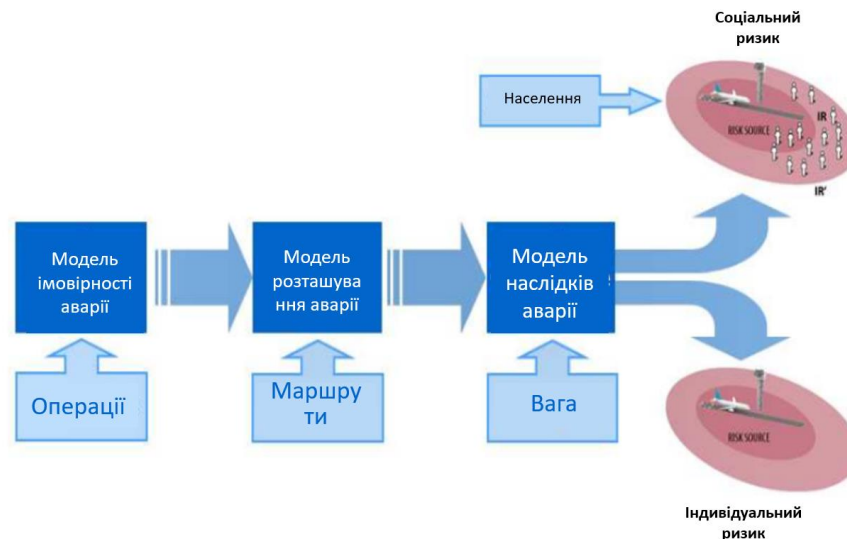


Рис. 2.8 – Типова методика оцінки ризику, розроблена NLR для управління ризиком третьої сторони на приаеродромній території

На основі такого підходу можна скласти логічну схему розвитку авіаційної події. Не зважаючи на причини та їх ймовірнісні характеристики – наслідком буде зіткнення з землею, що потенційно несе загрози третій стороні – населенню, що перебуває на землі, об’єктам господарської діяльності.

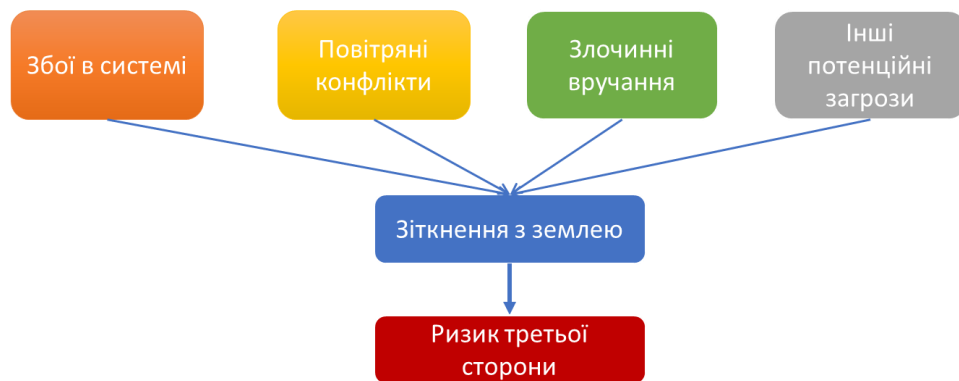


Рис. 2.9 – Схема розвитку авіаційної події ПС UAM

Порівняно з ПС на середній і великій висоті наземне середовище має більший вплив на роботу дронів на низькій висоті та оцінку ризику. Поверхнєве середовище міста є складним. Будинки, високі рослини, зелена рослинність тощо забезпечують певний захист для людей або майна на землі у разі падіння дрона, але і одночасно можуть його спровокувати. У той же час їх також можна використовувати як звукові бар’єри для зменшення шумового забруднення. Будівлі можуть захистити людей і

зменшити ризики. Водночас уражена площа на землі та щільність населення на поверхні визначають кількість людей, які постраждали від ризику.

Для комплексної оцінки ризиків системи UAM та потенційних загроз місцевому населенню запропоновано таку принципову схему (рис. 2.10). Принциповими частинами моделі оцінки ризику системи UAM є:

1. Модуль оцінки ризиків від БПЛА
2. Модуль оцінки ризику від пасажирських ПС системи UAM
3. Блок сумарної оцінки ризику експлуатації ПС

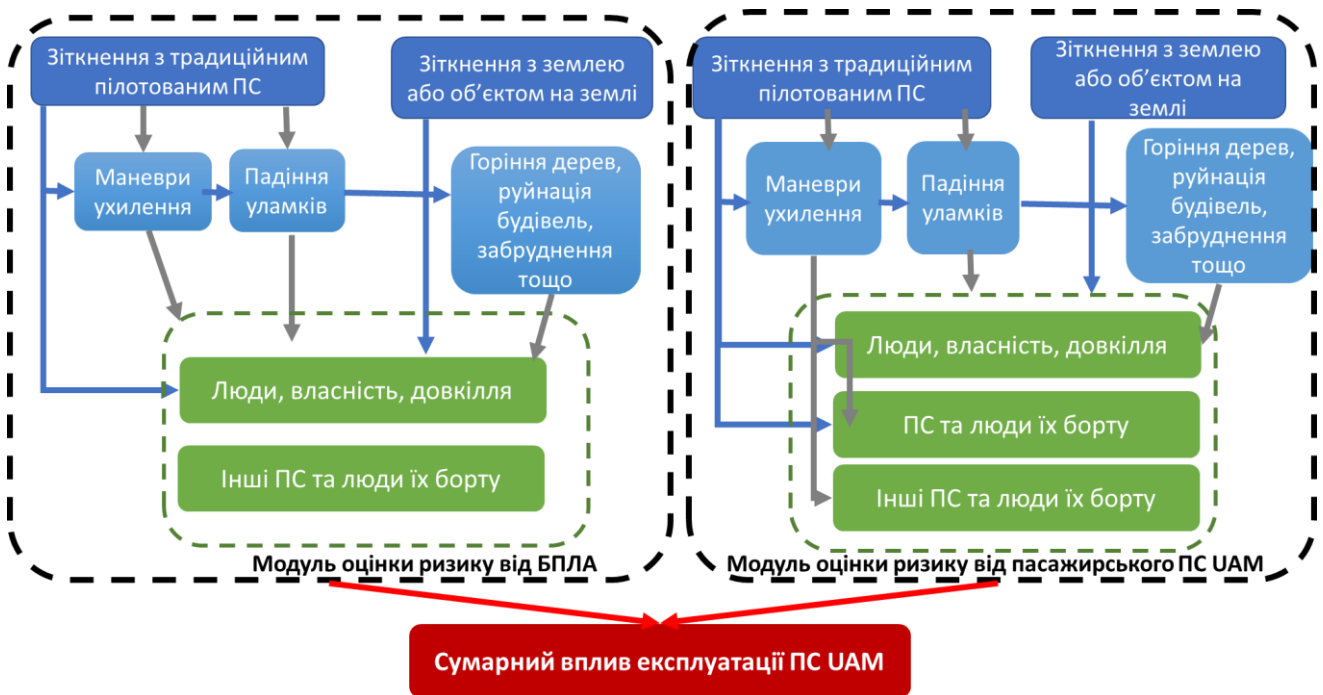


Рис. 2.10 – Принципова схема для оцінки ризиків третьої сторони в умовах експлуатації змішаного парку ПС (на основі матеріалів [25]).

В даному дослідженні для управління ризиками UAM використовується підхід до оцінки ризику третьої сторони та їх безпечних рівнів, який запропоновано в роботі [13].

Індивідуальний ризик $R_I^i(y)$ загибелі незахищеної особи на локації y , що спричинена i -м польотом визначається такими чином:

$$R_I^i(y) = P(i) \cdot \rho_s(i) |A(i)| P(F|y \in A(i)), \quad (2.1)$$

де $P(i)$ – ймовірність аварії з падінням на землю;

$\rho_s(i)$ – модель розльоту уламків ПС на місцевості;

$|A(i)|$ – розміри площі, ураженої уламками;

$P(F|y \in A(i))$ – модель незахищеної летальності.

Індивідуальний середньорічний ризик $R_I^{UAM}(y)$ визначено за формулою:

$$R_I^{UAM}(y) = 1 - \prod_{i=1}^N [1 - R_i^i(y)], \quad (2.2)$$

де N – кількість польотів за рік.

Оскільки часто $R_i^i(y) \ll 1$, тоді цю залежність можна спростити до:

$$R_{Cground}^{UAM} = \sum_{i=1}^N R_{Cground}^i, \quad (2.3)$$

де $R_{Cground}$ визначається за наступним співвідношенням

$$R_{Cground}^i = E\{n_i^{UAM}\} = \int_Y R_i^i(y) [1 - P(S|y, i) \rho(y) dy],$$

де $P(S|y, i)$ – модель захисту в укритті;

$\rho(y)$ – щільність населення;

Y – територія дослідження.

Поріг безпеки для річного індивідуального ризику в міжнародних рекомендаціях, національних нормативах [11] вказує на те, що ймовірність летальних випадків на рік у кожній локації не повинна перевищувати 10^{-6} .

Річний колективний наземний ризик (Annual CGR) [13] – це очікувана кількість смертельних випадків третьої сторони на землі в певній зоні Y через прямі наслідки аварій під час польотів UAM протягом певного року. Цей показник ризику враховує кількість польотів на рік. Для виконання N рейсів на рік річний CGR є таким

Середньорічний колективний ризик не повинен перевищувати $1.65 \cdot 10^{-3}$ нещасних випадків за рік [21,22].

Таблиця 2.3 – Узагальнена інформація про різні види ризику та їх оцінку

Ризик	Колективний наземний ризик	Середньорічний індивідуальний ризик	Середньорічний колективний ризик
Формула	$R_{Cground}^i / T_i$	$R_I^{UAM}(y) = 1 - \prod_{i=1}^N [1 - R_i^i(y)]$	$R_{Cground}^{UAM} = \sum_{i=1}^N R_{Cground}^i$
Кількість польотів	1	N	N

Ризик	Колективний наземний ризик	Середньорічний індивідуальний ризик	Середньорічний колективний ризик
Одиниця	Кількість небажаних наслідків за одиницю часу	Ймовірність загибелі за рік	Кількість небажаних наслідків за рік
Безпечне значення	10^{-6}	10^{-6}	$1.65 \cdot 10^{-3}$

До слабких сторін такого підходу відноситься недостатність вихідних даних для різних груп БПЛА та нових концептів UAM для пасажирських перевезень. Оскільки ринок стоїть на початку свого розвитку і багато типів ПС знаходиться на перших стадіях технологічного розвитку, тому статистична інформація переважно недоступна.

Необхідність же визначення очікуваних значень ризику для прийняття управлінських рішень може призвести до хибкої оцінки загроз.

2.4 Додаткові обмеження та ризики, пов'язані з експлуатацією системи повітряного міського транспорту

Дослідницька програма «Горизонт 2020» щодо розумного, зеленого та інтегрованого транспорту визначила два ключові критерії для досягнення сталої системи UAM: зменшення загального впливу на навколишнє середовище та контроль шумового та візуального забруднення [46].

Ці два чинники також називаються основними після питань про безпеку льотів та ризик третьої сторони, коли мова йде про соціальне сприйняття ідеї впровадження системи UAM.

Тому в роботі вони розглядаються в якості потенційних додаткових обмежень.

Шум повітряних суден UAM

Типовий підхід для авіаційних адміністрацій полягає в об'єднанні маршрутів руху ПС UAM у коридори, щоб тримати трафік відокремленим від інших користувачів повітряного простору. NASA також розглядає коридори (Зони спеціальних правил польотів) або навіть використання визначених маршрутів вертольотів як потенційні концепції для нових операцій UAM [11]. Організація UAM

у спосіб, подібний до сьогоденного комерційного повітряного руху, тобто з використанням певних коридорів, має на меті гарантувати безпечну роботу. Однак, дотримуючись цієї концепції, проблема шуму буде існувати не лише поблизу вертипортів, де транспортні засоби злітають і приземляються, а й для громадян, які живуть або працюють під цими коридорами, які будуть перебувати на висоті від 15 до 500 м. Робота або проживання під або поблизу такого коридору призведе до надмірного впливу шуму на громадян і може стати обмежувальним фактором для UAM. Очікуване зниження якості життя та/або вартості нерухомості через UAM може призвести до судових позовів та/або обмежень пропускної здатності.

Серед усіх джерел шуму навколишнього середовища найбільше дратує авіаційний шум. Коли різні види транспорту оцінюються разом, авіаційний шум, швидше за все, визначає рівень роздратування [46]. У психоакустичних тестах суб'єкти оцінювали звук дронів як більш дратівливий, ніж звук дорожніх транспортних засобів, при однаковому рівні звукового тиску. Досліджуючи вплив шуму дрона від невеликого мультикоптера, доданого до різних аудіовізуальних сценаріїв, виявлено в звукових ландшафтах зі зниженим шумом транспорту, суб'єкти в положенні пішохода повідомляють про вищу сприйняту гучність і роздратування порівняно зі сценами, на які сильно впливає шум дорожнього руху, хоча шум дрона залишався постійним на рівні 65 дБА в усіх сценаріях. Однак замість того, щоб розглядати це як доказ потенціалу маскуванню шуму дронів за допомогою вуличного руху, результати скоріше підкреслюють негативні аспекти шуму дронів на мешканців таких доріг: оскільки трафік змінюється протягом дня, іноді буде низька інтенсивність руху, коли місцеві мешканці набагато більше відчувають гучність і дратування дронів («роздратування в 6,4 рази вище, ніж без шуму дронів», наприклад, вночі [46]).

Існує кілька підходів, які дозволяють оцінювати роздратування від шуму UAM. Найбільш точними очікуються оцінки, отримані під час натурних акустичних вимірів та моніторингу шуму в реальних умовах експлуатації, але більшість типів ПС UAM нині перебувають на етапах технологічного розвитку, які ще далекі від експлуатації в міському середовищі. Тому прогнозування та моделювання шуму залишається

базовим інструментом в цьому напрямі. При цьому в літературі описані кілька можливих напрямів для вирішення цього завдання:

- 1) Використання існуючих моделей для авіаційного шуму та затверджених методик (рекомендації ICAO Doc 9911, ECAC doc 29) – зокрема, моделей INM, AEDT та інших верифікованих ICAO.
- 2) Розробка окремих моделей для прогнозування шуму від окремих типів ПС, зважаючи на тип силової установки, розмір ПС тощо
- 3) Розроблення спеціального середовища для моделювання шуму від системи UAM.

В основі моделювання нормативних критеріїв шуму навколишнього середовища лежать рівні звукового тиску (SPL). SPL є широко використовуваним показником рівня шуму, який широко представлений як у літературі, так і в емпіричних даних, і має хорошу кореляцію з людським сприйняттям гучності. SPL залежить від відстані i , отже, добре підходить для кількісного визначення того, як шум поширюється від ПС. SPL є найвищим безпосередньо під і над БПЛА, тобто під кутом 90 градусів. Зміна звукового тиску через зміну вищезгаданого кута змінюється дещо по-різному в залежності від частот, випромінюваних БПЛА, але загалом можна сказати, що змінюється лінійно зі зміною кута спостереження. Крім того, існує позитивний, але зменшуваний зв'язок між вагою БПЛА та SPL [47].

Ілюстрація кутів і відстаней, які використовуються для розрахунку шумового забруднення представлено на рис. 2.10. У лівій частині малюнка блакитне поле позначає вимірювальний прилад або спостерігач. A^M і A_{ig}^U представляють кути, тоді як D^M і D_{ig}^U представляють відстані. Пунктирні лінії ілюструють проекцію графіка на квадрати на землі, які формують розрахункову сітку.

Основне рівняння для SPL, виміряного в децибелах, що сприймається в центрі квадрата, коли ПС розташоване у вершині i , можна сформулювати так:

$$SPL_{ig} = M^S + O \cdot (90 - A^M) + 20 \cdot \log_{10}(D^M) - O \cdot (90 - A_{ig}^U) - 20 \cdot \log_{10}(D_{ig}^U) \quad (2.4)$$

де M^S – рівень звукового тиску, вимірний або прогнозований в стартовій точці (опис рівня звуку в джерелі);

другий та третій члени формули – перетворюють рівень звуку в джерелі на рівні звуку під маршрутом (кут 90 градусів) та на відстані 1 м;

два останні члени додатково коригують кут A_{ig}^U і відстань D_{ig}^U , щоб отримати відповідне значення SPL у центрі площі g.

A^M та A_{ig}^U кути спостереження за ПС;

D^M і D_{ig}^U – відстані від спостерігача та розрахункових точок до джерела (ПС UAM).

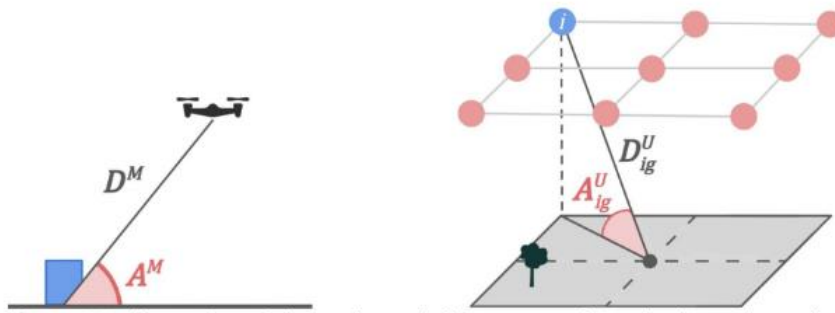


Рис. 2.11 – Геометрія оцінки шуму ПС UAM, модель шуму [47]

В даній роботі для оцінки шуму в джерелі використано модель шуму INM з коригування відносно вихідних даних щодо потужності силової установки та типу планера для ПС з масою більше 1 тони. Шум для ПС UAM меншої ваги було оцінено на основі наявних даних про шум від виробників та методом експертних оцінок.

Візуальне забруднення UAM

Візуального забруднення – це негативний вплив, який людина може зазнати, спостерігаючи за візуальним забруднювачем і його рухом. Візуальний забруднювач можна визначити як будь-який об’єкт або штучну структуру, що погіршує якість зображення. Це включає будь-який елемент, який може вважатися недоречним у певному зовнішньому чи внутрішньому ландшафті, а також стосується просторового розташування елементів і його рухом. Візуальний забруднювач можна визначити як будь-який об’єкт або штучну структуру, що погіршує якість зображення. Це включає в себе будь-який елемент, який може вважатися недоречним у певному зовнішньому

чи внутрішньому ландшафті, а також стосується просторового розташування елементів і того, чи вони виглядають організованими. Приклади візуальних забруднювачів включають сміття, рекламу, будівлі, які виділяються з навколишньої інфраструктури, непорядковані пакувальні місця, дроти та вітрові електростанції.

Таким чином, БПЛА чи інших ПС UAM, що рухаються містом, також можна вважати візуальним забруднювачем, а широке використання таких ПС може ще більше посилити забруднення.

Існують різні методи вивчення візуального забруднення, але незважаючи на це, візуальне забруднення важко оцінити кількісно, оскільки існує мало досліджень, а візуальне забруднення є суб'єктивним (EASA 2021).

Візуальне забруднення може мати різноманітні наслідки для здоров'я, такі як відволікання, розлади настрою, стрес, тривога, надмірна стимуляція та зниження ефективності роботи [46,47].

Крім того, візуальне забруднення може посилити сприйняття інших забруднюючих речовин, таких як шум, оскільки спостереження за джерелом шумового забруднення може посилити сприйняття людини та робити вклад в сприйняття шуму, викликаючи більше роздратування та інших негативних стресових реакцій.

Візуальне забруднення від UAM можна зменшити за допомогою різних методів. Наприклад, БПЛА слід уникати польотів у відкритих і густонаселених районах. Якщо цього уникнути неможливо, ПС повинні літати на великих висотах і виглядати меншими за розміром.

Результати опитування проведеного в 2022 році в Норвегії показали, що більше ніж у третині респондентів питання візуального забруднення UAM викликають занепокоєння (рис. 2.12) [46].

Оскільки об'єктивного параметру для оцінки візуального забруднення не існує (багато залежить від особистих уподобань, а, отже є суб'єктивною оцінкою), окремі дослідження [47] пропонують такі комбіновані індикатори для оцінки візуального забруднення:

$$VP = \frac{3.83}{\sqrt{Dist}} + 0.97\sqrt{Num} + 20.12 \sqrt{\frac{Num}{Dist}} - 0.19Purp + 0.89Info$$

де Num — кількість ПС, які можна побачити,

$Dist$ — відстань від спостерігача до найближчого об'єкту системи UAM,

$Purp$ — 1, якщо це ПС, 0, якщо інший об'єкт

В умовах коли вплив додаткової інформації є невизначеним, спрощена функція враховує лише відстань і кількість БПЛА:

$$VP = 47.76 \frac{Num^{0.65}}{Dist^{0.67}} + 1.37$$

(2.5)

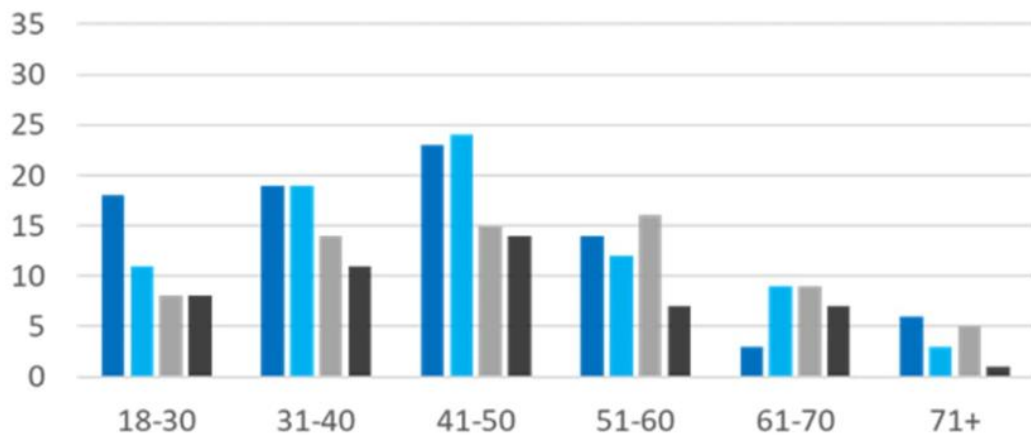


Рис. 2.12 Результати опитування щодо візуального забруднення ПС UAM, відсоток опитаних за віковими групами: синій – не турбує; блакитний – скоріше не турбує; сірий – трохи турбує; темно-сірий – дуже турбує

Характеристики повної моделі візуалізовано на рис. 2.13 та 2.14. Візуальне забруднення зменшується, коли ПС знаходиться далі, а більша кількість БПЛА спричиняє більше візуального забруднення. Однак зменшення забруднення згладжується зі збільшенням відстані. Це означає, що відстань не має великого значення, якщо відстань збільшується з 1000 м до 1400 м, але є велика різниця, якщо вона збільшується з 50 м до 450 м. Те ж саме стосується кількості БПЛА, де різниця між 1 і 2 БПЛА більша, ніж між 8 і 9.

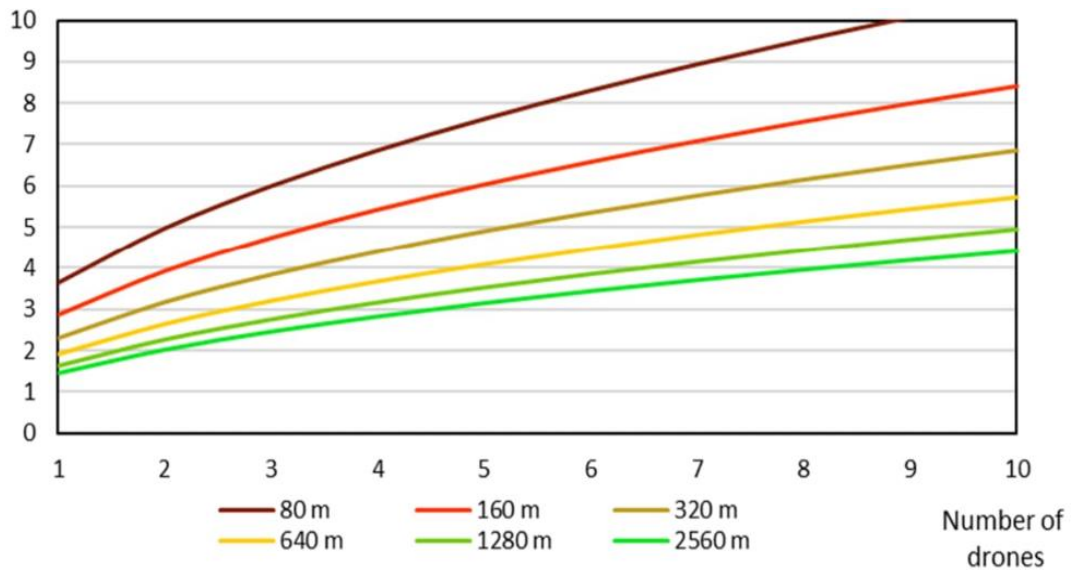


Рис. 2.13 – Графік залежності візуального забруднення від різної кількості ПС (повна модель)

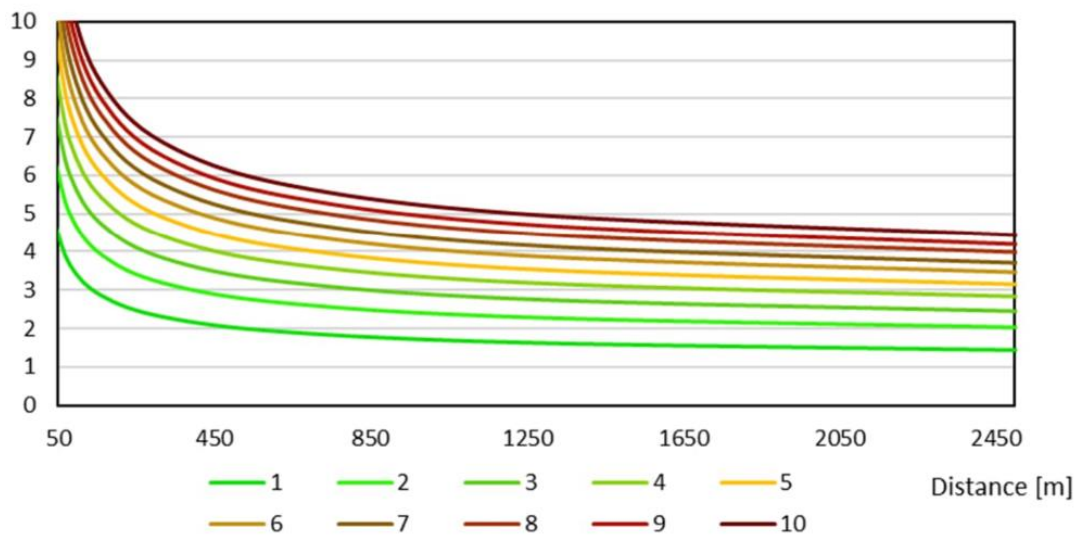


Рис. 2.15 – Графік залежності візуального забруднення для різної кількості ПС (повна модель)

Далі в роботі для оцінки візуального забруднення використано спрощену функцію візуального забруднення.

Модель перешкод навколишнього середовища

Як описано в розділі 1, при розробленні коридорів для руху ПС УАМ, виборі оптимальних маршрутів та режимів експлуатації ПС необхідно урахувати просторові обмеження повітряного простору, які визначаються рельєфом місцевості,

функціональним призначенням території, висотністю забудови щодо. В дослідженні [47] запропоновано фіксувати обмеження. Карту міського ландшафту слід визначити в вигляді тривимірної сітки координат, для якої встановити дозволені межі перебування ПС UAM (рис. 2.16). Довжина лінії сітки між перетинами ліній позначається L . На сітці визначається неорієнтований зважений граф із набором вершин і ребер. Краї представляють місця, де можуть літати ПС, тоді як вершини представляють або місця, які має відвідати ПС, або можливі точки проходження під час подорожі. ПС дозволяється літати вертикально вгору або вниз, або горизонтально вправо, вліво, вперед, назад або по діагоналі.

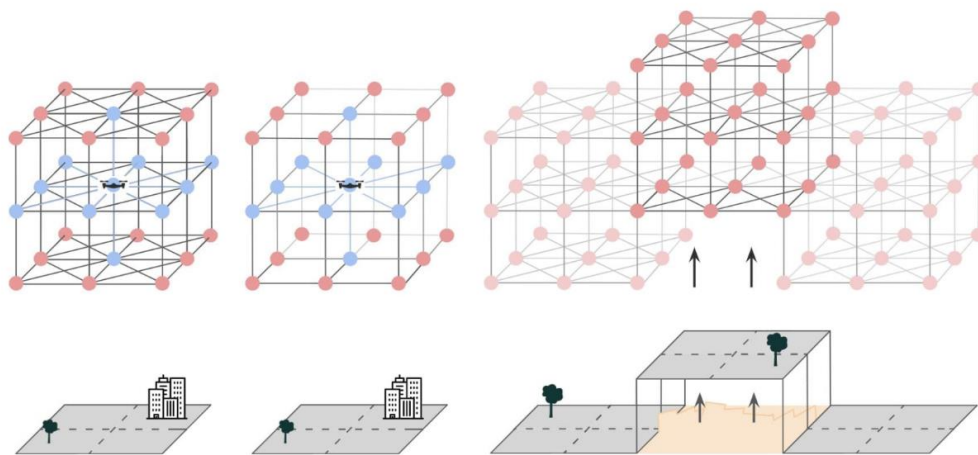


Рис. 2.16 – Схема встановлення висотних обмежень

У лівій і середній частині малюнка сині вершини та ребра є можливими ходами для ПС в даній вершині. Середня частина малюнка має спрощену графіку порівняно з лівою частиною для кращої читабельності. Сірі квадрати внизу є основними квадратами, які відокремлені від літаючого графіка. Пунктирні лінії ілюструють проекцію графіка на основні квадрати, пропускаючи діагональні краї для зручності читання. Права частина малюнка показує, як графік зміщується залежно від висоти площі землі.

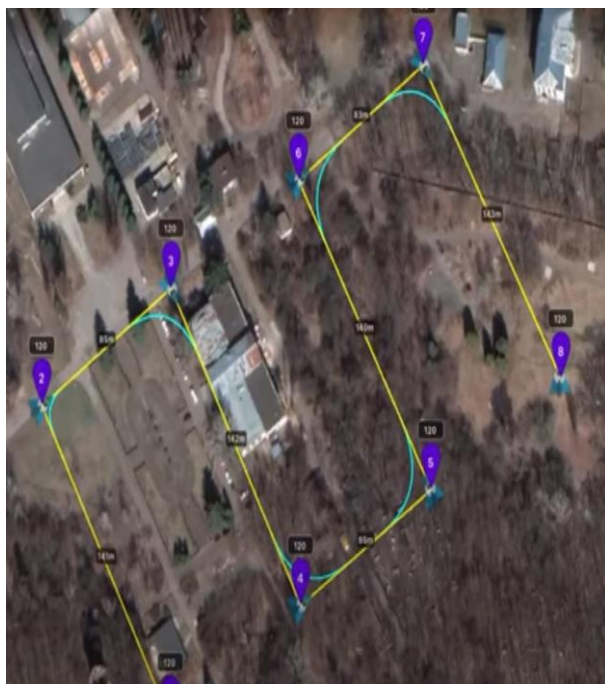
2.5 Метод максимуму ентропії для оптимізації роботи системи міських повітряних перевезень із урахуванням ризиків техногенного характеру

В даній роботі взаємодію UAM з зовнішніми чинниками пропонується розглядати як складну систему з багатьма обмеженнями. Функціонування такої системи без урахування всього комплексу обмежень, які вимагаються суспільством до таких джерел небезпеки, буде означати інші характеристики та мікрорівні цієї системи. Як показав аналізу чутливих чинників (розділ 2) система UAM на поточному етапі технологічного розвитку є чутливою до таких обмежень:

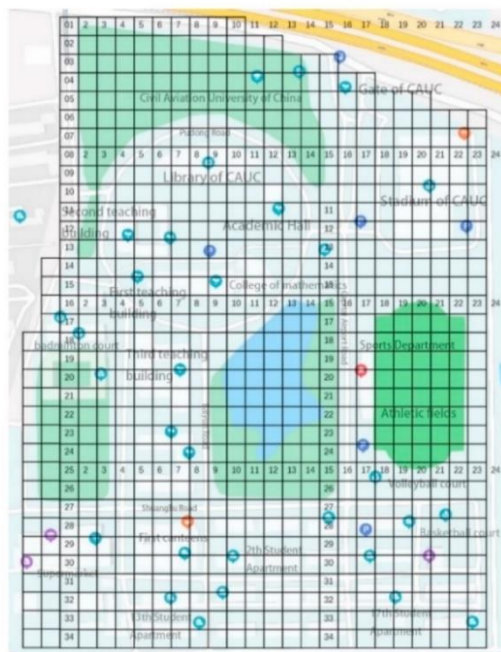
- вимоги пов'язані з рівнем ризику третьої сторони (пріоритет 1);
- дотримання вимог щодо акустичного забруднення (пріоритет 2);
- дотримання відстані від об'єктів потенційної небезпеки, критичної інфраструктури, а також для дотримання умов конфіденційності (пріоритет 3);
- додаткові обмеження на вимогу місцевих жителів (візуальне забруднення, електромагнітні впливи тощо) (пріоритет 4).

Вимоги щодо дотримання безпеки третьої сторони пропонується встановлювати в контрольних точках вздовж маршрутів руху ПС залежно від розташування житлової забудови та (або щільності населення). Такий підхід описано в публікаціях [29-31]. Візуалізація такого підходу показана на рис. 2.17, а. Як альтернатива може бути використане розбиття досліджуваної території на сектори чи сегменти (рис. 2.17,б) [28] і обмеження вставляти посегментно. В будь-якому випадку в умовах експлуатації багатьох типів ПС UAM з різними літно-технічними, ваговими та безпековими характеристиками на різних режимах експлуатації та маршрутами, такі задачі є багатокритеріальними. Додавання додаткових екологічних, експлуатаційних чи економічних обмежень лише ускладнює завдання.

Багатокритеріальна оптимізація, яка включає кілька чинників з різних груп пріоритетів досліджується в дуже обмеженій кількості публікацій щодо системи UAM в цілому. Так, для безпілотних літальних апаратів розроблено модель оцінки ризику третьої сторони для міської логістики, яка була побудована з урахуванням трьох аспектів: ризик порушення конфіденційності через бортові камери, приховані загрози безпеці через політ на низькій висоті та ризик шуму від гвинтів [29].



а)



б)

Рис. 2.17 – Підходи до аналізу території та визначення контрольних точок: а) маршрут ПС UAM з фіксацією контрольних точок б) розбиття території на квадрати визначеного розміру [29]

Хоча дослідження окремих чинників, які можуть потенційно обмежувати пропускну спроможність системи UAM продовжуються. Зокрема, аналізуються проблеми пов'язані з акустичним забрудненням [30,31,32], включаючи розробку ефективних метрик та моделей для прогнозування рівнів шуму з метою прийняття управлінських рішень. Зокрема, показано, що сприйняття громадського шуму навколо вертипортів і вздовж маршрутів ПС UAM сильно буде залежати від парку ПС, які будуть використовуватися в певному населеному пункті. Акустичні характеристики ж окремих типів ПС UAM можуть істотно відрізнитися (через значний спектр геометрії повітряних суден, силових установок, злітних мас, способу керування тощо).

Для вирішення задачі вибору найбільш ефективних режимів експлуатації ПС UAM було побудовано моделі взаємодії між окремими елементами системи UAM та навколишнім середовищем. З цією метою було обрано цільової функції та методу оптимізації.

Для вирішення поставлених в роботі завдань було розроблено:

1. Модель оптимізації режимів експлуатації UAM, яка включає лише обмеження щодо ризику третьої сторони (пріоритет 1).
2. Модель оптимізації для багатьох чинників (пріоритети 1-4).

В даній роботі в якості методу оптимізації обрано метод максимуму ентропії системи, що досліджується. За такого підходу якості цільової функції розглядається максимізація системи, основними елементами якої є ПС UAM, які можуть займати відмінні положення (мікростани). За такого підходу в якості обмежень розглядаються наприклад, вимоги безпеки щодо ризику третьої сторони в контрольних точках чи зонах.

Нехай T_{ij}^k – кількість ПС UAM типу i , які використовують маршрут j на вертикальний профіль k . Розподілом елементів системи UAM, що експлуатується є матриця $T = \{T_{ij}^k, i = 1 \dots N_i, j = 1 \dots N_j, k = 1 \dots N_k\}$, яка характеризує її макровластивості.

Отже, кожен елемент матриці T розглядається на двох рівнях: як множина окремих ПС, а по-друге як загальна кількість ПС кожного типу Q_i , або як кількість всіх ПС, що використовують маршрут Q_j , чи режим експлуатації k (Q_k). Існує багато станів системи T_{ij}^k , які відповідають вказаним макростанам.

Припускаємо, що кожен мікростан може бути реалізований з однаковою ймовірністю. Тоді можна оцінити найбільш імовірний розподіл ПС, оцінивши кількість мікростанів. При цьому в якості обмежень можуть бути визначено ті критерії взаємодії система UAM – довкілля, які потенційно обмежують пропускну спроможність: вимоги безпеки польотів, експлуатаційні обмеження, екологічні вимоги, витрати енергії тощо.

Отже, обмеженням для даної системи є кількість ПС, які визначають її структуру:

$$\sum_{j,k} T_{ij}^k = Q_i \quad (2.6)$$

та

$$\sum_{i,k} T_{ij}^k = Q_j \quad (2.7)$$

Інші обмеження можуть бути визначені в аналогічній формі:

$$\sum_{i,j,k} T_{ij}^k Z_{ij}^k(l) = 1, \quad (2.8)$$

де $Z(l)$ – обмеження, яке має бути виконане в контрольній точці l .

Обмеження щодо ризику третьої сторони встановлюються в контрольних точках l :

$$\sum_{i,j,k} T_{ij}^k \cdot R_{ij}^k(l) = 1, \quad (2.9)$$

$$\text{де } R_{ij}^k(l) = \frac{R_{\Sigma l}}{r_{ij}^k(l)}, \quad R_{\Sigma l} = \sum_{ijk} r_{ij}^k(l).$$

Для знаходження найбільш імовірного розподілу множини значень матриці $T = \{T_{ij}^k, i = 1 \dots N_i, j = 1 \dots N_j, k = 1 \dots N_k\}$ необхідно оцінити повне число станів системи, що відповідає розподілу T_{ij}^k [32, 33]

$$W(\{T_{ij}^k\}) = \frac{T!}{T_{11}^1!(T - T_{11}^1)!} \cdot \frac{(T - T_{11}^1)!}{T_{12}^1!(T - T_{11}^1 - T_{12}^1)!} \dots = \frac{T!}{\prod_{i,j,k} T_{ij}^k!}. \quad (2.10)$$

Для того, щоб знайти найбільш імовірне значення T_{ij}^k , необхідно максимізувати $W(\{T_{ij}^k\})$ при дотриманні обмежень (2.1) – (2.3):

$$\ln W(\{T_{ij}^k\}) \rightarrow \max \quad (2.4)$$

Максимізація ентропії. Коли є неповна інформація, але відомі певні обмеження, принцип максимальної ентропії вказує на вибір розподілу, який задовольняє ці обмеження, одночасно максимізуючи загальну невизначеність або ентропію. Коли ми маємо неповну інформацію про систему, але знаємо певні умови або середні значення, максимізація ентропії допомагає визначити розподіл ймовірностей, який найбільш відповідає цим умовам. Це означає обрати найбільш невизначений (або «найменш упорядкований») розподіл ймовірностей, зберігаючи при цьому відому інформацію. Об'єктивна функція спрямована на максимізацію ентропії за умови відомих обмежень. Шляхом максимізації ентропії метод спрямовується на отримання розподілу з найменшим упорядкованістю, який відображає доступну інформацію.

Цей підхід корисний у випадках, коли інформація обмежена, але є певні умови або обмеження. Наприклад, якщо ми знаємо середнє значення результату деякого експерименту і певні обмеження на його можливі значення, максимізація ентропії дозволяє визначити ймовірнісний розподіл, який максимально узгоджується з цими умовами, не роблячи надмірних припущень про те, як саме повинен

Згідно з методом максимуму ентропії еквівалентом монотонної функції $\ln W$ є ентропія системи, що являє собою логарифм імовірності реалізації певного розподілу. Тому, цільовою функцією може бути визначена максимізація ентропії системи, що розглядається.

Лагранжіан при дотриманні обмежень (1-3) бути мати такий вигляд [32]

$$Lr = \ln W(\{T_{ij}^k\}) + \sum_i \lambda_i (Q_i - \sum_{j,k} T_{ij}^k) + \sum_j \mu_j (D_j - \sum_{i,k} T_{ij}^k) + \sum_l \beta^l (1 - \sum_{i,j,k} T_{ij}^k R_{ij}^{kl}) \quad (2.11)$$

λ, β, μ – множники Лагранжа.

Зважаючи, що

$$\frac{\partial Lr}{\partial T_{ij}^k} = -\ln T_{ij}^k - \lambda_i - \mu_j - \sum_l \beta^l R_{ij}^{kl}, \quad (2.12)$$

з системи рівнянь: $\frac{\partial Lr}{\partial T_{ij}^k} = 0$ можна знайти значення T_{ij}^k . [33]

$$T_{ij}^k = \exp(-\lambda_i - \mu_j - \sum_l \beta^l \cdot R_{ij}^{kl})., \quad (2.13)$$

де

$$\exp(-\lambda_i) = Q_i \cdot [\sum_{j,k} \exp(-\mu_j - \sum_l \beta^l \cdot R_{ij}^{kl})]^{-1},$$

$$\exp(-\mu_j) = D_j \cdot [\sum_{i,k} \exp(-\lambda_i - \sum_l \beta^l \cdot R_{ij}^{kl})]^{-1}.$$

Якщо ввести позначення $A_i = \frac{\exp(-\lambda_i)}{Q_i}$, $B_j = \frac{\exp(-\lambda_j)}{D_j}$, T_{ij}^k записується в такому

вигляді:

$$T_{ij}^k = A_i B_j Q_i D_j \cdot \exp(-\sum_l \beta^l \cdot R_{ij}^{kl}), \quad (2.14)$$

$$\text{де } A_i^{s+1} = [\sum_{j,k} B_j^s \cdot D_j \cdot \exp(-\sum_l \beta^l \cdot R_{ij}^{kl})]^{-1},$$

$$B_j^{s+1} = [\sum_{i,k} A_i^s \cdot Q_i \cdot \exp(-\sum_l \beta^l \cdot R_{ij}^{kl})]^{-1}.$$

За формулою (2.8) здійснюється ітераційний розрахунок T_{ij}^k до того моменту, доки не буде досягнуто виконання умов $|A_i^{s+1} - A_i^s| \leq \delta$, $|B_j^{s+1} - A_j^s| \leq \delta$ за умови дотримання обмежень (2.1) - (2.3) (де δ - похибка розрахунків).

Особливість даного методу полягає в існуванні множини розв'язків, що дозволяє врахувати не лише обмеження щодо ризиків третьої сторони, але й інші експлуатаційні енергетичні, екологічні обмеження.

Метод визначення оптимального розподілу ПС має певні обмеження в використанні, зокрема при збільшенні кількості контрольних точок l , збільшується тривалість ітераційного пошуку та погіршується збіжність. Тому на практиці задля оптимізації розрахунків, використовується модифікований алгоритм розрахунку.

Зокрема, вводиться параметр апіорної оцінки стану системи v_{ij} на основі інформації про аналогічні періоди експлуатації в минулому. За умови, якщо інформація недоступна, або відсутній досвід експлуатації аналогічних систем, значення параметру апіорної оцінки визначаються рівними.

Наприклад, в найпростішому випадку, параметр апіорної оцінки може бути визначений наступним чином:

$$v_{ij} = C \cdot a_i \cdot b_j, \quad \sum_{i,j} v_{ij} = 1, \quad (2.15)$$

де a_i – апіорна оцінки частоти використання ПС типу i , або обмеження використання чи виведення зі структури парку ПС;

b_j – оцінка частоти використання маршруту, або обмеження його використання за певних експлуатаційних умов.

Якщо ж в контрольній точці l , обмеження за певними критеріями не дотримуються, тоді приймається $v_{ij} = 0$, що виключає можливість використання даного типу ПС на маршруті чи за певним вертикальним профілем.

В межах модифікованого ентропійного методу логарифм імовірності реалізації матриці T_{ij}^k записується у вигляді:

$$\ln W(\{T_{ij}^k\}) = \ln \left(\frac{T!}{\prod_{i,j,k} T_{ij}^{k!}} \prod_{i,j,k} v_{ij}^{T_{ij}^k} \right) \approx \ln T! + \sum_{i,j,k} T_{ij}^k \left(\ln \left(\frac{v_{ij}}{T_{ij}^k} + 1 \right) \right) \rightarrow \max. \quad (2.16)$$

Враховуючи обмеження (2.1) та (2.3), оптимальний розподіл T_{ij}^k відповідно до методу дослідження [32], визначається таким чином:

$$T_{ij}^k = \frac{v_{ij} \cdot Q_i \cdot \exp(-\sum_l \beta^l \cdot P_{ij}^{kl})}{\sum_{j,k} v_{ij} \cdot \exp(-\sum_l \beta^l \cdot P_{ij}^{kl})}, \quad \sum_{i,j} v_{ij} = 1. \quad (2.17)$$

Додаткові обмеження можуть бути пов'язані з випадками необхідності дотримання рівнів шуму, відстані до об'єктів критичної інфраструктури, візуальним забрудненням, тощо (див. табл. 2.4)

Наприклад, в області UAM, обмеження на рівні шуму можуть визначати маршрути або висоту польоту для зменшення впливу на житлові райони. Відстані до об'єктів критичної інфраструктури, таких як лікарня, пожежна станція або електростанція, також можуть вимагати встановлення обмежень для забезпечення безпеки та неперешкодження їх функціонування.

При моделюванні таких ситуацій метод максимальної ентропії може враховувати ці додаткові обмеження, використовуючи їх як частину умов для створення ймовірнісного розподілу. Це дозволяє створювати моделі (табл. 2.4), які не лише враховують наявну інформацію, а й дотримуються важливих обмежень і критеріїв, що є ключовими для досягнення оптимальних рішень або проектування систем.

Таблиця 2.4 – Оптимізація експлуатаційних можливостей системи UAM з урахуванням додаткових обмежень

Додаткові обмеження	Форма обмежень
Рівень шуму	$\sum_{i,j,k} T_{ij}^k \cdot P_{ij}^k(l) = 1,$ $P_{ij}^k(l) = \frac{1}{T_0} 10^{0,1 \cdot L_{Aij}^{kl} - 0,1 \cdot L_{Aeq}^l}$

Додаткові обмеження	Форма обмежень
Вимоги щодо візуального забруднення	$\sum_{i,j,k} T_{ij}^k \cdot VP_{ij}^k(l) = 1,$ $VP_{ij}^k(l) = \frac{VP_{\Sigma l}}{vp_{ij}^k(l)},$
Дотримання обмежень повітряного простору, в тому числі вістань до об'єктів критичної інфраструктури	$\sum_{i,j,k} T_{ij}^k \cdot LL_{ij}^k(l) = 1,$ $LL_{ij}^k(l) = \frac{LL_{\Sigma i}}{ll_{ij}^k(l)},$
Обмеження щодо витрат енергії	$\sum_{i,j,k} T_{ij}^k \cdot E_{ij}^k(l) = 1,$ $E_{ij}^k(l) = \frac{E_{\Sigma j}}{e_{ij}^k(l)},$
Обмеження емісії (для ПС на вуглецевому чи водневому паливі)	$\sum_{i,j,k} T_{ij}^k \cdot M_{ij}^k = 1,$ $M_{ij}^k = \frac{Mp_{\Sigma ir}}{m_r^{ГДВ}}$

Висновки до РОЗДІЛУ 2

Отже, в даному розділі проаналізовано існуючу практику та методи оцінки ризику третьої сторони в сфері повітряних перевезень та показано відмінності між експлуатацією ПС UAM та традиційними ПС цивільної авіації.

Запропоновано для оптимізації системи UAM за критеріями ризику третьої сторони, рівнями шуму та іншими значимими експлуатаційними показниками використовувати модифікований метод максимуму ентропії системи. Запропонований метод дозволяє проводити оптимізацію одночасно за багатьма чинниками та робити пошук оптимального стану системи, зважаючи на її мінімальні зміни.

РОЗДІЛ 3. ОБГРУНТУВАННЯ ВИБОРУ РЕЖИМІВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ СИСТЕМИ МІСЬКИХ ПОВІТРЯНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ

3.1 Підготовка вихідних даних для опису розрахункових сценаріїв за визначеними критеріями

Для вибору оптимальних режимів експлуатації УАМ із умов ризику третьої сторони та інших важливих параметрів функціонування системи необхідними є такі групи вихідних даних:

1. Структура парку ПС УАМ та його характеристики.
2. Сітка доступних маршрутів руху ПС та вертикальних профілів.
3. Контрольні точки, для яких необхідним є дотримання обмежуючих параметрів.
4. Апріорні дані про експлуатацію ПС УАМ.
5. Експлуатаційні обмеження (щодо кількості операцій ПС на маршруті, обмеження використання окремих процедур тощо)
6. Рівні ризику та інших параметрів контрольних точках для кожного типу ПС та комбінації його елементів.
7. Інша доступна інформація про урбанізовану територію (щільність населення, відстані до об'єктів критичної інфраструктури тощо).

Для оцінки в контрольних точках ризику третьої сторони було використано залежності, представлені в Розділі 2, а також програмне забезпечення 3PRISK (розробка НАУ), для оцінки шуму програмне забезпечення INM (FAA) з коригуванням рівнів шуму від ПС та результати оцінок виробників транспортних засобів. Візуальне забруднення оцінювалося на основі залежностей, які представлені в Розділі 2.

В якості розрахункових типів ПС в даному дослідженні було обрано 5 транспортних засобів УАМ (рис. 3.1), які є представниками різних класів і окрім свого призначення (пасажирські чи вантажні, пілотовані чи керовані віддалено), мають

відмінні льотно-технічні характеристики, а, отже, створюють різні рівні ризику, шуму та інших несприятливих чинників.



а)



б)



в)



г)



д)

Рис. 3.1 – Зовнішній вигляд ПМ UAM: а) БПЛА MATRICE 600 PRO 216 б) БПЛА Кондор; в) Ehang 216 г) Joby S2 д) Joby S4

Типи ПС та їх характеристики представлено в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Характеристика розрахункових типів ПС UAM

Тип ПС	<i>i</i>	Модель	Геометричні розміри	Маса	Кількість пасажирів та багажу	Дальність польоту, км	Максимальна швидкість
БПЛА	1	MATRICE 600 PRO	1133 мм	15.5 кг	6 кг вантажу	6 км	65 км/год
БПЛА	2	<i>v_{ij}</i> .	діаметр ротора – 6 м	476 кг	180 кг	200 км	120 км/год
Автономний віддалено керований ПС	3	Ehang 216	5.6 м	360 кг + 260 кг	2 пасажир	35 км	160 км/год
ПС з вертикальним зльотом	4	Joby S2	розмах 8.5 м	900 кг	1 пілот + 1 пасажир	320 км	320 км/год
ПС з вертикальним зльотом	5	Joby S4	розмах крил 10.7 м довжина 7.3 м	1,815 кг	1 пілот + 4 пасажирів	241.4 км	322 км/год

Всі ці ПС мають можливість використання в межах щільної житлової забудови, оскільки мають вертикальний зліт та заходження на посадку, а також можливість зависання в повітрі.

Для побудови сітки маршрутів слід аналізувати попит на перевезення, особливості міської забудови, функціональне призначення територій та відстані, що долаються тощо. Залежно від локацій вертипортів та злітно-посадкових майданчиків – такі траєкторії для легких типів ПС UAM будуть досить сильно різнитися.

Оскільки середовище польоту є статичним (рис. 3.2) і, не змінюється між плануванням маршруту та фактичним польотом, усі рішення щодо планування траєкторії приймаються до зльоту UAM, хоча створення нового системного плану польоту не має бути тривалим завданням і повинне легко відбуватися залежно від обставин.

Щоб визначити шлях для кожного БПЛА, слід шукати компроміс між найбільш значимими факторами: ризик, візуальне забруднення та шумове забруднення, час польоту, енергетичні витрати тощо.

Такі ж самі припущення повинні бути виконані для вертикального профілю польоту (рис. 3.2). Хоча існує оптимальна за витратами енергії висота польоту для кожного ПС, в реальних умовах мова може йти про діапазони значень висот над поверхнею перешкод, або ж навіть про ешелони за умови щільного руху для уникнення зіткнень між ПС UAM. В даній роботі розглядається можливість експлуатації ПС на таких ешелонах:

- $k=1$, $H = 20$ м (недоступний для $i=3,4,5$)
- $k=2$, $H = 150$ м;
- $k=2$, $H = 150$ м (недоступний для $i=1$);

Можливість використання того чи іншого маршруту чи вертикального профілю визначається в матриці v_{ij} .

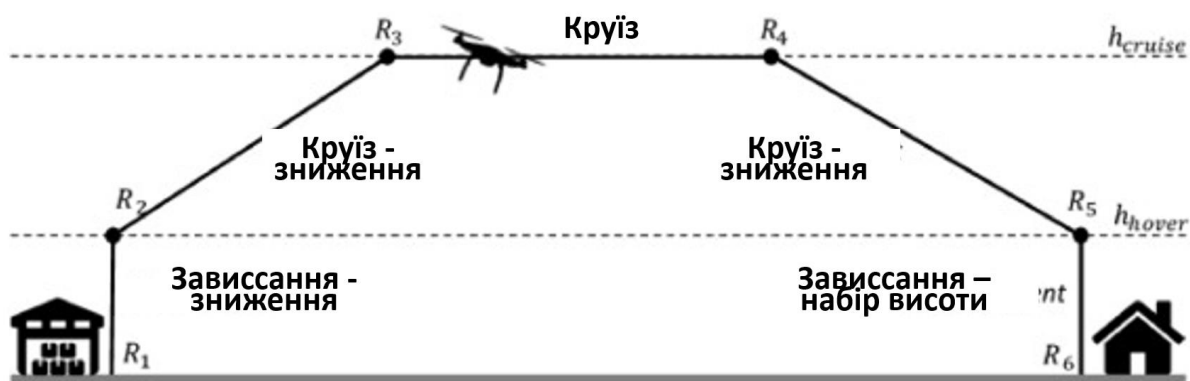


Рис. 3.2 – Типовий вертикальний профіль руху ПС UAM з вертикальним зльотом та заходженням на посадку.

Апріорні коефіцієнти v_{ij} формувалися на основі доступної інформації про умови експлуатації ПС та зовнішні чинники. У випадку відсутності такої інформації, вони можуть бути прийняті рівними.

Контрольні точки повинні обиратися поблизу маршрутів (або під ними) на поверхні землі (або на рівні сприйняття людиною), так щоб вклад інших джерел впливу можливо було розпізнати. Їх кількість не обмежується, але має бути достатньою для прийняття управлінських рішень.

В Додатку II до дипломного дослідження наведено текст програмного коду, який було розроблено для виконання оптимізаційного завдання.

3.2 Розрахункові сценарії для міських повітряних перевезень за критерієм ризик третьої та щільності населення

Для демонстрації можливостей розробленої моделі було досліджено кілька сценаріїв експлуатації ПС UAM в межах міської забудови.

Сценарії 1 та 2 слугують для демонстраційних цілей та містить невелику кількість вертипортів та обмежуючих чинників.

Сценарій 3 наближений до реальних умов експлуатації, розташування житлової забудови та логістичних потреб одного з мікрорайонів м. Києва і включає експлуатацію ПС UAM з різним призначенням.

Сценарій 1. Типи ПС, що експлуатуються ($i = 1 \dots 5$) описані в табл. 3, їх загальна кількість складає $N=100$, структура парку ПС та експлуатаційні обмеження описані в табл. 3.2. Для даного сценарію розглядаються три альтернативні маршрути ($j= 1 \dots 3$) для зв'язку між двома злітно-посадковими майданчиками (вертипортами V1 та V2, рис. 3.3, ненаправлений граф) та три режими експлуатації ($k=1 \dots 3$).

Таблиця 3.2 – Структура парку ПС та експлуатаційні обмеження (сценарій 1)

i	N_i
1	300
2	300
3	200
4	150
5	50
Разом	1000

Вихідні дані щодо рівнів ризику в контрольних точках для кожного можливого стану системи представлено в табл. 3.3.

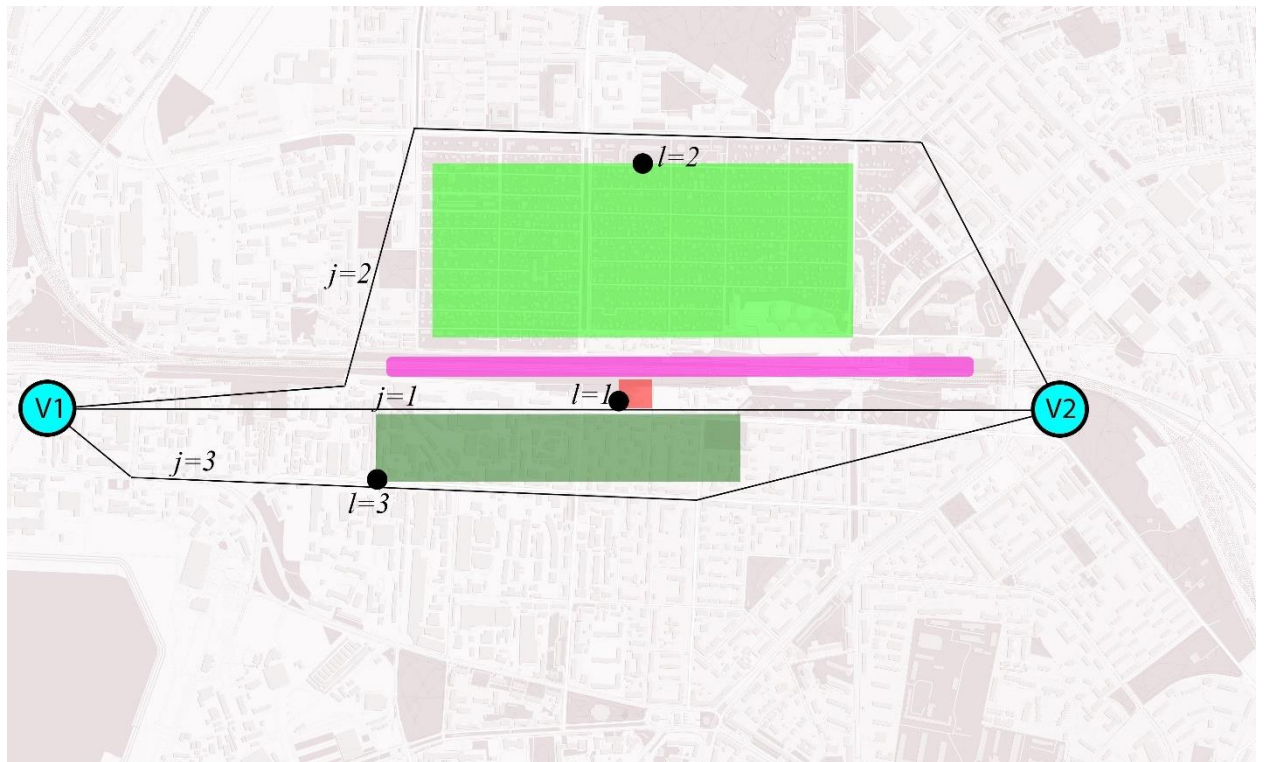


Рис. 3.3 – Схема взаємного розташування вертипортів (V1, V2), маршрутів руху ПС ($j= 1 \dots 3$) та контрольних точок ($l= 1 \dots 3$) – для сценаріїв 1 та 2: салатований – одноповерхова забудова, зелений – багатоповерхові будівлі; маджента – об’єкт критичної інфраструктури; червоний – навчальний заклад

Таблиця 3.3 – Рівні індивідуального ризику в контрольних точках за умови експлуатації T_{ij}^k

k	i	j		
		1	2	3
1	1	3.3E-10	8.3E-15	1.1E-14
	2	3.3E-10	7.3E-12	1.1E-13
	3	3.3E-10	6.7E-15	1.1E-09
	4	1.0E-07	5.2E-14	1.5E-09
	5	1.7E-07	3.3E-11	2.0E-08
2	1	3.7E-09	1.0E-11	7.1E-15
	2	5.3E-09	4.3E-11	7.7E-14
	3	5.7E-09	3.0E-12	1.0E-13
	4	5.0E-08	6.3E-12	2.0E-12
	5	1.7E-07	4.0E-10	3.4E-11
3	1	3.7E-10	3.3E-17	4.0E-17
	2	4.0E-09	1.3E-16	6.0E-15
	3	3.7E-10	4.3E-14	5.3E-11
	4	1.3E-08	5.7E-12	6.7E-12

<i>k</i>	<i>i</i>	<i>j</i>		
		1	2	3
	5	1.7E-07	6.0E-11	3.0E-10
Точка 2 (l=2)				
<i>k</i>	<i>i</i>	<i>j</i>		
		1	2	3
1	1	9.4E-15	8.3E-10	1.1E-14
	2	7.2E-12	7.3E-10	1.1E-13
	3	5.2E-15	6.7E-10	1.1E-09
	4	7.7E-14	6.7E-10	1.5E-09
	5	2.3E-11	3.3E-08	2.0E-08
2	1	1.0E-11	6.0E-10	7.1E-15
	2	4.3E-11	4.3E-10	7.7E-14
	3	3.0E-12	5.0E-10	1.0E-13
	4	6.3E-12	6.3E-10	2.0E-12
	5	4.0E-10	4.0E-10	3.4E-11
3	1	3.3E-17	3.3E-09	4.0E-17
	2	1.3E-16	1.3E-08	6.0E-15
	3	4.3E-14	4.3E-09	5.3E-11
	4	5.7E-12	4.7E-09	6.7E-12
	5	6.0E-11	6.0E-09	3.0E-10
Точка 3 (l=2)				
<i>k</i>	<i>i</i>	<i>j</i>		
		1	2	3
1	1	4.0E-10	8.3E-10	1.0E-09
	2	1.7E-09	7.3E-10	1.1E-09
	3	2.0E-09	6.7E-10	1.1E-09
	4	6.7E-08	6.7E-10	1.5E-09
	5	1.7E-07	3.3E-09	2.0E-07
2	1	3.7E-09	6.0E-10	7.0E-10
	2	5.3E-09	4.3E-10	7.7E-10
	3	5.7E-09	5.0E-10	1.0E-09
	4	5.0E-08	6.3E-10	2.0E-09
	5	1.7E-07	4.0E-10	1.8E-08
3	1	3.7E-09	3.3E-09	4.0E-09
	2	4.0E-09	1.3E-08	5.0E-09
	3	3.7E-09	4.3E-09	5.3E-09
	4	1.3E-08	4.7E-09	6.7E-09
	5	1.7E-07	6.0E-09	3.0E-08

За умови вихідного розподілу ПС за маршрутами та режимами експлуатації (табл. 3.4) в контрольній точці $l=1$ спостерігається перевищення прийнятних рівнів ризику (табл. 3.5, вихідний розподіл).

За моделлю, що була запропонована в Розділі 2, за допомогою програми з Додатку II, було виконано оптимізацію стану системи UAM, таким чином, щоб застосувавши мінімальні зміни до вихідного розподілу дотриматися вимоги щодо прийнятного рівня ризику в контрольних точках 1...3 на рівні 10^{-6} .

Таблиця 3.4 – Вихідний розподіл T (сценарій 1)

k	i	j		
		1	2	3
1	1	30	30	40
	2	40	35	35
	3	20	30	30
	4	20	20	20
	5	10	10	10
2	1	30	40	30
	2	30	40	30
	3	20	20	20
	4	10	20	10
	5	0	10	0
3	1	30	40	30
	2	30	20	40
	3	20	20	20
	4	20	10	20
	5	10	0	0

Таблиця 3.5 – Сумарні рівні ризику в контрольних точках до та після оптимізації сценарію 1

Контрольна точка, l	1	2	3
Вихідний розподіл	0.000019955	2.09071E-08	7.9569E-07
Оптимізований розподіл	9.745E-07	1.22093E-08	2.2875E-07

Таким чином, запропонований ризик-орієнтований підхід на основі методу максимуму ентропії дозволяє визначити оптимальний розподіл за маршрутами та режимами експлуатації ПС УАМ Сценарію 1 з мінімальними змінами в порівнянні з базовим розподілом для дотримання вимог щодо рівнів ризику в контрольних точках.

Сценарій 2 охоплює типи ПС, які досліджуються в Сценарії 1 ($i = 1 \dots 5$) (табл. 30). Інші умови експлуатації та обмеження аналогічні встановлених в Сценарії 1 (табл. 3.2). Для даного також сценарію розглядаються три альтернативні маршрути ($j = 1 \dots 3$) для зв'язку між двома злітно-посадковими майданчиками (вертипортами V1 та V2, рис. 3.3, ненаправлений граф) та три режими експлуатації ($k = 1 \dots 3$). Проте, на відміну від сценарію 1 додається обмеження щодо рівнів шуму в контрольних точках. Так еквівалентні рівні шуму на межі житлової забудови мають становити не більше 65 дБА. На додачу до вихідних даних щодо рівнів ризику (табл. 3.3) слід врахувати рівні звукового тиску в контрольних точках, що формуються внаслідок експлуатації ПС УАМ (табл. 3.6).

Таблиця 3.6 – Рівні звукового тиску в контрольних точках за умови експлуатації T_{ij}^k

Точка 1 ($l=1$)				
k	i	j		
		1	2	3
1	1	41.1	42.5	39.4
	2	42.5	43.9	40.7
	3	43.1	44.5	42.2
	4	43.4	44.8	43.1
	5	44.8	46.2	45.5
2	1	40.0	41.4	38.5
	2	41.4	42.8	39.8
	3	42.0	43.4	41.3
	4	42.3	43.7	42.2
	5	43.7	45.1	44.6
3	1	38.5	40.0	37.1
	2	39.9	41.4	38.4
	3	40.5	42.0	39.9
	4	40.8	42.3	40.8
	5	42.2	43.7	43.2

Точка 1 (l=1)				
k	i	j		
		1	2	3
Точка 2 (l=2)				
k	i	j		
		1	2	3
1	1	41.2	42.5	44.2
	2	42.7	43.9	45.7
	3	43.3	44.5	46.3
	4	64.3	44.6	67.3
	5	45.0	46.2	48.0
2	1	44.0	41.4	47.0
	2	41.6	42.8	44.6
	3	54.0	43.4	57.0
	4	42.0	43.7	45.0
	5	43.9	45.1	46.9
3	1	38.8	40.0	41.8
	2	40.2	41.4	43.2
	3	51.1	42.0	54.1
	4	41.1	42.3	44.1
	5	42.5	43.7	45.5
Точка 3 (l=2)				
k	i	j		
		1	2	3
1	1	43.1	39.4	40.0
	2	52.7	40.7	40.4
	3	53.0	42.2	42.6
	4	63.0	43.1	43.5
	5	66.1	45.5	46.0
2	1	42.9	38.5	39.6
	2	51.5	39.8	39.4
	3	52.9	41.3	41.2
	4	59.9	42.2	42.4
	5	61.3	44.6	44.6
3	1	42.0	37.1	37.1
	2	48.0	38.4	38.7
	3	50.7	39.9	37.0
	4	58.8	40.8	38.6
	5	60.2	43.2	40.1

Враховуючи обмеження щодо ризику третьої сторони (табл.3.3) та

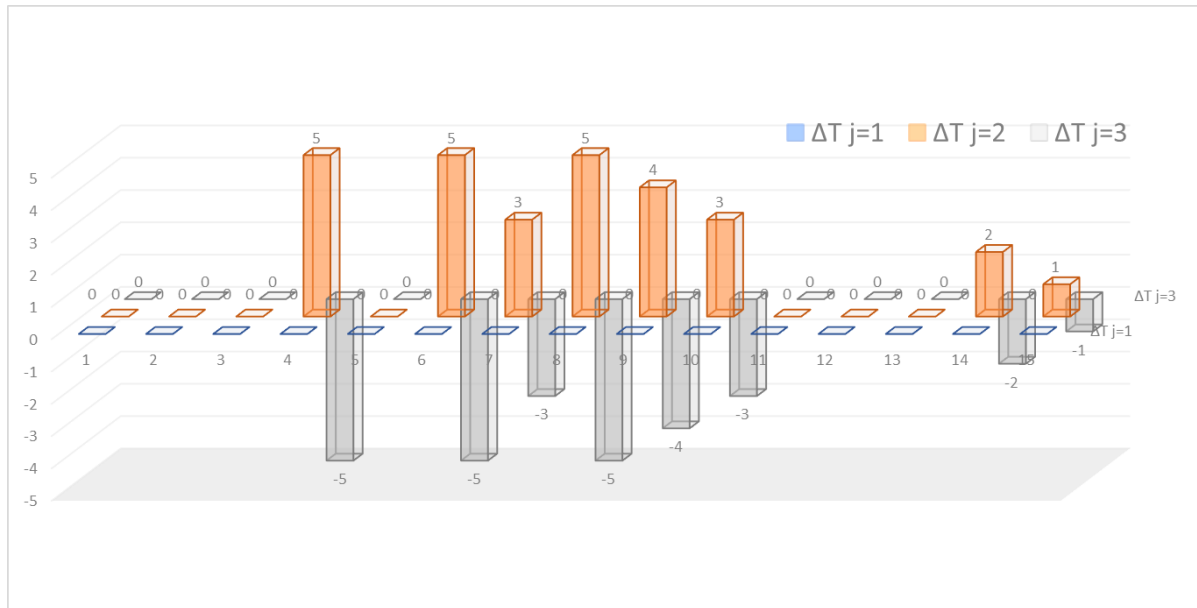


Рис. 3.4 – Відмінності у результатах розподілу за Сценарієм 1 та Сценарієм

Сценарій 3 демонструє можливості застосування запропонованого ентропійного методу оптимізації для кількох критеріїв оцінки.

Таким чином, вихідні дані для сценарію 3 (1) подано у табл. 3.1 та 3.2., де визначено матриці з такими параметрами:

- тип повітряного судна UAM $i = 1..5$;
- маршрути $j = 1..20$;
- вертикальні профілі $k = 1..3$;
- контрольні точки $l = 1..22$;

ДОПИСУЮ

Апріорний коефіцієнт визначається за формулою:

$$v_{ij}^k =$$

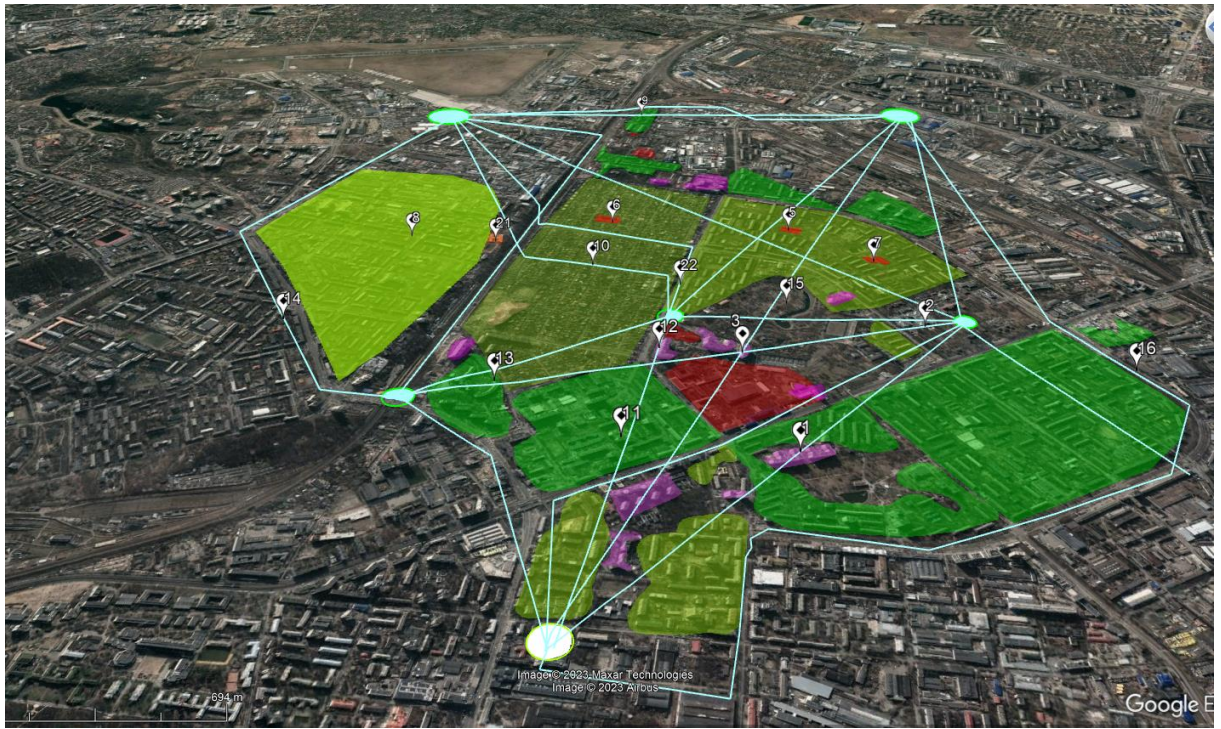


Рис. 3.5 – Карта-схема сценарію 3: к

3.3 Рекомендації щодо зниження техногенного та екологічного навантаження на довкілля при експлуатації повітряних суден системи міської транспортної мобільності

Аналіз літературних джерел та особливості застосування результатів моделювання дозволяють визначити основні групи заходів безпеки, які слід ураховувати при розробленні системи UAM та управління рівнем техногенних загроз, що надходять від цієї системи. До таких заходів слід включати:

- раціональний дизайн інфраструктури системи;
- дотримання безпекових стандартів та вимог щодо встановлення зон громадської безпеки навколо великих злітно-посадкових хабів, де існує ймовірність перевищення прийнятних рівнів ризику;
- ефективне маршрутування;
- збереження прогресу у дослідженнях та розробці нових типів ПС UAM, які здатні забезпечувати вищі рівні безпеки;
- суспільне сприйняття та усвідомлення загроз;
- координація та співпраця.

Дизайн інфраструктури. Правильне проектування інфраструктури відіграє ключову роль у зменшенні ризиків для сторонніх осіб. Стратегічне розташування інфраструктури UAM подалі від житлових або екологічно чутливих зон зменшує можливий вплив на сторонніх осіб. Коректно спроектовані зупинки та станції зменшують ризик подій, що можуть вплинути на навколишні спільноти або екосистеми.

Регулювання та стандарти є основою для захисту третіх осіб та пасажирів від ризиків, пов'язаних з UAM. Ці протоколи встановлюють правила безпеки, гарантуючи дотримання строгих заходів безпеки. Відповідність цим стандартам зменшує можливість подій або інцидентів, які можуть завдати шкоди спостерігачам або навколишньому середовищу.

Впровадження ефективної маршрутизації не тільки оптимізує час подорожей, але й мінімізує можливість впливу на сторонніх осіб. Уникнення густонаселених або

чутливих територій зменшує ймовірність подій, які можуть вплинути на спостерігачів або спільноти. Це забезпечує безпечніші шляхи, зменшуючи ймовірність подій, що можуть вплинути на людей або майно.

Постійні дослідження та розробка спрямовані на покращення заходів безпеки системи UAM. Інновації, такі як системи уникнення зіткнень або покращений дизайн транспортних засобів, значно зменшують ймовірність авіаційних подій, підвищуючи загальний рівень безпеки.

Збільшення громадської свідомості про операції UAM та пов'язані з ними заходи безпеки є критичним. Навчання спільнот про маршрути польотів, протоколи безпеки та процедури надзвичайних ситуацій зменшує непорозуміння та допомагає людям приймати необхідні заходи безпеки, зменшуючи ймовірність подій, що можуть призвести до травмування чи загибелі третьої сторони.

Партнерство, координація та спільні зусилля сприяють всебічному підходу до безпеки. Партнерства між операторами UAM, регулюючими органами та місцевими спільнотами дозволяють обмінюватися знаннями та ресурсами, забезпечуючи вирішення питань безпеки в цілому. Ця співпраця підвищує протоколи безпеки та механізми реагування, тим самим зменшуючи ризики для сторонніх осіб.

Одночасно перелічені заходи мають вплив на екологічну безпеку системи, оскільки загрози третій стороні може супроводжуватися руйнацією елементів природного середовища, а експлуатація ПС UAM супроводжується зазвичай суспільно значимими впливами на довкілля.

Стратегічне планування та дизайн станцій спрямовані на мінімізацію екологічних порушень. Розумне розміщення та використання наявної інфраструктури допомагають зменшити можливі шкоди для місцевих екосистем, зберігаючи природні місця і зменшуючи турботи для дикої природи.

Впровадження інтелектуальних систем маршрутизації дозволяє оптимізувати шляхи польоту, що зменшує споживання палива (енергії) та викиди. Мінімізуючи переповнені наземні маршрути, повітряні ПС UAM можуть працювати більш ефективно, тим самим зменшуючи їх екологічний вплив та покращуючи загальне управління трафіком.

Використання електричних або гібридних електричних систем приводу значно зменшує викиди та забруднення повітря, пов'язані з операціями UAM. Завдяки використанню чистіших джерел енергії, таких як електрика, ці системи приводу зменшують викиди парникових газів та зменшують вплив на навколишнє середовище у порівнянні з традиційними двигунами на вуглеводневому пальному.

Поширення використання легких та екологічно чистих матеріалів у конструкції повітряних транспортних засобів UAM зменшує їх екологічний вплив. Крім того, підтримка сталих виробничих практик, таких як вторинна переробка матеріалів та мінімізація відходів, сприяє більш стійкому життєвому циклу для цих транспортних засобів, зменшуючи їх екологічний відбиток.

Впровадження UAM вимагає співпраці між регуляторними органами та установами на всіх рівнях, від національного до місцевого, для визначення та усунення конфліктів ролей і обов'язків. І хоча органи цивільної авіації звикли вирішувати всі питання повітряного простору, для інтеграції UAM життєво важливо, щоб міські та регіональні зацікавлені сторони брали активну роль у формуванні деяких аспектів розробки політики UAM.

Також слід інтегрувати операції UAM як компонент розумного міського планування. Планувальники повинні визначити політику в кількох сферах, щоб досягти успішної інтеграції UAM. Це завдання є також багатокритеріальним і включає:

- розробку моделей політики землекористування та зонування для сприяння реалізації інфраструктури UAM та коридорів польотів (зони громадської безпеки);
- розробку маршрутів польотів, які доповнюють існуючі види транспорту та відповідають вимогам техногенної та екологічної безпеки;
- впроваджувати мультимодальне транспортне планування на основі широкої агрегації даних про мобільність. Ці дані мають бути захищені, щоб забезпечити конфіденційність людей, і повинні включати основу для використання зібраних даних правоохоронними органами, якщо це необхідно для громадської безпеки;

- урахування інших аспектів UAM до інших планів інфраструктури розумного міста (наприклад, забезпечте належне проектування мереж бездротового зв'язку, щоб охоплювати маршрути польотів, а не лише дороги);
- активне використання методів для зниження рівня шуму та візуального забруднення у співпраці з галузевими та громадськими групами (наприклад, визначення вимог щодо шуму для вертипортів і транспортних засобів, оцінка прийнятних рівнів шуму для різних категорій землекористування, таких як житлові, інституційні, рекреаційні, комерційні, промислові та сільськогосподарські).
- встановити стандарти аналізу та звітності для включення до місцевих міських планів для майбутнього розвитку інфраструктури UAM.
- визначення заходів щодо зменшення шуму (наприклад, звукоізоляція), профілактичних заходів (наприклад, створення зон накладення шуму) та оперативних заходів (наприклад, маршрут польоту, години роботи).
- інтеграція інфраструктури UAM в існуючу транспортну інфраструктуру, такою як залізниця та автомобільний транспорт, і шукати можливості для розміщення шумних компонентів інфраструктури там, де вони будуть поєднуватися з уже існуючим шумовим фоном.

Отже, кошик можливих заходів для зниження техногенних ризиків та небажаного впливу на довкілля та населення містить досить різноманітні заходи, ефективність яких в реальних умовах експлуатації може досить істотно різнитися. Одночасно взаємозалежності, які встановлюються між значимими критеріями, можуть бути оберненими: скорочення одного чинника може спровокувати зростання іншого в тій же точці, або на альтернативних локаціях.

Для ефективного управління системою UAM в сфері техногенних ризиків та загроз в контексті сталого розвитку, в даному розділі запропоновано комплексний підхід, який враховуючи низку обмежень, на основні ентропійного методу оптимізації дозволяє визначати оптимальні параметри системи з мінімальними змінами її початкового стану.

Оптимізаційний алгоритм (Додаток І) виконано в вигляді програмного коду. Виконано моделювання для кількох демонстраційних сценаріїв. Показано можливість зменшення рівнів ризику третьої сторони та інших критеріїв до прийнятних рівнів за рахунок перерозподілу ПС за маршрутами, профілями польоту та управління структурою парку ПС.

Обраний метод оптимізації дозволяє розглядати і додаткові експлуатаційні, економічні чи інші обмеження. Зокрема, подальше удосконалення даного підходу буде спрямоване на урахування обмежень щодо витрат енергії, тривалості перевезень, візуальної складової забруднення тощо.

ВИСНОВКИ

В ході виконання дипломної роботи на тему «»було вирішено наступні завдання:

- проаналізовано структуру системи UAM; визначено основні критерії які можуть формувати надмірні техногенні та екологічні ризики під час експлуатації ПС: рівні ризику третьої сторони, рівні шуму, візуального забруднення, питання конфіденційності (Розділ 1), а також показано їх соціальну значущість в контексті провадження системи UAM;

- проаналізовано чинники, які можуть впливати на ефективність експлуатації системи UAM, в тому числі на вибір режимів експлуатації ПС системи міського повітряного транспорту. Зокрема встановлено, що такими чинниками є вимоги безпеки польотів, експлуатаційні вимоги для окремих типів ПС; просторові обмеження, щільність населення та інші (Розділ 2);

- запропоновано ризик-орієнтований підхід до управління режимами експлуатації міського повітряного транспорту, враховуючи критерії ризику третьої сторони, візуальні обмеження (Розділ 2);

- наведено результати для сценаріїв експлуатації ПС системи UAM (Розділ 3);

- сформовано рекомендації на основі запропонованого підходу (Розділ 3).

Отже, в роботі було досягнуто поставленої мети – розроблено багатокритеріальний ризик-орієнтований підхід для обґрунтування вибору оптимальних маршрутів та режимів експлуатації повітряних суден системи UAM.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в розробці підходу до обґрунтування вибору маршрутів та режимів експлуатації повітряних суден на основі методу максимуму ентропії.

Практичне застосування розробленого підходу було продемонстровано на прикладі сценаріїв експлуатації транспортних засобів UAM в межах урбанізованої забудови. Результати оптимізації дозволяють знижувати рівні ризику до прийнятних рівнів, а також дотримуватися додаткових вимог щодо рівнів шуму, візуального забруднення, а за потреби, встановлювати додаткові обмеження щодо пропускної

спроможності вертипортів чи маршрутів, енергетичної ефективності, тривалості процедури тощо.

Робота отримала позитивний відгук на міжнародних конференціях, результати дослідження було опубліковані в вигляді тез доповідей.

Таким чином, результати кваліфікаційної роботи в цілому можуть підвищити рівень техногенної безпеки UAM, пом'якшити інші прояви несприятливого впливу системи UAM на довкілля та населення, що мешкає неподалік вертипортів та маршрутів руху повітряних суден.

Можливість оптимізації роботи системи UAM та демонстраційні сценарії будуть позитивно впливати на суспільне сприйняття впровадження новітніх транспортних засобів, що набуде особливої актуальності на території України в пост-воєнний період.

СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. European Aviation Safety Agency (EASA) Full Report. Study on the Societal Acceptance of Urban Air Mobility in Europe; EASA: Cologne, Germany, 2021. // <https://www.easa.europa.eu/en/full-report-study-societal-acceptance-urban-air-mobility-europe>
2. Advanced Air Mobility (AAM) Implementation Pla. Near-term (Innovate28) Focus with an Eye on the Future of AAM. Version 1.0 / July 2023 // <https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/AAM-I28-Implementation-Plan.pdf>
3. Urban Air Mobility (UAM) Vision Concept of Operations (ConOps) UAM Maturity Level (UML) 4 Overview,” NASA, Operational Concepts and Exploration Approaches White Paper, 2020, <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20205011091/downloads/UAM%20Vision%20Concept%20of%20Operations%20UML-4%20v1.0.pdf> [retrieved 10 Dec. 2023].
4. Marzouk, Osama A.. "Urban air mobility and flying cars: Overview, examples, prospects, drawbacks, and solutions" Open Engineering, vol. 12, no. 1, 2022, pp. 662-679. <https://doi.org/10.1515/eng-2022-0379>
5. Al Haddad C, Chaniotakis E, Straubinger A, Plötner K, Antoniou C. Factors affecting the adoption and use of urban air mobility. Transp Res Part A Policy Pract. 2020 Feb;132:696–712. [10.1016/j.tra.2019.12.020](https://doi.org/10.1016/j.tra.2019.12.020).
6. Lee Ch., Bae B, Lee Y.L., Pak T.-Y. Societal acceptance of urban air mobility based on the technology adoption framework // Technological Forecasting and Social Change, Volume 196, 2023, 122807, ISSN 0040-1625 <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2023.122807>.
7. Lineberger R., Hussain A., Metcalfe M, Rutgers V. Infrastructure barriers to the elevated future of mobility. PART OF A DELOITTE SERIES ON THE FUTURE OF MOBILITY // https://www2.deloitte.com/content/dam/insights/us/articles/5103_Infrastructure-barriers-to-elevated-FOM/DI_Infrastructure-barriers-to-elevated-FOM.pdf

8. Schuchardt, B.I.; Geister, D.; Lüken, T.; Knabe, F.; Metz, I.C.; Peinecke, N.; Schweiger, K. Air Traffic Management as a Vital Part of Urban Air Mobility—A Review of DLR’s Research Work from 1995 to 2022. *Aerospace* **2023**, *10*, 81. <https://doi.org/10.3390/aerospace10010081>
9. Борис О.П. Ризик-орієнтований підхід у системі оцінювання пожежної безпеки / О. П. Борис // Інвестиції: практика та досвід. – 2018. – № 22. – С. 137-140. DOI: 10.32702/2306-6814.2018.22.137
10. ДСТУ EN IEC 31010:2022 «Керування ризиками - методи оцінки ризиків»
11. Порядок управління ризиками виникнення надзвичайних ситуацій техногенного характеру та пожеж, затв. наказом МВС № 627 від 31.07.2023 // <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1397-23#Text>
12. Концепція управління ризиками виникнення надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру, схвалено розп. КМУ № 37-р від 22 січня 2014 р. // <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/37-2014-%D1%80#n8>
13. He, X.; Jiang, C.; Li, L.; Blom, H. A Simulation Study of Risk-Aware Path Planning in Mitigating the Third-Party Risk of a Commercial UAS Operation in an Urban Area. *Aerospace* **2022**, *9*, 682. <https://doi.org/10.3390/aerospace9110682>
14. Dijkstra, E.W. A note on two problems in connexion with graphs. *Numer. Math.* **1959**, *1*, 269–271.
15. Kavragi, L.E.; Švestka, P.; Latombe, J.C.; Overmars, M.H. Probabilistic roadmaps for path planning in high-dimensional configuration spaces. *IEEE Trans. Robot. Autom.* **1996**, *12*, 566–580.
16. Karaman, S.; Frazzoli, E. Sampling-based algorithms for optimal motion planning. *Int. J. Robot. Res.* **2011**, *30*, 846–894.
17. Primatesta, S.; Scanavino, M.; Guglieri, G.; Rizzo, A. A risk-based path planning strategy to compute optimum risk path for unmanned aircraft systems over populated areas. *Proc. of the 2020 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, Athens, Greece, 1–4 September 2020; pp. 641–650.

18. Lum, C.W.; Waggonery, B. A risk based paradigm and model for unmanned aerial systems in the national airspace. In Proceedings of the AIAA Infotech at Aerospace Conference and Exhibit 2011, St. Louis, MO, USA, 29–31 March 2011
19. Ale, B.; Piers, M. The assessment and management of third party risk around a major airport. *J. Hazard. Mater.* **2000**, *71*, 1–16.
20. Blom, H.A.P.; Jiang, C.; Grimme, W.B.A.; Mitici, M.; Cheung, Y.S. Third party risk modelling of Unmanned Aircraft System operations, with application to parcel delivery service. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* **2021**, *214*, 107788. [CrossRef]
21. Bottelberghs PH. Risk analysis and safety policy developments in the Netherlands. *J Hazard Mater.* 2000 Jan 7;71(1-3):59-84. doi: 10.1016/s0304-3894(99)00072-2. PMID: 10677654.
22. Ale, BJM, & Piers, MA. "The Use of Risk Information for the Development of a Safety Policy Around an Airport." *Proceedings of the ASME 2000 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Safety Engineering and Risk Analysis*. Orlando, Florida, USA. November 5–10, 2000. pp. 51-58. ASME. <https://doi.org/10.1115/IMECE2000-1022>
23. EASA: UAS safety risk portfolio and analysis; report of safety intelligence and performance SM1.1, European Aviation Safety Agency (2016) // <https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/UAS%20Safety%20Analysis.pdf>
24. Aalmoesl R., Erkampz R., Cheungl, Y. S. Performance improvements for calculations of third party risk around . Airports. WIT Transactions on The Built Environment, 2014, V 134, p. **447 - 458**
25. Clothier, R.A., Walker, R.A. (2015). Safety Risk Management of Unmanned Aircraft Systems. In: Valavanis, K., Vachtsevanos, G. (eds) *Handbook of Unmanned Aerial Vehicles*. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-90-481-9707-1_39
26. EUROCONTROL: Feasibility study on the integration of third party risk near airports into IMPACT, 2015 - 130 p. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/publication/files/d2-report-on-the-feasibility-of-integrating-tpr-into-impact.pdf>

27. ICAO Doc 9184 Airport Planning Manual Part 2 Land Use and Environmental Control, Montréal, Quebec, Canada, Third Edition, 2002.
28. Ren, X.; Cheng, C. Model of Third-Party Risk Index for Unmanned Aerial Vehicle Delivery in Urban Environment. *Sustainability* **2020**, *12*, 8318. <https://doi.org/10.3390/su12208318>
29. Kim, J. Urban Air Mobility Noise: Further Considerations on Indoor Space. *Int. J. Environ. Res. Public Health* **2022**, *19*, 11298. <https://doi.org/10.3390/ijerph191811298>
30. Daniel S. Little, Joseph Majdalani, Roy J. Hartfield, Vivek Ahuja; On the prediction of noise generated by urban air mobility (UAM) vehicles. I. Integration of fundamental acoustic metrics. *Physics of Fluids* 1 November 2022; 34 (11): 116117. <https://doi.org/10.1063/5.0124134>
31. Daniel S. Little, Joseph Majdalani, Roy Hartfield and Vivek Ahuja. "Integrated Computational Aeroacoustics for UAM Design. Part 2. Noise Characterization Metrics," AIAA 2022-3957. *AIAA AVIATION 2022 Forum*. June 2022.
32. Zaporozhets O. Predicted flight procedures for minimum noise impact / O. Zaporozhets, V. Tokarev // *Applied Acoustics*. – 1998. – Vol. 55. – No 2. – P. 128- 140.
33. Wilson A.G. Statistical Theory of Spatial Distribution Models / A. G. Wilson // *Transportation Research*. – 1967. – Vol. 1. – P. 253-269.
34. Jiang, C.; Blom, H.A.; Sharpanskykh, A. Blom, Alexei Sharpanskykh, Third Party Risk Indicators and Their Use in Safety Regulations for UAS Operations. In *Proceedings of the Virtual Event AIAA Aviation 2020 Forum*, Reno, NV, USA, 15–19 June 2020.
35. McCarthy, T.; Pforte, L.; Burke, R. Fundamental Elements of an Urban UTM. *Aerospace* **2020**, *7*, 85. <https://doi.org/10.3390/aerospace7070085>
36. Oh, S., & Yoon, Y. (2022). Data-driven risk analysis of unmanned aircraft system operations considering spatiotemporal characteristics of population distribution. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, *16*, 100732. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2022.100732>
37. C.W. Lum, B. Waggoner A risk based paradigm and model for unmanned aerial systems in the national airspace AIAA Infotech Aerosp. Conf. Exhib., 2011 (2011)

38. Ford, A.T., Mcentee, K.J., 2010. Assessment of the risk to ground population due to an unmanned aircraft in-flight failure. 10th AIAA Aviat. Technol. Integr. Oper. Conf. 2010, ATIO 2010 1, 1–12. <https://doi.org/10.2514/6.2010-9056>.
39. Bauranov A., Rakas J. Designing airspace for urban air mobility: a review of concepts and approaches Prog. Aero. Sci., 125 (2021), Article 100726
40. Raza S.A. Autonomous UAV Control for Low-Altitude Flight in an Urban Gust Environment Carleton University (2015)
41. **The European Green Deal, 2019** // <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2019%3A640%3AFIN>
42. UN Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development (UN Resolution A/RES/70/1), containing the goals (October 2015)
43. ENVISA. ASD. White Paper on Urban Air Mobility (UAM) and Sustainable Developmen. January 2023 // <https://asd-europe.paddlecms.net/sites/default/files/2023-02/UAM%20White%20Paper%20January%202023.pdf>
44. Kasliwal, A., Furbush, N.J., Gawron, J.H. *et al.* Role of flying cars in sustainable mobility. *Nat Commun* **10**, 1555 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09426-0>
45. EU Commission. Horizon 2020—Work Programme 2018–2020 Part 11: Smart, Green and IntegratedTransport. Available online: https://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/wp/2018-2020/main/h2020-wp1820-transport_en.pdf
46. Eißfeldt, H. Sustainable Urban Air Mobility Supported with Participatory Noise Sensing. *Sustainability* **2020**, *12*, 3320. <https://doi.org/10.3390/su12083320>
47. Airmour. Tobias A Granberg. D4.3 Noise and visual pollution tools and concepts, 2023, 69 p. // <https://www.unmannedairspace.info/latest-news-and-information/airmour-deliverable-4-3-study-into-noise-and-visual-pollution-and-mitigation-tools/>

ДОДАТОК І
Програмний код для задачі оптимізації

```
program ciamone01
use msflib
CHARACTER(80) filename,varname, pathbuf,airport
integer i,ii,si, j, n, k, m, x, y, xx,yu,yuu, kk,mm, pp, pp1,pp2,pp3, ST, z1, mxz, mnz,
mxzt,mnzt, nn, ah, bh, ch, dh,tt
real, pointer:: T(:, :, :), C(:, :, :, :), C1(:, :, :, :), Q(:), SEL(:, :, :, :), Lmax(:), C0(:), h(:),
Shc1(:, :, :),Shc2(:), Z(:), ZZ(:), SumY(:), SumX(:), SumM(:)
real, pointer:: EL(:, :, :, :),v(:, :), a(:), Qk(:), Pk(:), dQPk(:)
real P, Qp,Hs, SSSS, SSSS1, SSS, Qsum, F(100,100,50),Dsum, Nsum
integer, pointer::Y1(:), X1(:)
logical mask(2)
CHARACTER(80), pointer:: track (:), aircraftTYPE (:), month(:)
filename = 'rezult_4.dat'
resultat = FINDFILEQQ (filename, varname, pathbuf)
if(resultat.eq.0) go to 1000
    count = DELFILESQQ(filename)
    WRITE(*,*) "Deleted ", count, " files."
1000 continue
open (1, file='rezult_4.dat',status='new')
nn = 3
k = 5 ! k - type of aircraft
m = 10
kk = 3 ! kk - cîîâ
mm=
    ! i - type of aircraft
    !print*, 'Enter k'
    !read*, k
```

```

!print*, 'Enter m'
!read*, m

!print*, 'Enter kk'
!read*, kk

x = k
y = m
xx = kk
yyy=nn
yy=mm
allocate (T(x,y,yy),C(x,y,yy,xx),C1(x,y,yy,xx), Q(x), SEL(x,y,yy,xx),
Lmax(xx),C0(xx),h(xx),Shc1(x,y,yy),Shc2(x), Z(xx), ZZ(yyy))
allocate (EL(x,y,yy,xx),v(x,yy),a(yy),Qk(x), Pk(x),dQPk(x))
allocate (Y1(yy), X1(xx),track (y), aircraftTYPE (x),month(yy), SumY(y),SumX(x),
SumM(yy))
open(2, file ='sel.txt', status='old')
read(2,*,iostat=ios) F
Dsum=0
do i=1,100
do j=1,100
do ii=1,50
if(F(i,j,ii)>0.0001) then
Dsum=Dsum+1
else
Dsum=Dsum
end if
end do
end do
end do
Nsum=Dsum/5

```

```

close(2)
open(2, file ='sel.txt', status='old')    !Ñíîâà îððððûâââî îàø ôàéë è ÷èðàâî óæå
ïððàâèèüüí, ìðè ýòîí îù çíââî ñêîüêîî öèèèîâ S íàì íââî äâèàðü!
do si=1,Nsum
    read (2,900) x, y, yy, xx, SEL(x,y,yy,xx)
    900 Format(4i6, f7.2)
end do
close(2)
F=0
open(3, file ='vel.txt', status='old')
read(3,*,iostat=ios) F
Dsum=0
do i=1,100
do j=1,100
do ii=1,50
    if(F(i,j,ii)>0.0001) then
        Dsum=Dsum+1
    else
        Dsum=Dsum
    end if
end do
end do
end do
    Nsum=Dsum/3
close(3)
open(3, file ='vel.txt', status='old')    !Ñíîâà îððððûâââî îàø ôàéë è ÷èðàâî óæå
ïððàâèèèüüí, ìðè ýòîí îù çíââî ñêîüêîî öèèèîâ S íàì íââî äâèàðü!
do si=1,Nsum
    read (3,999) x, yy, v(x,yy)
    999 Format(2i6, f9.4)

```

```

end do
close(3)
print*, 'Sum(v)', SUM(v)
pause

```

```

x = k
y = m
xx = kk
i=0
j=0
ii=0

```

!-----ÍÀ×ÀËÎ ÐÀÑ×ÅÒÀ-----!

```

Lmax =46.2 !   âââèè   îðìàðèèâíâ
çíà÷áíèå øóìà - êâê ìðàâèè - äëÿ âñåõ òì÷â
íàèíàèíâ

```

```

C0 = 10.**(0.1*Lmax)

```

```

do xx = 1,kk   !Çàññèíàèå
ìîíòîõ ÿ÷âå SEL - òâì èìîðòì íà ìðèíâíâí
çíà÷áíèå

```

```

do x=1,k   !Ýðè çíà÷áíèå íà ìñòð
áòò ìóâââèè - ñóâñòâîâò òííâú
óðíâíü øóìà

```

```

do y=1,m   !Ïÿòîó òñèíâí ìðèÿòì
çíà÷áíèå 30.ââ ìâí ìâíÿòò

```

```

if (SEL(x,y,yy,xx)<=5.5)
then 5.6-47.6=-42
SEL (x,y,yy,xx) = 5.5
end if

```

```

end do
end do
end do

```

```

EL = SEL-47.6

```

```

C = 10.**(0.1*EL)

```

```

do yy = 1,mm

```

```

do xx = 1,kk

```

```

do x=1,k

```

```

do y=1,m

```

```

!   C1(x,y,xx)           =

```

```

C(x,y,xx)/(C0(xx)/57600)

```

```

C1(x,y,yy,xx)           =

```

```

C(x,y,yy,xx)/C0(xx)

```

```

end do
end do
end do
end do

```

```

Q(1)=4.00                                Shc2(x)                                =
Q(2)=5.00                                Shc2(x)+v(x,yy)*exp(-Shc1(x,y,yy))
Q(3)=10.00                               end do
Q(4)=1.00                                 end do
Q(5)=4.00                                 end do
Q= Q*4                                    do x = 1,k
Qsum = SUM(Q)                             do y = 1,m
print*, 'Qsum ', Qsum                    do yy = 1,mm
print*, 'Qsum '                          T(x,y,yy)=(v(x,yy)*Q(x)*ex
pause                                    p(-Shc1(x,y,yy)))/Shc2(x)
h=1.                                       end do
Z=200.                                     end do
P=2.                                       end do
Qp=3.                                       do xx = 1,kk
do x = 1,k                                Z(xx)=0
do y = 1,m                                do x=1,k
do yy = 1,mm                              do y=1,m
    Shc1(x,y,yy) = 0                      do yy = 1,mm
do xx = 1,kk                              Z(xx)=Z(xx)+T(x,y,yy)*C1(
    Shc1(x,y,yy)                          =      x,y,yy,xx)
Shc1(x,y,yy)+h(xx)*C1(x,y,yy,xx)        end do
end do                                    end do
end do                                    end do
end do                                    end do
end do                                    print*, 'Z ', Z
do x = 1,k                                print*, 'Z '
    Shc2(x) = 0                            pause
do y = 1,m                                ZZ=Z! prosto chtobi ne pachkat Z
do yy = 1,mm
print*, ' mxz =', maxloc(Z)

```



```

print*, ' mnz =', minloc(Z)
pause
Z1=loc(ZZ)
call SORTQQ (Z1,yyy,srt$integer4)
Y1=(/1,1,1/)
X1=(/1,2,3/)
do yyy=1,nn
do xx=1,kk
    if(ABS(ZZ(yyy)-
Z(xx)).lt.0.0000000001) Y1(yyy)=X1(xx)
end do
end do

!print*, 'Y1=',Y1
!pause
ah=y1(1)
bh=y1(2)
ch=y1(3)
h(ah)=0.
    do pp=1,200
        h(ah) = h(ah)+1.
        h(bh)=0.
        do pp1=1,500
            h(bh) = h(bh)+1.
            h(ch)=0.
            do pp2=1,500
                h(ch) = h(ch)+1.

do x = 1,k
do y = 1,m
do yy = 1,mm
Shc1(x,y,yy) = 0
do xx = 1,kk
Shc1(x,y,yy)
Shc1(x,y,yy)+h(xx)*C1(x,y,yy,xx)
end do
end do
end do
do x = 1,k
Shc2(x) = 0
do y = 1,m
do yy = 1,mm
Shc2(x) = Shc2(x)+v(x,yy)*exp(-
Shc1(x,y,yy))
end do
end do
end do
do x = 1,k
do y = 1,m
do yy = 1,mm
T(x,y,yy)=(v(x,yy)*Q(x)*exp(-
Shc1(x,y,yy)))/Shc2(x)
end do
end do
end do
do xx = 1,kk
Z(xx)=0
do x=1,k
do y=1,m

```

```

do yy = 1,mm
    Z(xx)=Z(xx)+T(x,y,yy)*C1(
x,y,yy,xx)
end do
end do
end do
end do

P=Sum(T)
Qp=Sum(Q)
!if((P-Qp)<0.1) go to 55
P=ANINT(P)
Qp=ANINT(Qp)
Hs = h(1)+h(2)+h(3)
if(Z(1)<=1.and.Z(2)<=1.and.Z(3)<
=1.and.ABS(P-Qp)<1) go to 55
end do
    end do
end do
55 SSSS1=Sum(T)
print*, 'Z ', Z
do x=1,k
    Qk(x)=0.
do y=1,m
do yy = 1,mm
    Qk(x)=Qk(x)+T(x,y,yy)
end do
end do
end do
write (1,501)

```

```

501 Format (/23H Ñóìà - áâç
îêðãäåîÿ)
write (1,333) SSSS1
333 Format(10x,f)
do yy = 1,mm
do x = 1,k
do y = 1,m
write (1,10303) x, y,yy,
T(x,y,yy)
10303 Format (10x,3i,f)
end do
end do
end do
do y=1,m
SumY(y)=0.
do x=1,k
do yy = 1,mm
SumY(y)=SumY(y)+T(x,y,y)
y)
end do
end do
end do
do x=1,k
SumX(x)=0.
do y=1,m
do yy = 1,mm
SumX(x)=SumX(x)+T(x,y,y)
y)
end do
end do
end do

```

```

end do
do yy = 1,mm
    SumM(yy)=0.
do y=1,m
do x=1,k
    SumM(yy)=SumM(yy)+T(x,
y,yy)
end do
end do
end do
!SumX(x), SumM(yy)
    do y = 1,m
    write (1,20303) y,SumY(y)
    20303 Format (2x,i,f)
    end do

    do x=1,k
    write (1,30303) x,SumX(x)
    30303 Format (2x,i,f)
    end do

    do yy=1,mm
    write          (1,40303)
yy,SumM(yy)
    40303 Format (2x,i,f)
    end do
T=anint(T)
do xx = 1,kk
    Z(xx)=0
do x=1,k
do y=1,m
do yy = 1,mm
    Z(xx)=Z(xx)+T(x,y,yy)*C1(
x,y,yy,xx)
end do
end do
end do
end do
print*, 'Zaa ', Z
print*, 'Z '
do x=1,k
    Pk(x)=0.
do y=1,m
do yy = 1,mm
    Pk(x)=Pk(x)+T(x,y,yy)
end do
end do
end do
dQPk=Qk-Pk
print*, 'Qk ', Qk
pause
print*, 'Pk ', Pk
pause
print*, 'Q ', Q
pause
print*, 'dQPk ', dQPk
pause
print*, 'SUM(ABS(dQPk)) ',
SUM(ABS(dQPk))
pause

```

```

    print*, '(ABS(dQPk/Q)%)' ,
ABS(dQPk/Q)*100
    pause
    SSSS=Sum(T)
    write (1,502)
    502 Format (/25H Ñóìà - ïñěå
îêđóãěåíèÿ)
    write (1,335) SSSS
    335 Format(10x,f)
    SSS=ABS(SSSS1-SSSS)

    write (1,500)
    500 FORMAT (/22H Đàçíèöà ìåæäó
ñóìàè)
    write (1,335) SSS

```

```

close(1)
Q=0
do x = 1,k
Q(x)=0
    do yy = 1,mm
    do y = 1,m
Q(x)= Q(x)+T(x,y,yy)
    end do
    end do
    end do
print*,'Q', Q
pause
end

```