

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет аеронавігації, електроніки та телекомунікацій
Кафедра аеронавігаційних систем

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри АНС

д-р техн. наук, проф.

_____ Ларін В.Ю.

« ____ » _____ 2023р

**ДИПЛОМНА РОБОТА
(ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)**

ВИПУСКНИКА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ «МАГІСТР» за освітньо-
професійною програмою

«СИСТЕМИ АЕРОНАВІГАЦІЙНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ» **Тема:**

**«Підвищення ефективності глобальної системи управління
повітряним рухом»**

Виконавець:

Кургановський Андрій Вадимович

Керівник:

Володимир Петрович Харченко

Нормоконтролер

Шмельова Тетяна Федорівна

Київ-2023

НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет аеронавігації, електроніки та телекомунікацій

Кафедра аеронавігаційних систем

Спеціальність: 272 «Авіаційний транспорт»

Освітньо-професійна програма: «Системи аеронавігаційного обслуговування»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АНС

_____ В.Ю. Ларін

« ____ » _____ 2023 р.

ЗАВДАННЯ

на виконання дипломної роботи

Кургановського Андрія Вадимовича

- 1. Тема дипломної роботи:* **«Підвищення ефективності глобальної системи управління повітряним рухом.»** затверджена наказом ректора від "14" грудня 2017 р. № 594/од
- 2. Термін виконання роботи:* з 12.07.2023 по 1.12.2023.
- 3. Вихідні дані до роботи:* документи Міжнародної організації цивільної авіації, документів Державної авіаційної служби України, інтернет джерела та статті.
- 4. Зміст пояснювальної записки:* Розглядаємо Основні принципи Глобального Управління Повітряним Рухом (GATM); Підвищення ефективності глобальної системи управління повітряним рухом; Вплив засобів автоматизації на роботу авіадиспетчерів; Прогнозування часових інтервалів

для операцій повітряного руху; Автоматичне узгодження намірів і Система перевірки для 4-D Операції на основі траєкторії; Охорона праці.

5. Перелік обов'язкового графічного (ілюстративного) матеріалу: рисунків, таблиць, формули.

6. Календарний план-графік

№ пор.	Завдання	Термін виконання	Відмітка про виконання
1.	Підготовка та написання 1 розділу «Основні принципи Глобального Управління Повітряним Рухом (GATM)»	10.09.2023 - 5.10.2023	Виконано
2.	Підготовка та написання 2 розділу «Вплив засобів автоматизації на роботу авіадиспетчерів»	11.10.2023 - 15.10.2023	Виконано
3.	Підготовка та написання 3 розділу «Прогнозування часових інтервалів для операцій повітряного руху»	16.10.2023 - 25.10.2023	Виконано
4.	Підготовка та написання 4 розділу «Автоматичне узгодження намірів і Система перевірки для 4-D Операції на основі траєкторії»	26.10.2023 - 03.11.2023	Виконано
5.	Підготовка та написання 5 розділу «Охорона праці»	04.11.2023- 07.11.2023	Виконано

6.	Підготовка презентації та доповіді	01.12.2023- 02.12.2023	Виконано
----	------------------------------------	---------------------------	----------

Дата видачі завдання: «_12_» _червень_ 2023 р.

Керівник дипломної роботи _____ Володимр Петрович Харченко

(підпис керівника) (прізвище, ім'я, по батькові)

Завдання прийняв до виконання _____ Кургановський Андрій Вадимович

(підпис студента) (прізвище, ім'я, по батькові)

Реферат

Пояснювальна записка до дипломної роботи «Підвищення ефективності глобальної системи управління повітряним рухом.» 130 сторінки, 36 рисунків, 17 таблиці, 89 використаних джерел.

Мета дипломної роботи – розробка та перегляд підвищення ефективності глобальної системи управління повітряним рухом, основні принципи (GATM).

Об'єкт дослідження – вплив засобів автоматизації на роботу авіадиспетчерів.

Предмет дослідження – моделювання процесу як засоби автоматизації впливають на роботу авіадиспетчера.

Методи дослідження – теоретичні методи, методи математичного та комп'ютерного моделювання, математичні обчислення.

Актуальність – розроблена автоматизація роботи авіадиспетчера, яка дасть змогу удосконалити технологію роботи авіадиспетчера при виникненні особливих випадків та покращити підготовку під час управління повітряним рухом в аварійних та нестандартних ситуаціях.

Результат дипломної роботи рекомендовано використовувати для автоматизації роботи авіадиспетчерів.

Зміст

Перелік умовних скорочень	11
Вступ	15
Розділ 1. Основні принципи Глобального Управління Повітряним Рухом (GATM).....	17
1.1. Очікувана ефективної організації повітряного руху.....	17
1.1.1. Чому АТМ. Для вирішення проблем перевезення пасажирів і вантажів потрібно розглядати комплексне транспортне рішення.....	17
1.1.2. Рішення для АТМ. Для відповіді на вимоги безпеки, охорони навколишнього середовища, збільшення пропускної здатності, забезпечення гнучкості та підвищення ефективності майбутнього АТМ запропоновано такий підхід:.....	18
1.2.РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО АТМ НА ОСНОВІ ПРОДУКТИВНОСТІ .	18
1.2.1. Доступ та справедливість.....	21
1.2.2. Економічна ефективність	21
1.2.3. Ефективність	21
1.2.4. Потужність	22
1.2.5. Середовище	22
1.2.6. Гнучкість	23
1.2.7.Глобальна оперативна сумісність	23
1.2.8. Участь спільноти АТМ.....	24
1.2.9. Передбачуваність.....	24
1.2.10. Безпека польотів	25
1.2.11. Фізична безпека.....	25
1.3. Взаємодія людини з технологіями АТМ.....	26
1.3.1. Люди разом з технологіями.....	26

1.3.2. Люди та автоматизація	27
1.3.3. Вплив засобів автоматизації на роботу авіадиспетчерів	27
1.3.4. Специфічні для АТМ та комерційні послуги	29
1.3.5. Використання експертизи без АТМ	30
1.3.6. Потреби в АТМ.....	30
1.4. Рівень можливостей АТМ	31
1.4.1. Приклади рівня можливостей АТМ	32
1.4.2. АТМ рівень можливостей 1	33
1.4.3. Системи АТМ-2 матимуть можливості АТМ-1, а також:.....	34
1.4.4. Системи АТМ-3 матимуть можливості АТМ-2, а також:.....	34
1.5. Керівні принципи	35
1.5.1. Безпека	36
1.5.2. Людина	36
1.5.3. Інформація	36
1.5.4. Співробітництво	36
1.5.5. Безперервність.....	37
Висновок до розділу 1	37
Розділ 2. Вплив засобів автоматизації на роботу авіадиспетчерів	38
2.1. Когнітивні особливості діяльності авіадиспетчера	38
2.2. Ступінь автоматизації завдання, що виконує авіадиспетчер.....	40
2.3. Експерименти.....	43
2.3.1. Спрощений інструмент симуляції повітряного контролю	43
2.3.2. Рівні автоматизації.....	46
2.3.3. Рівні руху.....	48
2.3.4. Учасники.....	48

2.3.5. Обладнання.....	49
2.3.6. Дизайн.....	50
2.4. Метрики руху очей.....	51
2.5. Ентропія погляду та умовна ентропія.....	52
2.5.1. Ентропія погляду.....	52
2.5.2. Умовна ентропія.....	53
2.6. 3D-SART and NASA-TLX.....	54
2.6.1. 3D-SART.....	54
2.6.2. NASA-TLX.....	55
2.7. Статистичний аналіз.....	56
2.8. Результати.....	56
2.9. Вплив автоматизації на показники очей.....	57
2.9.1. Поведінка погляду.....	57
2.9.2. Поведінка при русі (сакади).....	61
2.9.3. Вплив трафіку на рух очей.....	62
2.10. Вплив автоматизації на усвідомлення ситуації.....	64
2.11. Вплив автоматизації на робоче навантаження.....	64
2.12. Різниця між студентами і фахівцями з авіаційного управління....	65
Висновок до розділу 2.....	65
Розділ 3. Прогнозування часових інтервалів для операцій повітряного руху	67
3.1. Операційні терміни.....	67
3.2. Формулювання багатоцільової оптимізаційної задачі 4DT.....	69
3.3. Моделювання і Результати.....	72
3.4. Алгоритм глобальної організації повітряного руху.....	74

3.4.1. Метод перебору	76
3.4.2. Перебір на нерівномірній сітці	77
3.4.3. Оцінка константи і стохастична модель	78
3.4.4. Алгоритм максимальної правдоподібності.....	79
3.4.5. Умови збіжності	79
3.4.6. Вплив розмірності	80
3.4.7. Експоненційний ріст складності перебору.....	81
3.4.8. Складність послідовної побудови нерівномірних сіток	81
Висновки до розділу 3.....	83
Розділ 4. Автоматичне узгодження намірів і Система перевірки для 4-D	
Операції на основі траєкторії.....	85
4.1. 4DT	85
4.2. КОНЦЕПЦІЯ ПРОЕКТУ 4-PNV.....	92
4.3. Моделі і алгоритми 4-PNV	97
4.4. Симуляція та результати.....	107
Висновок до розділу 4	111
Розділ 5. Охорона праці.....	113
5.1. Перелік шкідливих та небезпечних виробничих чинників	113
5.2. Розробка заходів з охорони праці	114
5.2.1. Повітря у робочій зоні	114
5.2.2. Вплив шуму на працівника підприємства	114
5.2.3. Пожежна безпека	115
Висновок до розділу 5	117
Загальний Висновок	118
Список літератури.....	119

Аркуш зауважень

Перелік умовних скорочень

ADS-B (Automatic dependent surveillance-broadcast) - Автоматичне залежне спостереження - радіомовне

ADS-C (Automatic dependent surveillance — contract) - Автоматичний залежний нагляд - контракт

A-FMCS (Characteristic 702A-3 for Advanced Flight Management Computer Systems) - Характеристика 702A-3 для високорівневих систем керування польотом

AOC (Airline Operation Centres) - Центри операцій авіакомпаній

AOCs (Airline Operating Centres) - Центри операцій авіакомпаній

ANT (Awakening Noise Thresholds) - Пороговий рівень шуму пробудження

ARINC (Aeronautical Radio Incorporated) - Авіаційна радіоінкорпорейтед

ASM (Airspace Model) - Модель повітряного простору

ATCC (Air Traffic Control Centres) - Центри управління повітряним рухом АТСО

(Air Traffic Control Officer) - Офіцер контролю повітряного руху

ATM (Air Traffic Management) - Управління повітряним рухом

ATFM (Air Traffic Flow Management) - Управління потоком повітряного руху

CNS (Communications, Navigation and Surveillance) - Зв'язок, навігація та нагляд

CNS/ATM (Communication, Navigation, Surveillance and Air Traffic Management) -

Зв'язок, навігація, облік і моніторинг повітряного руху та управління повітряним рухом.

CNS+A (Communication, Navigation, Surveillance and Avionics) - Зв'язок, навігація, облік і моніторинг повітряного руху та авіоніка.

CNS/ATM (Communication, Navigation, Surveillance and Air Traffic Management) - Зв'язок, навігація, облік і моніторинг повітряного руху та управління повітряним рухом.

COA (Certificate of Authorization) - Свідоцтво про авторизацію

COP (Combinational Optimisation Problem) - Комбінаційна оптимізаційна задача

CPDLC (Controller-Pilot Data Link Communications) - Зв'язок між контролером та пілотом через дані

CTA (Controlled Time of Arrival) - Контрольний час прибуття

CTM (Condensation Trails Model) - Модель хмароконденсації

CTO (Controlled Time Over) - Контрольний час над

CTDA (Continuous Descent Arrival) - Постійний спуск прибуття

DSTs (Decision Support Tools) - Інструменти підтримки прийняття рішень EEG (Electroencephalography) - Електроенцефалографія

ERP (Event-Related Potential) - Подійно-залежний потенціал

GATAC (Greener Aircraft Trajectories under ATM Constraints) - Зелені траєкторії літаків при обмеженнях УПП

GATM (Global Air-Traffic Management) - Глобальне управління повітряним рухом

GDAL/OGR (Geospatial Data Abstraction Library) - Бібліотека абстрагування геопросторових даних

GNSS (Global Navigation Satellite Systems) - Глобальні навігаційні супутникові системи

HRV (Heart Rate Variability) - Варіабельність серцевого ритму

IAF (ILS Approach Fix) - Фіксована точка підходу

ILS IBO (Intent-Based Operations) - Операції на основі намірів

IBO/TBO (Intent/Trajectory-Based Operations) - Операції на основі намірів/траєкторій

ILS (Instrument Landing System) - Система інструментального посадкового обладнання

LOA (Levels of Automation) - Рівні автоматизації

NEM (Noise Emission Model) - Модель викидів шуму

NG-ADL (Next Generation Air-to-ground Data Link) - Наступне покоління повітряно-земельних даних

NG-FMS (Next-Generation Flight Management Systems) - Системи управління польотами нового покоління

NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration) - Національна адміністрація безпеки на автодорогах

NSA (Noise Sensitive Area) - Область, чутлива до шуму

OCP (Optimal Control Problem) - Оптимальна задача управління

SA (Situation Awareness) - Усвідомлення ситуації

SART (The Situation Awareness Rating Technique) - Техніка оцінки обстановкової уваги

SAE (Society of Automotive Engineers) - Товариство інженерів автомобільної промисловості

SCL (Skin Conduction Level) - Рівень провідності шкіри

SESAR (Sky Air Traffic Management Research) - Дослідження системи управління повітряним рухом

Sky SGO-ITD (Systems for Green Operations – Integrated Technology Demonstrator) - Системи для зелених операцій - Інтегрований технологічний демонстратор

SWM (System Wide Information Management) - Система управління інформацією на рівні системи

TBD (To Be Defined) - Підлягає визначенню

TMA (Terminal Manoeuvring Area) - Термінальна маневрова зона

TO (Tactical Online) - Тактичний онлайн

WSM (Weather State Model) - Модель стану погоди

Вступ

Для забезпечення більш стійкої авіації надзвичайно важливо підвищувати якість в галузях навколишнього середовища та економіки, постійно розвиваючи як конструкцію, так і експлуатацію літаків, а також супутні завдання, такі як обслуговування та утилізація, за допомогою комплексного підходу. Навіть якщо проектування окремого літака, його компонентів та операційної місії може включати в себе значну кількість наукових і технологічних розробок, велика увага має бути приділена його операціям у реальних умовах повітряного руху. Галузь зв'язку, навігації, спостереження та управління повітряним рухом CNS/ATM - (Communication, Navigation, Surveillance and Air Traffic Management) та авіоніки CNS+A -(Communication, Navigation, Surveillance and Avionics) грають важливу роль у впровадженні нових технологій та концепцій у контексті операцій. Впровадження концепцій 4-вимірної траєкторії 4DT - (4-Dimensional Trajectory) разом із збільшеним використанням автоматизації та обміну повітряними даними на землю в контексті операцій на основі намірів ІВО – (Intent-Based Operations) передбачається принести найбільші переваги [1]. В цьому контексті наукові дослідження рекомендують впровадження нових земельних систем CNS/ATM, які спільно з повітряною авіонікою дозволять впроваджувати ІВО - Intent-Based Operations [2,3]. У відповідності до цього напрямку дослідження, ми рекомендуємо впровадити систему земельного планування, комунікацій та перевірки 4-вимірної траєкторії 4-PNV – (4-Dimensional Trajectory Planning, Negotiation and Validation), яка разом із системами повітряного керування наступного покоління NG-FMS - (Next-Generation Flight Management Systems) дозволить оптимізовано генерувати, комунікувати та перевіряти наміри 4DT в реальному часі [5]. Оптимізація намірів 4DT є однією з найбільш перспективних і швидко розвиваючихся областей у галузі CNS+A. Історично планування польотів виконувалося шляхом вибору оптимального маршруту серед доступних повітряних коридорів; потім обчислювалася оптимальна крейсерська висота, і, нарешті, визначалися

вертикальні профілі для зльоту і сходження. Фактично, не зважаючи на те, що оптимізація польотних траєкторій була широко вивчена, значні можливості залишаються невикористаними через обмежену модельну обробку динаміки системи [6]. Не можна передбачити високодинамічну природу і невизначеності в реальному часі, що призводить до загальної неефективності системи. Таким чином, важливо повністю враховувати та реалізовувати велику динаміку системи у всіх необхідних моделях та програмних інструментах ІВО.

Метою даної дипломної роботи є розробка та перегляд підвищення ефективності глобальної системи управління повітряним рухом, основні принципи (GATM).

Для досягнення мети роботи треба розглянути:

1. Основні принципи Глобального Управління Повітряним Рухом (GATM)
2. Вплив засобів автоматизації на роботу авіадиспетчерів.
3. Прогнозування часових інтервалів для операцій повітряного руху
4. Автоматичне узгодження намірів і Система перевірки для 4-D Операції на основі траєкторії.

Розділ 1. ОСНОВНІ ПРИНЦИПИ ГЛОБОЛЬНОГО УПРАВЛІННЯ ПОВІТРЯНИМ РУХОМ (GATM)

1.1. Очікувана ефективної організації повітряного руху

Глобальне управління повітряним рухом (GATM) - це концепція, що об'єднує супутниковий зв'язок, навігацію, спостереження і керування повітряним рухом. Міжнародна організація цивільної авіації, яка є спеціалізованим агентством Організації Об'єднаних Націй, встановила стандарти для GATM з метою забезпечення безпеки та ефективності авіаперевезень у ситуації все більш забрудненого світового повітряного простору. Усюди в світі прикладаються зусилля для тестування і впровадження нових технологій, що допомагають GATM забезпечувати ефективне управління повітряним рухом.

1.1.1. Чому Air Traffic Management. Для вирішення проблем перевезення пасажирів і вантажів потрібно розглядати комплексне транспортне рішення

Повітряний транспорт не функціонує сам по собі, і особливо в ситуаціях з великою кількістю перевезень на короткі відстані, може бути доречним використання високошвидкісного наземного транспорту.

Високошвидкісний наземний транспорт також може бути задіяним для зв'язку існуючої аеродромної інфраструктури всередині конкретної області, щоб використовувати загальну пропускну здатність усіх аеродромів.

Мультиmodalні рішення особливо важливі, коли існуюча інфраструктура досягає свого максимального обсягу, і розглядається можливість створення нової великої інфраструктури управління повітряним рухом (ATM).

Управління повітряним рухом є динамічним, інтегрованим управлінням повітряним рухом та повітряним простором, здійснюваним безпечно, економічно та ефективно через надання послуг та співпрацю з усіма зацікавленими сторонами.

1.1.2. Рішення для Air Traffic Managment. Для відповіді на вимоги безпеки, охорони навколишнього середовища, збільшення пропускної здатності, забезпечення гнучкості та підвищення ефективності майбутнього Air Traffic Managment запропоновано такий підхід:

- Користувач повітряного простору має можливість планувати бажану 4-D траєкторію.

- Система АТМ буде змінювати цю траєкторію лише в мінімально можливому обсязі.

Міжнародна організація цивільної авіації (ІКАО) опублікувала "Глобальну концепцію експлуатації АТМ" (Док. 9854), яка підтримує це запропоноване рішення, проте враховує ці пропозиції у конкретному контексті [7].

1.2. Рекомендації щодо atm на основі продуктивності

- Майбутня система АТМ має базуватися на підвищенні продуктивності. Оцінка продуктивності буде проводитися для всієї системи АТМ, що є спільною для всіх учасників АТМ-співтовариства.

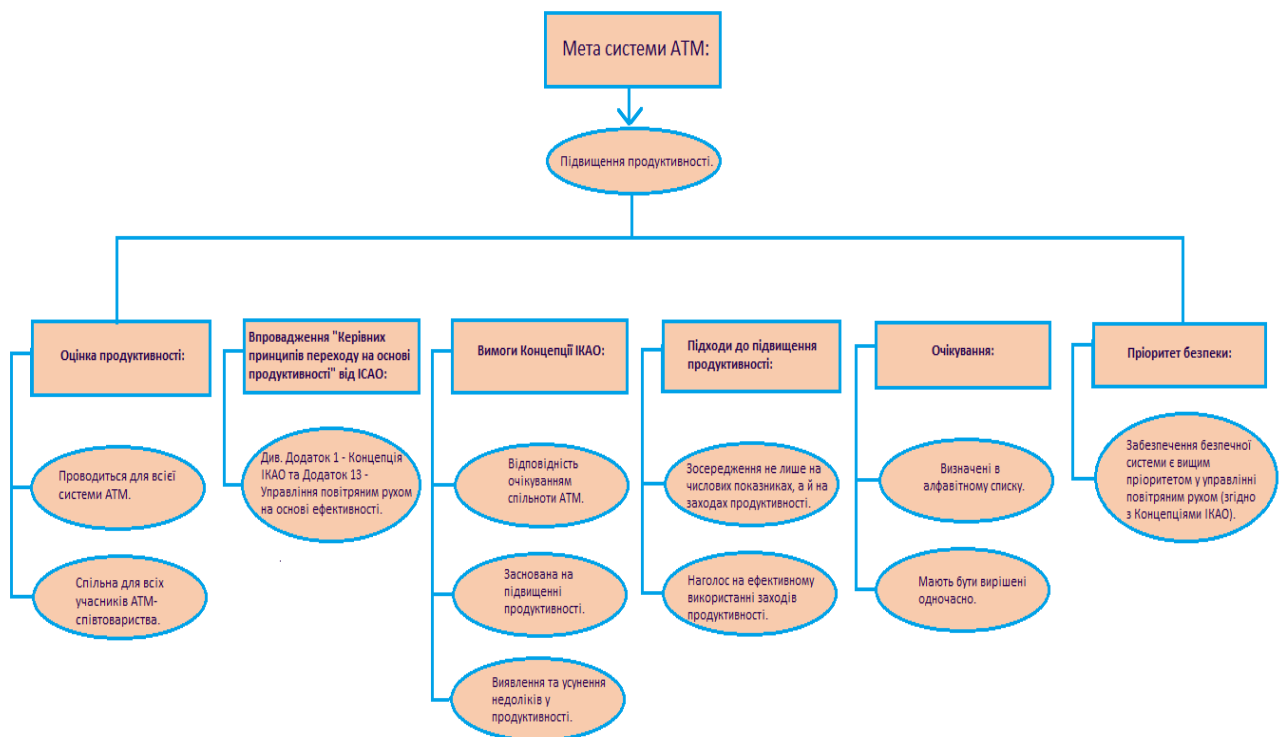
- Міжнародна організація цивільної авіації (ІКАО) розробила "Керівні принципи переходу на основі продуктивності" і видавала "Посібник з продуктивності АТМ". Дивіться Додаток 1 - Концепція ІКАО та Додаток 13 - Управління повітряним рухом на основі ефективності.

- Концепція ІКАО вимагає, щоб майбутня система АТМ відповідала очікуванням спільноти АТМ і базувалася на підвищенні продуктивності. У Керівних принципах переходу на основі продуктивності ІКАО обговорюється виявлення та усунення недоліків у продуктивності.

- Для досягнення цієї мети надзвичайно важливо ефективно використовувати заходи продуктивності, а не спрямовувати увагу лише на числові показники ефективності, як якщо це була б єдиною ціллю.

•Очікування, які визначені у цьому алфавітному списку, мають бути вирішені одночасно. Проте варто відзначити, як це вказано у Концепціях ІКАО, що "забезпечення безпечної системи є вищим пріоритетом у управлінні повітряним рухом".

Рис.1. Структура очікування ефективної організації повітряного руху



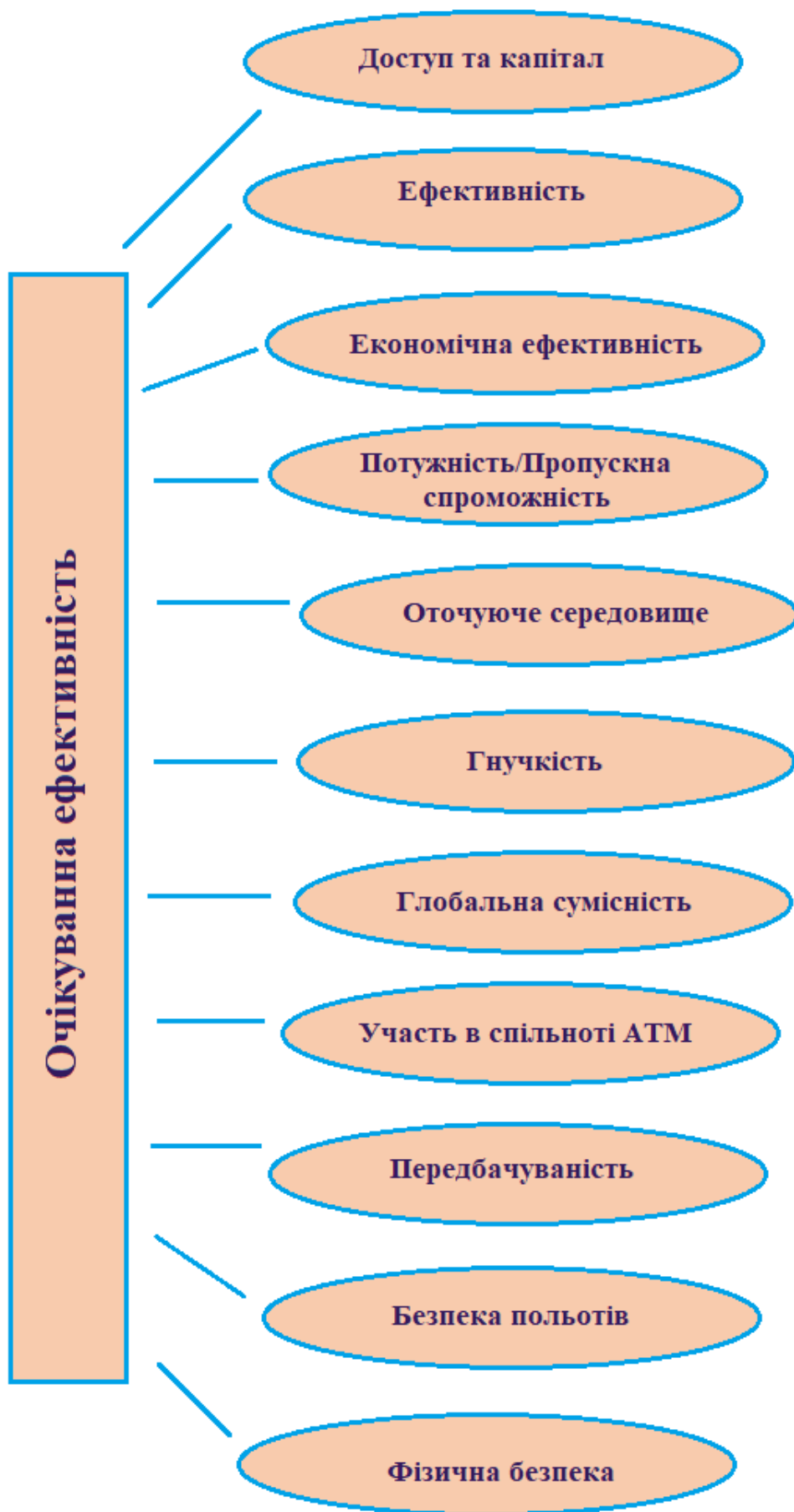


Рис.2. Показники для визначення ефективності АТМ

1.2.1. Доступ та справедливість

Поточний підхід до отримання доступу до контрольованого повітряного простору базується на регуляторів, які вирішують, коли можна впустити повітряне судно, лише в разі, якщо це можна зробити безпечно.

Майбутній підхід у галузі, заснований на обслуговуванні АТМ, полягає в тому, що "ми хочемо допомогти вашому бізнесу і намагатимемося забезпечити вас доступ до повітряного простору, якщо це можливо" (і, звісно, робитимемо це безпечно). Обидва підходи можуть працювати зі схожим рівнем безпеки. Проте перший підхід прагне вимагати від користувача повітряного простору виконання усіх необхідних заходів для безпечного входу, тоді як другий підхід спрямований на те, щоб постачальник послуг робив все можливе, щоб забезпечити якнайлегший доступ користувача до повітряного простору.

1.2.2. Економічна ефективність

Це стосується ефективності всієї системи АТМ. Зміни в АТМ необхідні, і їх фінансування буде потрібним. У кооперативному підході ті, хто отримує фінансову вигоду від змін, повинні понести витрати на ці зміни, тоді як у тих випадках, коли немає фінансового користування, немає необхідності у внесенні плати. Так само можна стверджувати, що якщо зміни накладаються на АТМ державою (без вигоди для АТМ, але задовольняють більший загальний інтерес спільноти), то їх фінансування має бути здійснене державою (хоча це не відбувається дуже часто).

1.2.3. Ефективність

Ця ефективність стосується однієї загальної перспективи щодо ефективності польотів.

Майбутнє АТМ очікується, що буде надавати послуги, враховуючи індивідуальні вимоги польотів, наприклад, за допомогою використання 4-D траєкторій, які користувачі визначають[8].

Однак наразі відсутнім є зворотний зв'язок (або моніторинг постачальником послуг) стосовно того, наскільки успішно проводиться задоволення потреб користувача повітряного простору у конкретному польоті, оперативної коригувальної дії на виявлені негативні тенденції та підтримки позитивних тенденцій.

1.2.4. Потужність

Місткість АТМ вже не буде вимірюватися за "кількістю літаків на секторі," а буде оцінюватися за "кількістю потрібних тактичних втручань," оскільки стратегічне управління конфліктами встановлює послідовні потоки повітряного руху.

Розуміння термінів "сектори" і "центри" зі сторони постачальників послуг повітряного простору буде еволюціонувати і більше не буде суворо обмеженим географічними межами. Це дозволить розподіляти робоче навантаження як всередині постачальників послуг, так і між постачальниками послуг, для досягнення максимальної пропускної здатності.

1.2.5. Середовище

Ця ситуація відноситься до виділення газів, шуму, візуального впливу і інших аспектів, які викидаються в повітря під час авіаційної діяльності. Кожен учасник АТМ-спільноти має власну індивідуальну відповідальність з питань екологічної відповідальності.

Отже, можна стверджувати, що якщо користувач повітряного простору слідує запитаній 4-D траєкторії без внесення змін, то він несе відповідальність за всі екологічні наслідки цього польоту. Однак це дуже спрощена точка зору, оскільки вся діяльність АТМ є колективною діяльністю спільноти, і існує рівень спільних зобов'язань, на які спільно домовилися, щоб забезпечити екологічну стійкість системи АТМ.

1.2.6. Гнучкість

Головним обмеженням на сьогоднішній день є недостатня здатність систем постачальників послуг своєчасно обмінюватися інформацією щодо траєкторій, включаючи навіть базову інформацію про план польоту.

Ця проблема часто виникає між "центрами" постачальників послуг, а також внутрішньо в межах цих центрів.

Тому першим кроком на шляху до майбутнього управління траєкторією ATM 4-D є забезпечення своєчасного обміну земельними даними, особливо між будь-якими суміжними позиціями, незалежно від того, чи знаходяться вони в одному приміщенні, чи ні.

Ще однією серйозною обмеженістю є відсутність спостереження або навіть електронних дисплеїв у багатьох регіонах світу, що значно обмежує можливості постачальників послуг оцінювати, координувати та схвалювати запитувані зміни.

1.2.7. Глобальна оперативна сумісність

Інтероперабельність не обов'язково означає наявність "єдиної технологічної системи", а скоріше вказує на стандартизацію на рівні функціональності.

Стандартизована функціональність дозволяє впроваджувати розвиваючіся технології і може бути більш "економічно ефективною", ніж управління однією технологією (droneuss™ UTA Platform – Low Altitude Airspace Management)

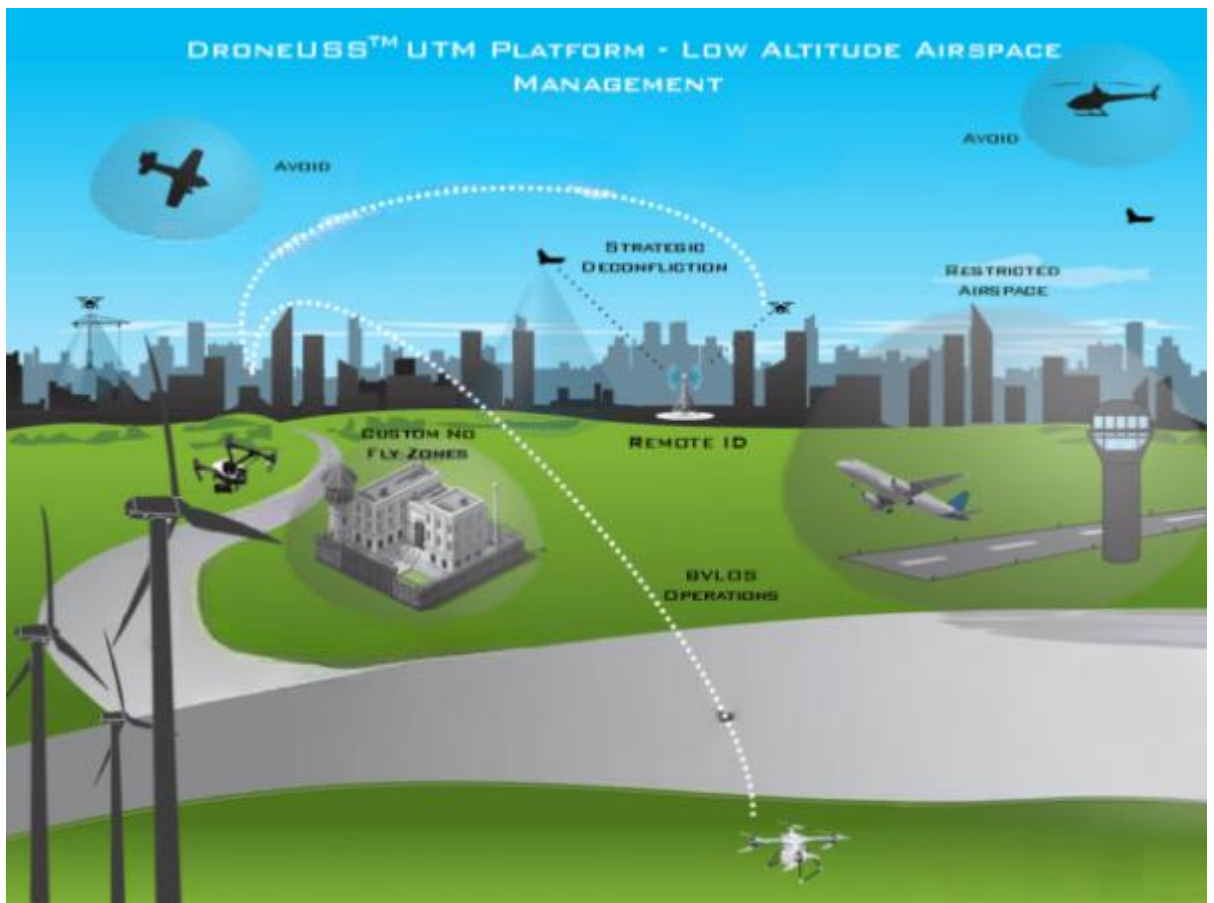


Рис.3. Управління повітряним простором на низьких висотах

1.2.8. Участь спільноти Air Traffic Management

Участь повинна включати активне залучення до всього процесу і враховувати його наслідки.

Хоча певні кроки в напрямку участі вже були зроблені, ще потрібно виконати багато роботи для створення відповідних структур і процедур.

Ці структури повинні бути створені таким чином, щоб вони підтримували і доповнювали структуру ІКАО, оскільки і остання розвивається.

Щодо фінансування заходів, пов'язаних з участю, найкращий спосіб також повинен бути об'єктом спільної угоди.

1.2.9. Передбачуваність

Забезпечення передбачуваності вимагатиме від постачальників послуг, користувачів повітряного простору та інших осіб спільних зусиль для

досягнення узгодженої продуктивності, особливо щодо подій, які можуть бути контрольованими (або пом'якшуваними) цими членами спільноти АТМ. Неконтрольовані події, такі як погодні умови, не повинні просто прийматися як незмінні обставини, але повинні бути готовими до спільно узгоджених планів пом'якшення наслідків, "варіантів гри" та інших заходів.

Щоб максимально пом'якшити наслідки неконтрольованих подій для передбачуваності, всі відповідні члени спільноти АТМ повинні спільно діяти.

1.2.10. Безпека польотів

Управління безпекою тепер ефективно стало управлінням ризиками, і поняття "запасу міцності," що є буфером безпеки вище розрахованого ризику, здається було забутим [9].

В системах, де не всі події можуть бути під контролем, таких як банкомати, повинні існувати резерви міцності (запасні можливості вище вимоги), і зміни в рівні маржі повинні відстежуватися.

Ще однією важливою проблемою безпеки є "автономний відпочинок льотної здатності" для літаків. Наприклад, якщо виникають серйозні проблеми зі зовнішніми джерелами інформації (такими як точний час та навігаційна інформація), повітряним суднам потрібно мати можливість продовжити польот за допомогою автономних систем, які забезпечують відповідну точність (наприклад, внутрішня система часу та резервна базова інерційна система відліку). Так само, системи управління повітряним рухом (АТМ) повинні оптимізувати процедури, щоб забезпечити безпечне продовження польоту за 4-д траєкторією, навіть якщо втрачено зв'язок з усіма зовнішніми джерелами.

1.2.11. Фізична безпека

Зв'язок з АТМ, включаючи голосовий і даних, не є шифрованим і не піддається перевірці джерела (наприклад, за допомогою електронного сертифіката) ніяким способом. Це створює певний ризик зловживання,

включаючи можливість передачі недостовірної інформації через ADS-B або використання правильної інформації ADS-B для слідкування за певним літаком.

1.3. Взаємодія людини з технологіями Air Traffic Management

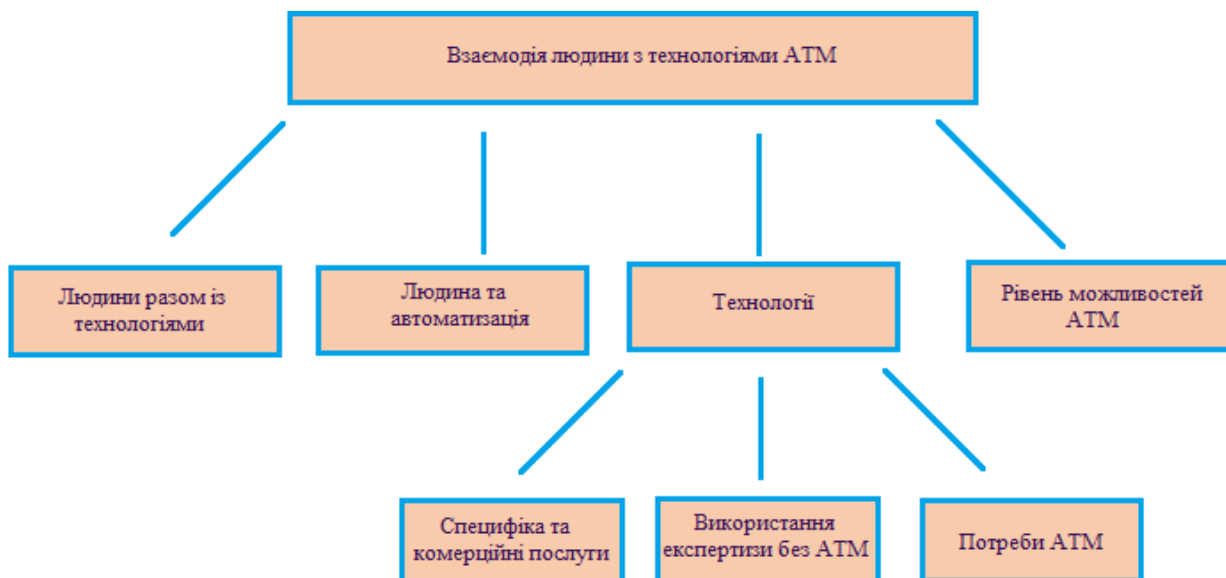


Рис.4. Структура взаємодії людини і техніки

1.3.1. Люди разом з технологіями

Система АТМ включає в себе як людей, так і технології, які функціонують за допомогою відповідних процедур обміну інформацією.

Зрозуміло, що технології є необхідною складовою, оскільки без них не може існувати система АТМ, необхідна для керування повітряним рухом.

Однак роль людей на оперативних рівнях розглядається. Роль "бортінженера" більше не є стандартною частиною екіпажу літака.

Зі зростанням як кількості, так і складності безпілотних літальних апаратів (БПЛА), може виникнути питання: чи потрібні ще авіадиспетчери? Люди будуть необхідні в операційних сферах, включаючи авіадиспетчерів, ще протягом багатьох років. Однак з розвитком технологій роль людини буде переосмисленою.

З розвитком і впровадженням технологій деякі види діяльності, які раніше виконувалися людьми, можуть бути замінені автоматизованими системами. У

передових системах льотної палуби багато в чому вже досліджено, як безпілотні літальні апарати можуть виконувати деякі завдання, які раніше виконували пілоти.

1.3.2. Люди та автоматизація

Для досягнення росту показників безпеки та продуктивності в системі АТМ потрібно збільшення рівня автоматизації. Однак важливо залишити людину у ролі керівника автоматизації, а не стати службовцем, який слідкує за автоматизованими процесами. Загалом це означає, що людина визначатиме, які завдання будуть виконуватися автоматизацією, делегує їх виконання автоматичним системам і може втрутитися, якщо це необхідно.

Системи підтримки автоматизації людських ролей у системі АТМ мають бути розроблені та реалізовані так, щоб сприяти довірі та впевненості людини у функціях автоматизації. Досвід, який був набутий під час успішного впровадження автоматизації в пілотажних кабінах літаків, буде використаний при проектуванні автоматизації в інших галузях АТМ, зокрема у сфері авіадиспетчерського обслуговування.

У літаках вже існують високонадійні системи, такі як автоматизовані польоти та повністю автоматична посадка, і схожий рівень надійності важливий при розробці наземної автоматизації, особливо коли функція автоматизації (або її відмова) може вплинути на декілька літаків одночасно.

1.3.3. Вплив засобів автоматизації на роботу авіадиспетчерів

Завдання та ролі людини в системі АТМ будуть еволюціонувати зі зростанням рівня автоматизації. Щодо авіадиспетчерів, це включатиме такі зміни:

- Зменшення або вилучення рутинних обов'язків, таких як зміна частоти.
- Делегування конкретних завдань або обов'язків іншим агентам, які можуть бути як людьми, так і автоматизованими системами.

- Адаптація стилю роботи для підтримки більш стратегічного управління потоками транспорту.

- Зміни в розкладі роботи, які можуть бути потрібні для виконання нових завдань та функцій.

Ці зміни впливають на характер ролей авіадиспетчерів і вимагають адаптації до зростаючого рівня автоматизації в АТМ.

Системна помилка - це не лише "людська помилка", але також дефіцит людського фактору та/або автоматизації, і ця помилка буде відстежена і з неї будуть винесені висновки.

Людина не несе відповідальності за автоматизацію, яка не вписана в структуру системи АТМ (або в здатність людини контролювати та керувати нею).

Людина, яка працює з автоматизацією, не відповідає за поведінку автоматизації, яка виходить за межі можливостей оператора впливати на неї.

Людина не несе відповідальності за інформацію, що надається автоматизацією і не може бути перевіреною людиною.

Людина не буде вважатися винною лише через недбалість, якщо вона не може належним чином використовувати автоматизацію (при цьому враховується також якість інтерфейсу між автоматизацією та людиною).

Коли людині доводиться змінювати свою методику роботи як спосіб обходу для виконання завдання, яке мало би бути автоматизовано, але автоматизація не виконує цю роботу, це розглядається як системна помилка, яку слід виправити негайно.

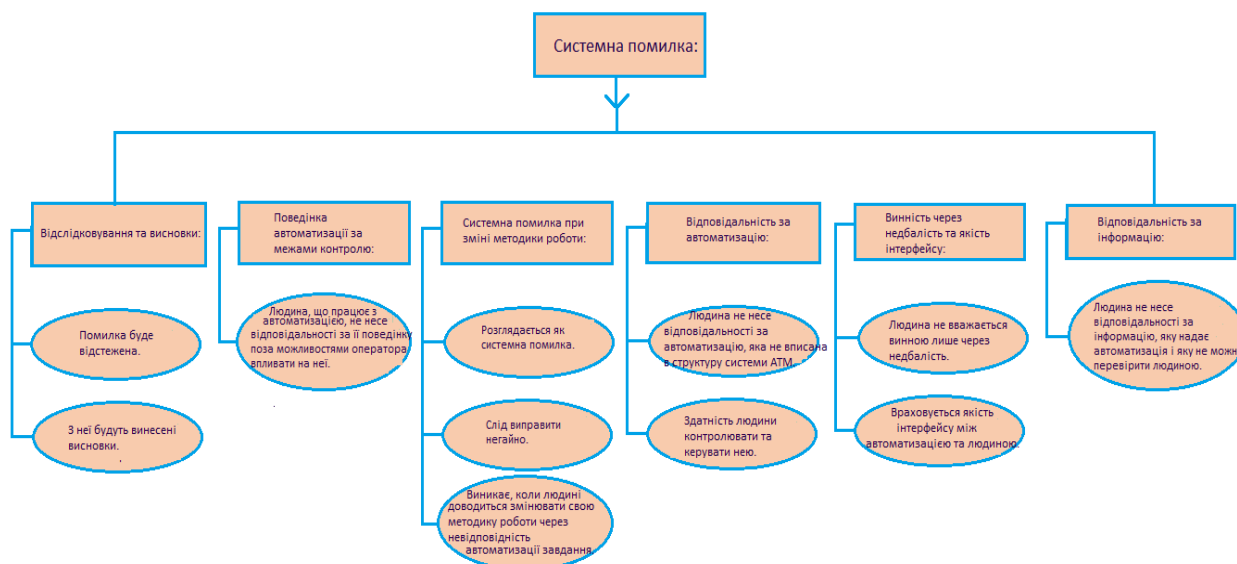


Рис.5. Системні помилки організації повітряного руху

1.3.4. Специфічні для Air Traffic Management та комерційні послуги

Ми переживаємо еру технологій, коли багато галузей господарства опираються на технології. Щоб досягти економічно вигідних покращень в АТМ, необхідно максимально використовувати відповідні технології, які розробляються для загального використання (тобто не спеціально для АТМ).

Наприклад, радарні екрани та графічні процесори, які раніше були спеціально розроблені для радіолокаційних потреб і доступні лише в постачальниках АТМ, тепер можуть бути замінені продуктами індустрії інформаційних технологій (ІТ), які значно перевершують їхню функціональність, і є більш доступними.

Подальші дослідження і розробки, які фінансово не підтримуються АТМ, спрямовані на підвищення продуктивності та зниження вартості цих екранів та графічних процесорів.

1.3.5. Використання експертизи без Air Traffic Management

У специфікаціях систем АТМ може здаватися, що експертиза з інших галузей, окрім АТМ, ігнорується. Наприклад, при обговоренні майбутніх систем АТМ часто розглядаються питання обміну інформацією (зокрема, System Wide Information Management (SWIM)) і загальних атрибутів даних (наприклад, гарантована якість тощо).

Оскільки потреба в обміні інформацією не є унікальною для АТМ, бажано використовувати досвід інших галузей АТМ. Ця ситуація також має місце в інших областях, таких як розробка програмного забезпечення

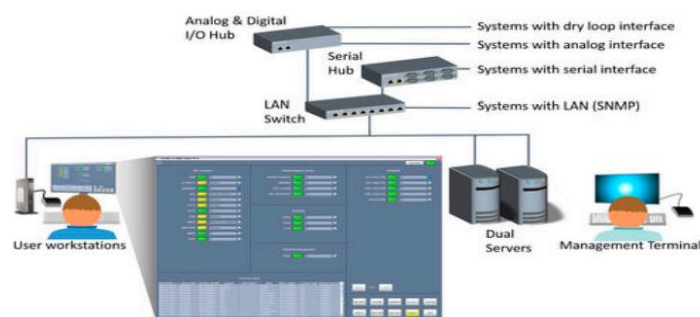


Рис.6. Програмне забезпечення для керування (технічний контроль та моніторинг)

1.3.6. Потреби в Air Traffic Management

Система АТМ має наступні компоненти:

- Елементи, які функціонують постійно, наприклад, обладнання постачальника послуг.
- Дані, які потребують регулярного оновлення, як запланованих, так і виправних.
- Програмне забезпечення, яке потребує модернізації, будь то запланованої чи виправної.

- Режими збою, які забезпечують основну функціональність і залишаються активними.

В даний момент в системі АТМ є обладнання постачальника послуг, яке, якщо воно потребує модернізації (як програмної, так і даних), функціонує в "деградованому режимі". Наприклад, це може означати, що деякі короткочасні конфліктні тривоги можуть бути вимкнені. Проте важливо вирішити питання так, щоб оновлення програм і даних розглядалися як стандартна практика, і системи постачальників послуг мали таку конструкцію, яка б не призводила до "деградованих режимів" (з обмеженою функціональністю) під час нормальної роботи, включаючи оновлення програм.

Звичайно, існують питання, які потребують вирішення, якщо операції виконуються в момент запланованого оновлення, проте ці проблеми можуть бути вирішені. Між будь-якими двома блоками системи АТМ має бути встановлена захищена система передачі даних.

1.4. Рівень можливостей Air Traffic Management

Потрібно визначити рівні можливостей для майбутньої системи АТМ, які охоплюють можливості як користувачів повітряного простору, так і постачальників послуг. Треба уникнути традиційного розділення між повітряними та наземними компонентами, і визначення рівнів можливостей вказує на рівень функціональності, який досягнуто в системі АТМ.

Рівень можливостей АТМ вказує на те, що всі компоненти системи є функціональними, що включає підготовку та оцінку людей, впровадження технологій, встановлення процедур та інше.

Кожен рівень АТМ повинен бути узгоджений, бажано на глобальному рівні.

Поняття "управління по траєкторії" є фундаментальним для майбутнього АТМ. Перший рівень можливостей АТМ повинен визначати наявні системи з елементами управління по траєкторії.

Кожен вищий рівень вказує на більш високий рівень управління по можливостях траєкторії та іншими функціональними можливостями АТМ за узгодженням.

Рівень АТМ 0 може бути застосований до існуючих систем постачальників послуг та повітряних суден, які не відповідають мінімальним вимогам управління по можливостях траєкторії, оскільки їх слід буде адаптувати спочатку.

1.4.1. Приклади рівня можливостей Air Traffic Management

Система АТМ повинна бути сумісною з літаками різних типів і можливостей, і тому необхідно мати засіб для відображення можливостей.

Крім того, вся система АТМ повинна бути працездатною для постачальників послуг та користувачів повітряного простору. Тому вся система АТМ повинна мати можливість вказати свої можливості під час її розвитку.

Ці приклади базуються на роботі, спочатку проведеної для можливостей літаків у SESAR, але їх розширено в приклад можливостей АТМ. Вони демонструють підхід, який спрямований на опис функціональних можливостей, а не конкретних технологій, і визначає прогресивний розвиток АТМ



Рис.7. Дослідження управління дронами в Рено та Корпус-Крісті

1.4.2. Air Traffic Management рівень можливостей 1

Для спільного прийняття рішень здійснюється обмін основною інформацією за допомогою наступних методів:

Високоточний та високочастотний автоматизований обмін інформацією про розташування повітряних суден.

Наприклад, літаки зі схожим системами ADS-B out можуть автоматично обмінюватися даними про своє розташування з постачальниками послуг та іншими користувачами повітряного простору.

Базова автоматизована звітність про події.

Наприклад, повітряні судна зі схожими системами ADS-C можуть автоматично надсилати звіти про події згідно із стандартами To Be Defined (TBD). Це також може стосуватися авіакомпаній, які повідомляють про зміни статусу або плани польотів, а також постачальників послуг, які мають відношення до ресурсів АТМ, таких як повітряний простір, погодні умови, пропускна здатність і т. д.

Базовий обмін даними між користувачем повітряного простору та постачальником послуг повітряного простору.

Наприклад, CPDLC відповідає стандартам TBD і дозволяє користувачам повітряного простору обмінюватися даними з постачальниками послуг.

Для підтримки управління траєкторією, включаючи управління чергою та розділення, використовуються наступні методи:

Функція Controlled Time Over (СТО) - єдине обмеження, яке застосовується до як повітряних, так і наземних систем.

Вертикальне та горизонтальне обмеження руху до призначених точок.

Використання 2D-RNP, яке відповідає встановленим операційним стандартам.

1.4.3. Системи Air Traffic Managment -2 матимуть можливості Air Traffic Managment -1, а також:

Для підтримки спільного прийняття рішень:

1. Розподіл траєкторій між повітрям та землею, а також між різними земельними пунктами, здійснюється за допомогою функцій, спеціально призначених для використання в системі АТМ.
2. Збільшення можливостей обміну даними між користувачами повітряного простору та постачальниками послуг, наприклад, для підтримки ADS-B in та CPDLC відповідно до стандартів TBD, а також для передачі інформації між авіакомпаніями та постачальниками послуг.

Для підтримки управління траєкторією (включаючи управління чергою та розділення):

1. Функції СТО включають в себе різноманітні обмеження.
2. Функції, які пов'язані з інтервалами, послідовністю та об'єднанням.
3. Вимоги щодо вертикальних навігаційних характеристик, з урахуванням необхідної точності.
4. Управління вертикальними обмеженнями з точністю до встановленого стандарту.
5. Управління горизонтальними обмеженнями з точністю до визначеної точності.

1.4.4. Системи Air Traffic Managment-3 матимуть можливості Air Traffic Managment -2, а також:

Для підтримки спільного прийняття рішень:

1. Обмін метеорологічними даними.
2. Обмін траєкторіями:повітря/повітря

Для підтримки управління ешелонуванням:

1. Вимоги до поздовжніх навігаційних характеристик (відповідні експлуатації).
2. Функції кооперативного поділу
3. Функції самостійного ешелонування.

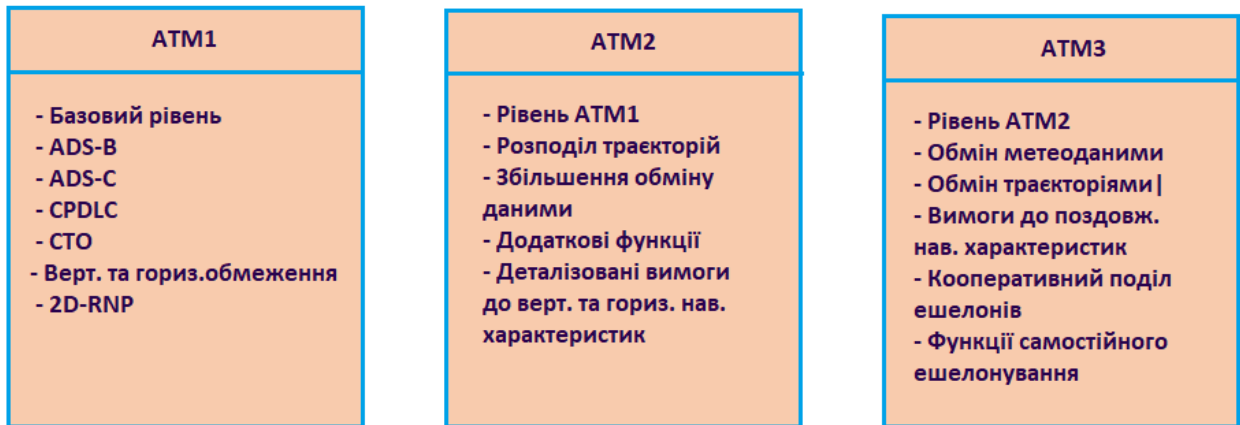


Рис.8. Три рівні АТМ

1.5. Керівні принципи



Рис.9. Керівні принципи

1.5.1. Безпека

Безпека має найвищий пріоритет у системі АТМ, і для досягнення цієї мети впроваджується комплексний процес управління безпекою. Цей підхід допомагає спільноті АТМ досягати ефективних і результативних рішень.

1.5.2. Людина

Люди відіграють ключову роль у глобальній системі АТМ, вони відповідають за керування системою, моніторинг її ефективності та втручання, коли це необхідно, для досягнення бажаного результату. Увага до людського фактору має бути забезпечена у всіх аспектах системи. Концепція АТМ розглядає функції, необхідні для банкомату, без прив'язки до конкретних технологій і відкрита для нових розробок. Вона поєднує системи спостереження, навігації, зв'язку і передові технології управління інформацією для створення повністю інтегрованої, сумісної та надійної системи АТМ, яка може працювати гнучко у різних областях та забезпечувати вимоги концепції.

1.5.3. Інформація

Спільнота АТМ буде значною мірою залежати від надання інформації вчасно, актуально, точно і гарантованої якості для співпраці та прийняття обґрунтованих рішень. Обмін інформацією на загальносистемній основі дозволить спільноті АТМ безпечно та ефективно здійснювати свої бізнес-операції.

1.5.4. Співробітництво

Система АТМ характеризується стратегічним і тактичним співробітництвом, де відповідні члени спільноти АТМ беруть участь у визначенні видів і рівнів обслуговування. Також важливо, що спільнота АТМ співпрацює для максимізації ефективності системи шляхом обміну інформацією і прийняттям гнучких рішень.

1.5.5. Безперервність

Реалізація концепції вимагає вжиття надзвичайних заходів для забезпечення максимальної безперервності обслуговування у випадку великих відключень, стихійних лих, громадянських заворушень, загроз безпеці чи інших надзвичайних обставин.

Висновок до розділу 1

Найкращий спосіб вирішити проблеми, які виникають АТМ, - це співпраця всіх членів спільноти АТМ.

Необхідна співпраця – це серйозна спільна робота, яка вимагає прагматизму та компромісу з боку всіх причетних.

Це передбачає спільне прийняття рішень, що вимагає залучення до процесу та наслідків.

Це вимагає відданості змінам і бажання діяти на всіх рівнях, у тому числі на державному рівні.

ІФАТСА (МІЖНАРОДНА ФЕДЕРАЦІЯ АСОЦІАЦІЙ АВІАДИСПЕТЧЕРІВ) підкреслює, що такий підхід співпраці та зобов'язання діяти важливіше, ніж остаточна технологія чи процедури, які будуть впроваджені.

Розділ 2. ВПЛИВ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ НА РОБОТУ АВІАДИСПЕТЧЕРІВ

2.1. Когнітивні особливості діяльності авіадиспетчера

Багато зусиль було витрачено когнітивними психологами та нейрофізіологами на розуміння рухів очей авіадиспетчерів. Ці дослідження припускають або явно стверджують, що рухи очей, як спрямована на отримання інформації поведінка, тісно пов'язані з навантаженням, виявленням конфліктів та продуктивністю. Дані про рухи очей були записані та проаналізовані для визначення їх зв'язку з навантаженням. Наприклад, Алстрьом та ін. вивчали кореляцію між рухами очей та навантаженням авіадиспетчерів. Вони досліджували взаємозв'язок між сакадами авіадиспетчерів, частотою покладання очей, діаметром зіниці та потоком повітряного руху [9]. Результати показали, що використання DSTs у роботі нагляду може зменшити навантаження на авіадиспетчерів. Токуда вивчав відношення між сакадним вторгненням та навантаженням [11]. Виявлено, що сакадичне вторгнення було тісно пов'язане з навантаженням. Коефіцієнт кореляції між навантаженням та сакадичним вторгненням сягнув 0,84. В іншому дослідженні Стасі створив три завдання з різними рівнями складності в спрощеному експерименті з симуляцією управління, щоб вивчити взаємозв'язок між навантаженням та сакадою [12]. Результати показали, що зі збільшенням навантаження збільшувався час реакції та зменшувалася максимальна швидкість сакади. Мюллер та ін. виявили, що значення рухливості зіниці поступово збільшувалося зі збільшенням навантаження. Однак значення рухливості зіниці не може служити показником навантаження, коли навантаження досягає певного порогу [13]. Імантс та ін. вивчали взаємозв'язок показників рухів очей та продуктивності завдань [14]. Вони виявили, що шлях сакади, час сакади та тривалість погляду різних авіадиспетчерів були значно різними при виконанні завдань нагляду, планування та управління.

Є кілька досліджень щодо дослідження рухів очей авіадиспетчерів у завданнях виявлення конфліктів [15,16]. Канг та ін. досліджували стратегії

візуального пошуку та стратегії виявлення конфліктів, використовувані експертами з авіадиспетчерського обслуговування [15]. На основі зібраних даних стратегії сакади були класифіковані у п'ять категорій, а стратегії управління повітряним рухом були класифіковані у чотири групи. Марчитто та ін. вивчали вплив складності сцени на навантаження авіадиспетчера в завданнях виявлення конфліктів [17]. Результати показали, що авіадиспетчери схильні використовувати більше поглядів та сакад в сценах конфлікту, ніж в сценах без конфліктів.

У іншому напрямку досліджень приділялося зусилля з розуміння взаємозв'язку рухів очей та людської продуктивності. Наприклад, Мертенс та ін. зібрали дані про рухи очей авіадиспетчерів, включаючи погляд, сакаду та пальпці, щоб вивчити, наскільки ефективно сигнали на дисплеї можуть зменшити людські помилки. Виявилося, що увага авіадиспетчерів була головним чином сконцентрована на областях із інтенсивним повітряним рухом, особливо на літаках, що щойно увійшли в сектор. Для покращення продуктивності авіадиспетчера вони запропонували відзначати останні літаки, які входять в сектор, кольором, спалахами або іншими сигналами, щоб привернути увагу авіадиспетчерів. Меевен та ін. вивчали стратегію візуального пошуку та продуктивність завдань авіадиспетчерів трьох рівнів кваліфікації: початківців, середнього та експертного [19]. Результати продуктивності показали, що експерти використовували більш ефективні шляхи сканування та менше розумових зусиль для отримання важливої інформації. Ванг та ін. вивчали вплив досвіду роботи на рухи очей авіадиспетчерів. Результати показали, що досвід роботи мав помітний вплив на патерни рухів очей. Було виявлено різницю як у фіксаціях, так і в сакадах між кваліфікованими авіадиспетчерами та початківцями [20].

Обширні дискусії про рухи очей в галузі управління повітряним рухом показали, що візуальна поведінка авіадиспетчерів тісно пов'язана з їх розумовим навантаженням, стратегіями виявлення конфліктів та продуктивністю завдань.

Можна знайти помітні відмінності в показниках рухів очей серед авіадиспетчерів на різних рівнях кваліфікації або з різним стажем роботи. Однак в літературі мало праць, які б зосереджувалися на рівнях автоматизації у рухах очей авіадиспетчерів.

2.2. Ступінь автоматизації завдання, що виконує авіадиспетчер

Рівні автоматизації (LOA) взагалі вказують на ступінь автоматизації завдання. Визначення LOA визначає ролі та відповідальність людини та машини в складній системі. Шерідан та інші [21] запропонували стандарти для класифікації рівнів системної автоматизації. Вони розділили системну автоматизацію на десять рівнів від 1 до 10 і відповідно описали основні функції автоматизації на кожному рівні. Вищий рівень вказує на більшу автоматизацію з меншою ручною інтервенцією. Фітс та інші запропонували концепцію фази автоматизації. Вони розділили фази автоматизації на чотири підфази: фільтрація інформації, інтеграція інформації, прийняття рішень і реалізація [22]. Парасураман та інші розробили модель для вибору відповідних типів і LOA для системи [23]. Запропоновано чотири типи функцій у системі, а саме збір інформації, аналіз інформації, прийняття рішень і вибір дій, а також виконання дій. Автоматизацію можна застосовувати в межах кожного типу, від низького до високого рівня. Запропоновано, що вибір або проектування рівня автоматизації може ґрунтуватися головним чином на наслідках продуктивності людини, надійності автоматизації та витратах на наслідки рішень/дій.

У галузі автономного водіння Управління національної безпеки на автотранспорті (NHTSA) пропонує набір стандартів класифікації для автономних автомобілів з чотирма рівнями автоматизації в 2013 році. Пізніше Товариство інженерів автомобільної промисловості (SAE) запропонувало набір стандартів класифікації для автономних автомобілів на основі стандартів NHTSA. SAE поділяє автономне водіння на п'ять рівнів: підтримка водія, часткова автоматизація, умовна автоматизація, висока ступінь автоматизації та повна автоматизація [24].



Рис.10. Ситуаційна усвідомленість

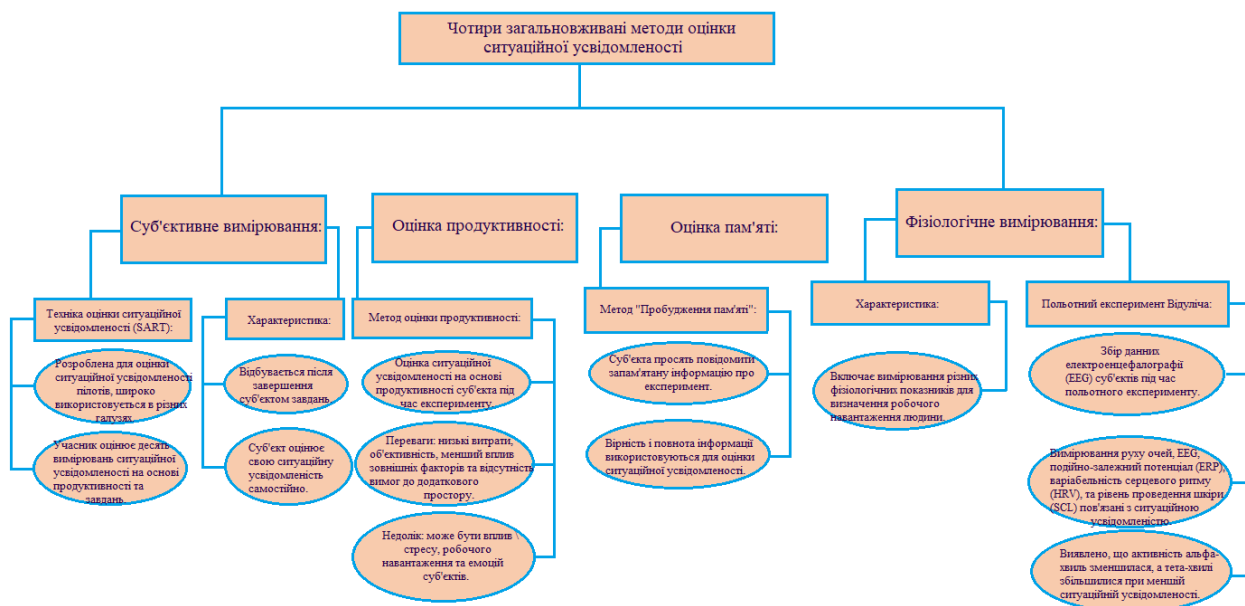
Ситуаційна усвідомленість (SA) визнається як критична основа для прийняття людиною правильних рішень в складному і динамічному середовищі. Згідно з визначенням Ендслі [25], ситуаційна усвідомленість визначається як "сприйняття елементів у середовищі в межах певного часу і простору, розуміння їх значення і передбачення їх стану у найближчому майбутньому". Віккенс та ін. [26] описують ситуаційну усвідомленість так: оператор отримує відповідну інформацію про ситуацію від системи та навколишнього середовища, оцінює загальну ситуацію на основі свого розуміння та знань, і потім коригує методи отримання інформації та передбачає майбутню ситуацію. Також ситуаційна усвідомленість розглядається як когнітивний процес, під час якого оператори спостерігають, розуміють, передбачають та контролюють стан та майбутні тенденції систем і середовищ [27]. Ситуаційна усвідомленість також розглядається як комплексний аналіз та розуміння різноманітної інформації в завданні, а також когнітивний процес передбачення її розвитку [28]. Тут ми визначаємо ситуаційну усвідомленість як повний процес, під час якого оператор спостерігає і отримує відповідну інформацію від системи та середовища, інтегруючи цей процес в повний образ, а потім розробляє план отримання майбутньої інформації з метою передбачення стану системи.

Декілька передових досліджень ситуаційної усвідомленості в управлінні повітряним рухом можна знайти в [29,30]. Звіти підказують, що авіадиспетчери покладалися на ситуаційну усвідомленість для виявлення та вирішення конфліктів. Тим часом рівні ситуаційної усвідомленості були позитивно

пов'язані з продуктивністю авіадиспетчерів. Авіадиспетчери схильні до більшої кількості помилок, коли у них менша ситуаційна усвідомленість [30].

Існують чотири загальноживані методи оцінки ситуаційної усвідомленості(рис.): суб'єктивне вимірювання, фізіологічне вимірювання, оцінка продуктивності та пам'яті [30].

Рис.11. Методи оцінки ситуаційної усвідомленості



Суб'єктивне вимірювання відбувається після завершення суб'єктом завдань. Суб'єкт оцінює свою ситуаційну усвідомленість самостійно. Техніка оцінки ситуаційної усвідомленості (SART), спочатку розроблена для оцінки ситуаційної усвідомленості пілотів, широко використовується в різних галузях. Учаснику необхідно оцінити кожне з десяти вимірювань ситуаційної усвідомленості на основі продуктивності та завдання. Це простий післязавдання суб'єктивний метод оцінки. Фізіологічні показники широко запропоновані для вимірювання робочого навантаження людини. Рідко вони використовуються для оцінки ситуаційної усвідомленості. Відуліч [32] провів польотний експеримент і зібрав дані електроенцефалографії (EEG) суб'єктів. Вони виявили, що активність альфа-хвиль зменшилася, а тета-хвилі збільшилися, коли суб'єкт переживав меншу ситуаційну усвідомленість. Декілька досліджень показали, що ситуаційна усвідомленість може бути виражена через EEG, подійно-залежний потенціал

(ERP), варіабельність серцевого ритму (HRV) та рівень проведення шкіри (SCL) [33,34]. Недавній огляд фізіологічних вимірювань ситуаційної усвідомленості висвітлює загальні результати досліджень, які вивчали взаємозв'язки між фізіологічними вимірюваннями та ситуаційною усвідомленістю [35]. Виявлено, що вимірювання руху очей та ЕЕГ часто пов'язані зі ситуаційною усвідомленістю. Інші вимірювання, наприклад кардіоваскулярні показники, дають змішані результати.

Метод оцінки продуктивності полягає в оцінці ситуаційної усвідомленості на основі продуктивності суб'єкта під час експерименту. Перевагами цього методу є низькі витрати, об'єктивність, менший вплив зовнішніх факторів та відсутність вимог до додаткового простору, але недоліком може бути вплив стресу, робочого навантаження та емоцій суб'єктів [34]. У методі "пробудження пам'яті" суб'єкта просять повідомити запам'ятану інформацію про експеримент, а також її вірність і повноту, яка використовується для оцінки ситуаційної усвідомленості.

2.3. Експерименти

2.3.1. Спрощений інструмент симуляції повітряного контролю

Було розроблено спрощену платформу симуляції повітряного контролю з використанням мови програмування Python. На цій платформі можуть бути симульовані три рівні автоматизації: ручне управління, автоматизоване управління увагою та повністю автоматизоване управління. На рисунку 13 показана структура інтерфейсу. Весь простір поділений на три частини. Ліва частина - це основна область, яка показує структуру повітряного простору та повітряний рух. Інформація про кожен літак відображається в радіочергах, включаючи викликний знак, швидкість, цільову висоту польоту та поточну висоту польоту. Точки 1-8 - це місця, де літак з'являється та входить в повітряний простір. У верхньому правому куті відображається час та бали. Учасник може бачити, як довго триває симуляція. Залежно від мети симуляції, учасника може

бути автоматично оцінено в режимі реального часу. Наприклад, бали можуть бути присвоєні в залежності від того, скільки літаків вилетіло або приземлилося. Функція підрахунку балів не використовувалася в цьому дослідженні. Нижня права частина - це функціональна область, яка показує список літаків зі швидкістю та курсом. Під час симуляції курс та швидкість літака можна відрегулювати як у зоні відображення повітряного простору, так і в функціональній області.



Рис.12. Розміщення інтерфейсу симуляційного програмного забезпечення. Літаки генеруються та відображаються в лівій області, з конкретною інформацією кожного літака, переліченою в нижній правій області. Верхня права область призначена для відображення часу та рахунку.

Функціональна область була розроблена для інших цілей, які не досліджувалися в цьому дослідженні. Наприклад, вона служила як список "стрічок", якими користувалися авіадиспетчери під час процедурного контролю. Ми можемо симулювати ситуацію, коли радіосистема вийшла з ладу. В області відображення повітряного простору не відображається жодного літака. Проте інформація про літаки все ще доступна в функціональній області.

Експерименти були налаштовані для визначення основних навичок, необхідних для кваліфікованого авіадиспетчера. Схоже на справжній авіадиспетчерський контроль, учасники повинні були відстежувати рух і приймати оперативні рішення для уникнення конфліктів (див. рис. 14). Якщо горизонтальна відстань між двома літаками менше 10 км, а вертикальна відстань менше 300 м, то виникає конфлікт. Можна змінити курс або швидкість літака, щоб уникнути можливого конфлікту. Крім того, було розроблено зелений коло, яке позначалося як зона небезпеки, для підвищення складності завдання. Якщо літак потрапляє в цю зону, виникає конфлікт.

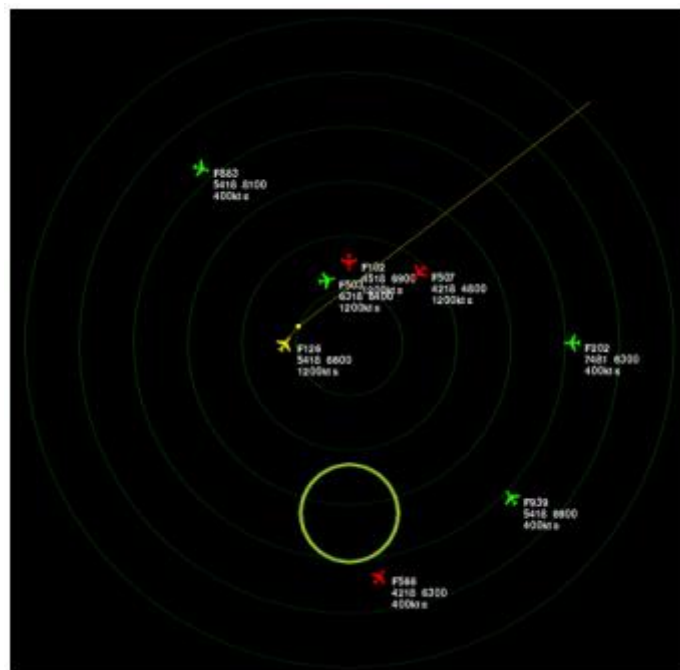


Рис.13.
відображення

Область
повітряного

простору. Літаки генеруються випадковим чином у зеленому кольорі. Коли на літак клікнути, він стає жовтим, і відображається його передбачувана траєкторія. Літак стає червоним, якщо він участь у конфлікті. Область, охоплена зеленим колом, - це зона небезпеки, в яку заборонено входити літакам.

2.3.2. Рівні автоматизації

У цій роботі ми встановили три рівні автоматизації: ручний, автоматичний і автоматизований. Знімок інтерфейсу показаний на Рис. 15. Різниця між трьома режимами представлена в Таблиці 1. В ручному режимі не надавалася інформація для підтримки прийняття рішень. Ручний режим відповідає дням управління повітряним рухом, коли екран радара надавав лише інформацію про рух. В режимі "з увагою" відбувалася автоматична виявлення конфліктів. Якщо виявлявся потенційний конфлікт, відповідний літак ставав червоним. Комп'ютер видавав постійний сигнал для сповіщення учасника. Конфлікт мусив бути вирішено вручну шляхом зміни курсу або швидкості літака. Більшість систем управління повітряним рухом мають функцію виявлення конфліктів. Контролерам також надаються візуальні та слухові засоби підтримки. У випадку автоматизованого режиму завдання управління передавалося системі. Учасники мали відслідковувати рух і систему. Автоматичне виявлення конфліктів було доступним, але система автоматично вирішувала конфлікт. Проте учасники повинні були підтримувати усвідомлення ситуації у випадку, якщо функція вирішення конфлікту не працювала. Ми встановили дуже низьку ймовірність ($\leq 0,01\%$) того, що система перейде в режим "з увагою". Учасники мали вирішувати конфлікти вручну, якщо це було необхідно.

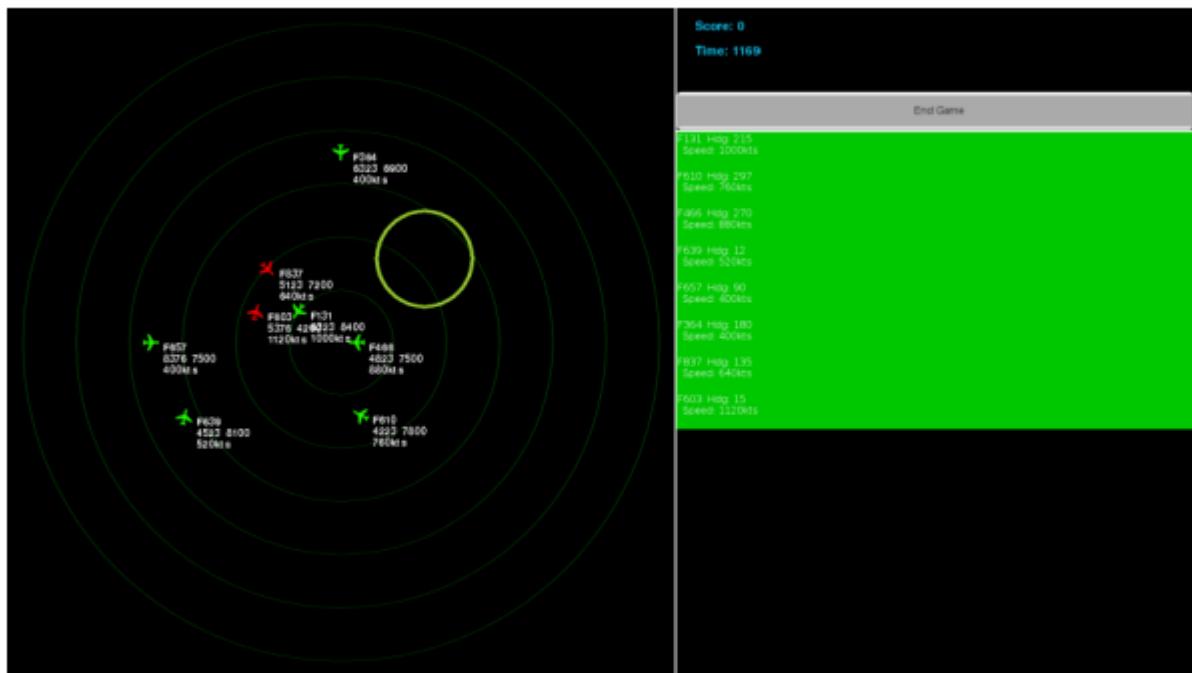


Рис.14. Інтерфейс взаємодії людина-комп'ютер. Група літаків генерується і відображається в лівій частині, з конкретною інформацією про кожен літак, яка перерахована в правій нижній частині. Верхня права частина служить для відображення часу та балів.

Таблиця 1. Порівняння трьох режимів

	Ручний	Під контролем уваги	Автоматизований
Надавати виявлення конфліктів	Ні	Так	Так
Надавати попередження про конфлікти	Ні	Так	Так
Попереджувати про вторгнення в зону небезпеки	Ні	Так	Так
Система автоматично вирішує конфлікти	Ні	Ні	Так

Основні обов'язки диспетчера повітряного руху (АТСО)	Управління	Управління	Моніторинг
---	------------	------------	------------

2.3.3. Рівні руху

Згідно з Дюраном [36], важко вирішити проблему кластеру конфліктуючих повітряних судів. Навіть якщо ми можемо моделювати мінімізацію траєкторії за допомогою опуклої функції, простір пошуку в горизонтальному просторі поділяється на таку кількість компонентів, що вимагають локального пошуку рішення. Для конфлікту, в якому задіяно n повітряних судів, може бути $2n(n-1)/2$ різних компонентів у вільному просторі траєкторій. Пропонується, що будь-який метод, який вимагає дослідження кожної з'єднаної компоненти, є NP-складним [37]. Крім того, кількість потенційних рішень у просторі рішень зростає експоненційно. Для $n = 3$ повітряних судів існує 8 можливих варіантів; для $n = 6$ кількість можливих рішень збільшується до 32 768. Тому ми створили три рівні руху для кожного режиму автоматизації, які складаються з 3, 6 і 8 повітряних судів, відповідно.

2.3.4. Учасники

Важливим етапом при проектуванні дослідження, яке включає участь людей, є визначення обсягу вибірки. Недостатньо мала вибірка може внести менше помилок не-вибіркового характеру та не призводити до корисних результатів, що, отже, призводить до витрат ресурсів. З іншого боку, надмірна вибірка може призвести до непотрібних витрат та може викласти осіб ризику втручання [38]. Кількість суб'єктів у дослідженнях щодо поведінки авіадиспетчерів варіюється в залежності від цілей дослідження. Наприклад, кількість учасників, задіяних у дослідженнях щодо руху очей, зазвичай становить близько 10 або 20 (наприклад, 6 суб'єктів у [9], 11 у [16], 17 у [39], 19 у [40], 25 у [15,20]). З огляду на ці попередні дослідження ми вибрали розмір вибірки у межах [10, 20]. Ми залучили 8 студентів коледжу за допомогою

оголошень на обов'язковому курсі для старших студентів, які вивчають авіадиспетчерське управління. Крім того, у дослідження було запрошено шестеро авіадиспетчерів Східнокитайського управління авіадиспетчерським обслуговуванням. Учасникам сплачували гроші в залежності від їхньої продуктивності. Кожен раз, коли учасник не міг вирішити конфлікт, він або вона втрачав один бал (наприклад, 1 бал \approx 1 долар США). Таким чином, ми сподівалися, що учасники ставляться до цієї симуляції серйозно. Інформація про всіх суб'єктів наведена в таблиці 2.

Таблиця 2. Інформація про учасників.

	Учасник ID	Вік	Роки роботи
ATCOs	1	27	4
	2	25	2
	3	25	3
	4	26	5
	5	28	9
	6	37	-
Студенти	7	19	-
	8	20	-
	9	20	-
	10	21	-
	11	22	-
	12	21	-
	13	20	-
	14	20	-

2.3.5. Обладнання

Для збору даних щодо рухів очей використовувалася система faceLAB5.0 від компанії Seeing Machines. Для збору даних щодо серцевого ритму, електропровідності шкіри, температури шкіри та міоелектрики використовувався біо повернення пристрій VFB2000 від Biofeedback Xpert. Після кожного експерименту учасникам було потрібно заповнити дві форми: форму

шкали усвідомлення ситуації 3D-SART та форму шкали робочого навантаження NASA-TLX (див. розділ 2.4 для подальших деталей).

2.3.6. Дизайн

У цій роботі два фактори виступали як незалежні змінні: рівні автоматизації та рівні руху. Було підготовлено дев'ять сценаріїв, використовуючи повністю перекреслену конструкцію 3×3 в межах дизайну для об'єктів. Кожен учасник почав з першого набору сценаріїв у ручному режимі, за якими слідував другий набір сценаріїв у режимі, що вимагає уваги, а потім третій набір сценаріїв у повністю автоматизованому режимі. У кожному наборі сценаріїв рух був підготовлений у порядку 3 повітряних суден, 6 повітряних суден, 8 повітряних суден. Між сценаріями було п'ятихвилинна перерва, що надавала досить часу для заповнення учасником форми 3D-SART та NASA-TLX. Дизайн наших експериментів спрямований на поступове залучення учасників до рівня "в облікову петлю".

Зокрема, експерименти виконувалися наступним чином:

Крок 1: Учасника запитували про його фізіологічний стан перед початком симуляції. Була представлена інформація про зміст, операції та мету симуляції;

Крок 2: Учасник сідав перед екраном і налаштовував крісло на свій зручний стан;

Крок 3: Перед початком експерименту калібрували прилади для відстеження очей та прилад VFB2000;

Крок 4: Предмету потрібно було ознайомитися з інструментом симуляції.

Крок 5: Початок симуляції. Записували дані про рухи очей, варіабельність серцевого ритму (HRV), рівень шкірної провідності (SCL) та дані щодо електроенцефалограми (EEG);

Крок 6: Зупинка симуляції. Учасник заповнював форму NASA-TLX та форму 3D-SART.

На малюнку 4 представлений учасник під час експерименту. У даному дослідженні акцентується на вимірах руху очей та суб'єктивних вимірах, в той час як дані про електроенцефалограму та серцево-судинну систему представлені у окремому дослідженні.



Рис.15. Збір даних під час експерименту

2.4. Метрики руху очей

У роботі [41] ми зосередилися на двох типах рухів очей: фіксація та сакада. Ми обчислили та проаналізували такі параметри, як тривалість фіксації, кількість точок фіксації, ентропія погляду та умовна ентропія для вивчення побічної поведінки погляду. Також досліджено тривалість сакад та середню величину сакади для розуміння побічної поведінки сакад. Докладні визначення наведені в таблиці 3.

Таблиця 3. Метрика руху очей

Показники руху очей	Індикатор	Визначення	Загальне значення
Погляд	Тривалість погляду	Загальна тривалість погляду під час експерименту.	Довший час вказує на те, що сталося щось, чого учасник не очікував.
	Кількість точок фіксації	Загальна кількість фіксацій під час експерименту.	Більша кількість точок фіксації вказує

			на меншу ефективність пошуку.
	Ентропія погляду	Значення швидкості ентропії області погляду під час експерименту	Вища ентропія погляду вказує на більший діапазон та більш хаотичний розподіл погляду.
	Умовна ентропія	Швидкість ентропії області погляду з врахуванням матриці відносин переходу.	Вища умовна ентропія вказує на більш неправильний перехід між фіксаціями.
Сакада	Тривалість сакади	Час від закінчення останнього погляду до початку наступного погляду під час експерименту.	Більша тривалість сакади вказує на меншу ефективність пошуку.
	Середня сакада	Співвідношення амплітуди сакади до тривалості сакади.	Більша середня сакада вказує на більш ефективний пошук.

2.5. Ентропія погляду та умовна ентропія

2.5.1. Ентропія погляду

Концепція ентропії спочатку виникла в термодинаміці, а пізніше була введена в область інформатики Клодом Шенноном для опису ступеня інформаційної неоднозначності [42]. Загальна формула для розрахунку ентропії в дискретних просторах подається наступним чином:

$$H(x) = - \sum_{i=1}^n (p_i) \cdot \log_2 (p_i) \quad (1)$$

де p_i - це ймовірність того, що зібрані дані щодо точки фіксації падають на позицію (i). Згідно з його визначенням, $H(x)$ більше за 0. Ентропія погляду (GE) вимірює розподіл точок фіксації і тривалість погляду суб'єкта. Більше значення $H(x)$ вказує на те, що (i) область погляду ширша, і (ii) розподіл погляду більш

хаотичний. Це свідчить про те, що увага суб'єкта розподіляється в більший простір. Дослідження ентропії погляду можна знайти в галузі охорони здоров'я, психології, транспорту та взаємодії людини з комп'ютером. Наприклад, деякі вчені виявили, що ентропія погляду лікарів була вищою в надзвичайних ситуаціях; навпаки, Діаз-П'єдра та ін. [43] виявили, що ентропія погляду пілотів була нижчою в надзвичайних місіях. Суперечливу поведінку ентропії погляду між лікарями та пілотами можна пояснити тим, що бойові пілоти мають визначені процедури в надзвичайних ситуаціях, тоді як медичні умови непередбачувані та складні, і, таким чином, ентропія погляду лікарів вища в надзвичайних ситуаціях.

2.5.2. Умовна ентропія

Хоча ентропія вказує на невизначеність даної випадкової змінної, більшість процесів в природі не є абсолютно випадковими чи повністю передбачуваними. Попередній вихід даної системи може впливати на вибір наступного входу, що означає, що наступний вхід залежить від попереднього виходу. Статистичні характеристики цих процесів можуть бути наближено визначені матрицею Маркова від першого до n-го порядку [42]. Нульовий порядок або стаціонарний розподіл представляє загальну ймовірність зайнятості кожного стану, а розподіл переходів представляє швидкість переходу від одного стану до іншого. Умовна ентропія погляду вище (УЕУ) подається наступним чином:

$$H_{CGE}(x) = \sum_{i=1}^n p_i \sum_{j=1}^n p_{(i, j)} \log_2 p_{(i, j)} \quad (2)$$

де H_{CGE} - невизначеність попереднього стану відомого x . p_i представляє стаціонарний розподіл, а $p_{(i, j)}$ представляє ймовірність переходу від точки фіксації (i) до точки фіксації (j). Вища умовна ентропія вказує на більш безладну поведінку зору. Відмінність між ентропією зору та умовною ентропією полягає в тому, що ентропія зору обчислює розподіл загальних фіксацій в експерименті,

тоді як умовна ентропія досліджує відносини між попередньою фіксацією та наступною фіксацією.

2.6. 3D-SART and National Aeronautics and Space Administration -TLX

2.6.1. 3D-SART

Шкала 3D-SART широко використовується для вимірювання свідомості ситуації. Оригінальні десять вимірювань SART поділяються на три вимірювання: вимоги до ресурсів уваги, надання ресурсів увазі та розуміння поточної ситуації [44]. У таблиці 4 наведено описи цих трьох вимірювань.

Далі використовується таке рівняння для оцінки Свідомості Ситуації (SA):

$$SAS = Ud - (De - Su) \quad (3)$$

де SAS - бал свідомості ситуації; Ud - розуміння поточної ситуації; De - бал уваги, потреби в увазі; і Su - бал ресурсів уваги. Вищий бал вказує на вищу Свідомість Ситуації.

У нашому дослідженні ми використовували 3D-SART замість 10D-SART на основі таких розглядів. По-перше, 3D-SART було легше впровадити, і він може передавати ту саму інформацію, яку передає 10D-SART [45]. По-друге, учасники можуть швидко заповнювати форми 3D-SART після симуляції. Таким чином, використання 3D-SART мінімізувало перерви для учасників, особливо коли їм доводилося завершити кілька раундів симуляцій у нашому дослідженні.

Таблиця 4. Опис розмірностей шкали 3D-SART

Розмірність	Опис
Запит на увагу (De)	Ймовірність змін, які стаються у робочих умовах диспетчера повітряного руху (нестійкість ситуації); Кількість елементів, на які потрібно звертати увагу при виконанні завдання (змінливість ситуації);

	Складність ситуації завдання (складність ситуації).
Подання уваги (Su)	Рівень активності диспетчерів повітряного руху на робочому місці (підвищення активності); Здатність виконувати інші завдання під час виконання робочих завдань (запас розумових можливостей); Рівень концентрації (концентрація); Здатність до раціонального розподілу уваги (розподіл уваги).
Розуміння поточної ситуації (Ud)	Ступінь прийняття або розуміння інформації на роботі (кількість інформації); Легкість або складність отримання інформації (якість інформації); Ознайомленість з поточним завданням (ознайомленість).

2.6.2. National Aeronautics and Space Administration -TLX

Шкала NASA-TLX була запропонована Хартом та іншими в Національному аеронавтичному управлінні (NASA) для оцінки робочого навантаження диспетчерів повітряного руху [46]. Вона надає загальний показник навантаження на основі вагомих оцінок шести підвимірів. Дивіться Таблицю 5 для детальних описів кожної розмірності.

Таблиця 5. Розмірності шкали National Aeronautics and Space Administration -TLX

Розмірність	Опис
Психологічні потреби	Психологічні потреби диспетчерів при спостереженні, розмішленні та прийнятті рішень на роботі.
Фізичне навантаження	Енергетичні витрати, необхідні для виконання роботи диспетчера.

Часові вимоги	Час і тиск часу, необхідні для виконання роботи диспетчера.
Рівень зусиль	Зусилля, які диспетчери вкладають для досягнення високого рівня компетентності при виконанні своїх завдань.
Рівень задоволеності	Задоволення диспетчера виконаною роботою.
Фрустрація	Те, чи відчувають диспетчери розслабленість або стрес під час виконання завдань.

2.7. Статистичний аналіз

Для перевірки наявності значущих різниць між різними групами ми використовували аналіз дисперсії (ANOVA). Спершу проводився тест Левена для визначення відповідності варіації початкових даних вимог однорідності дисперсії [47]. Потім виконувався тест однорідності дисперсії (F-тест), щоб визначити, чи існують статистично значущі різниці в очей, показників обстановки, та навантаження. Для дослідження зв'язків між показниками очей та рівнем трафіку розроблялися лінійні регресійні моделі з трафіком як незалежною змінною. R^2 , також відомий як коефіцієнт детермінації, обчислювався для кожної регресійної моделі. R^2 - це відсоток зміни залежної змінної, яку пояснює лінійна модель. Зазвичай, чим більший R^2 , тим краще модель регресії відповідає нашим спостереженням.

2.8. Результати

Ми встановили, що значення тесту Левена для всіх експериментальних даних були більшими, ніж 0.05, що означає, що всі дані відповідали умові тесту на однорідність дисперсії. Рівні значущості були подальше поділені на три групи, $p < 0.1$ (*), $p < 0.05$ (**), і $p < 0.01$ (***). Загалом ми встановили, що не існує значущих різниць в показниках очей, обстановки та навантаження між

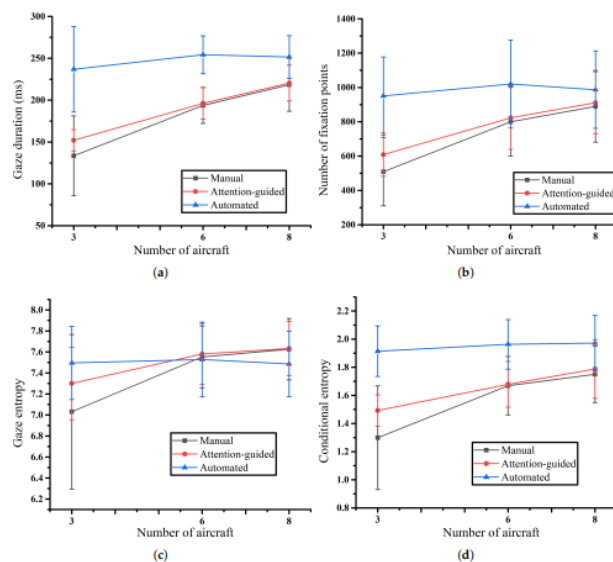
групами, які працювали в ручному режимі та групою, яка користувалася інформаційними підказками. На відміну від цього, існують значущі різниці між групою, яка користувалася інформаційними підказками, та групою, яка користувалася повністю автоматизованою системою. Таблиця 6 містить результати тестів з показників очей для обох груп.

2.9. Вплив автоматизації на показники очей

2.9.1. Поведінка погляду

З таблиці 6 видно, що існували значущі відмінності у тривалості фіксації погляду між групою у режимі, у якому увага керівана, та групою у повністю автоматизованому режимі в усіх трьох сценаріях руху (три літаки ($F = 36,198$, $p = 0,000$), шість літаків ($F = 54,778$, $p = 0,000$) та вісім літаків ($F = 12,301$, $p = 0,002$)). Середня тривалість фіксації погляду збільшувалася зі збільшенням кількості літаків (див. рисунок 5a). У ручному режимі та режимі увага-керівана тривалість фіксації погляду практично лінійно збільшувалася зі збільшенням трафіку

(див. 0,516 для ручного 0,725 для режиму Натомість, тривалість не змінювалася в режимі при зміні 0,035).



Таблиця 7; $R^2 =$ режиму і $R^2 =$ увага-керівана). здається, що фіксації погляду автоматизованому трафіку ($R^2 =$

Рис.16. Статистичні результати щодо поведінки погляду. (a) Тривалість фіксації погляду, (b) кількість точок фіксації, (c) ентропія погляду, (d) умовна ентропія.

Таблиця 6. Значущий аналіз очей учасників у режимі керованого увагою і в автоматичному режимі.

Кількість повітряних судів (АС)	Показники руху очей	Кероване увагою (Середнє ± Стандартне відхилення)	Автоматизоване (Середнє ± Стандартне відхилення)	F	P
3	Тривалість фіксації погляду (мс)	152.071 (12.778)	236.855 (51.155)	36.198	0.000 (***)
	Кількість точок фіксації	608.5 (126.245)	950.714 (227.228)	24.264	0.000 (***)
	Ентропія погляду	7.300 (0.345)	7.496 (0.348)	2.224	0.148 (-)
	Умовна ентропія	1.493 (0.111)	1.914 (0.179)	55.851	0.000 (***)
	Тривалість саккади (мс)	36.855 (13.304)	84.340 (51.490)	11.162	0.003 (***)
	Середня саккада (м/с)	0.960 (0.176)	0.684 (0.227)	12.948	0.001 (***)
6	Тривалість фіксації погляду (мс)	196.141 (18.790)	254.184 (22.534)	54.788	0.000 (***)
	Кількість точок фіксації	823.357 (183.698)	1020.071 (256.260)	5.449	0.028 (**)

	Ентропія погляду	7.581 (0.291)	7.528 (0.355)	0.183	0.673 (–)
	Умовна ентропія	1.679 (0.162)	1.963 (0.176)	19.761	0.000 (***)
	Тривалість саккади (мс)	46.300 (13.460)	68.419 (24.689)	8.662	0.007 (**)
	Середня саккада (м/с)	1.017 (0.180)	0.799 (0.169)	10.905	0.003 (***)
8	Тривалість фіксації погляду (мс)	220.386 (21.358)	251.582 (25.523)	12.301	0.002 (***)
	Кількість точок фіксації	911.357 (180.299)	987.000 (225.191)	0.963	0.336 (–)
	Ентропія погляду	7.633 (0.257)	7.486 (0.311)	1.872	0.183 (–)
	Умовна ентропія	1.788 (0.208)	1.971 (0.197)	5.793	0.024 (**)
	Тривалість саккади (мс)	55.599 (17.775)	70.345 (25.806)	3.100	0.090 (*)
	Середня саккада (м/с)	0.936 (0.223)	0.761 (0.226)	4.268	0.077 (*)

Рівень значущості: $p < 0,1$ (), $p < 0,05$ (), $p < 0,01$ ().

На рисунку 16b показано середню кількість точок фіксації всіх учасників під різними рівнями автоматизації та сценаріями руху. Рисунки 17a та 17b є просторовими розподілами точок фіксації одного й того ж учасника під умовами режиму, у якому увага керує, та режиму автоматизованого керування, обидва з трьома літаками. Сині крапки - це точки фіксації учасника, які показують місця на екрані, які він/вона спостерігав. Порівняно з ручним режимом або режимом, у якому увага керує, кількість точок фіксації учасників значно збільшилася в автоматизованому режимі. Згідно з таблицею 6, порівнюючи поведінку фіксації учасників у режимі керування увагою та в автоматизованому режимі, були виявлені значущі відмінності в кількості точок фіксації між трьома літаками ($F = 24,264$, $p = 0,000$) і з шістьма літаками ($F = 5,449$, $p = 0,028$). Однак при збільшенні кількості літаків до восьми значущої різниці не спостерігалось.

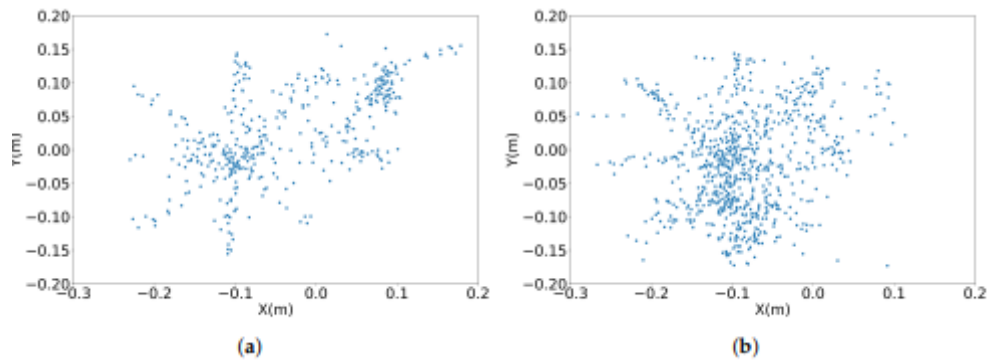


Рис.17. Розподіл точок фіксації. (а) Режим керування увагою, (b) автоматизований режим.

Для обчислення ентропії погляду ми поділили радарний екран на 1296 (48×27) невеликих одиниць та обчислили частоту перегляду кожної невеликої одиниці учасником. На рис. 18 показано типовий розподіл погляду одного учасника, де колір вказує на частоту точок погляду, які потрапляють в цю область. Малюнку 18a показує частоту погляду в сценарії режиму уваги з трьома повітряними суднами. Малюнку 18b показує частоту погляду в сценарії автоматизованого режиму з трьома повітряними суднами. Статистичні результати щодо ентропії погляду показані на малюнку 16с. Як показано в таблиці 6, не було виявлено значущої різниці в ентропії погляду між групою з режиму уваги та групою автоматизованого режиму для всіх рівнів трафіку (три повітряні судна ($F = 2.224$, $p = 0.148$), шість повітряних суден ($F = 0.183$, $p = 0.673$) та вісім повітряних суден ($F = 1.872$, $p = 0.183$)). Під час ручного режиму або режиму уваги ентропія погляду збільшувалася зі збільшенням руху, тоді як в автоматизованому режимі ентропія погляду не змінювалася при збільшенні трафіку. До речі, в високотрафіковому сценарії, тобто коли кількість повітряних суден становила вісім, ентропія погляду в автоматизованому режимі була нижчою, ніж в ручному режимі або в режимі уваги.

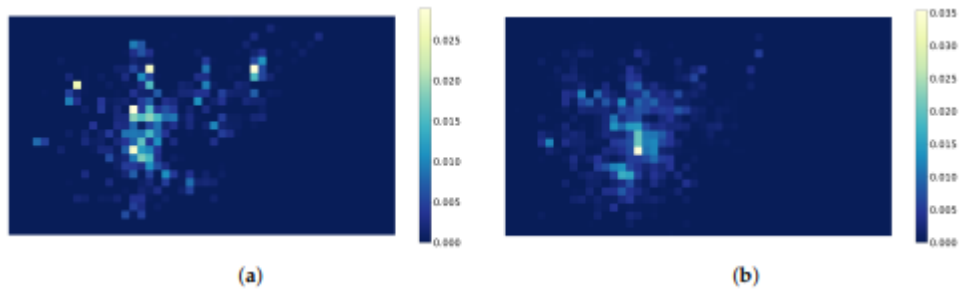


Рис.18. Частота перегляду спеціалістами з повітряного руху кожної малої одиниці в двох сценаріях. (a) Сценарій у режимі уваги з трьома повітряними суднами; (b) сценарій у автоматизованому режимі з трьома повітряними суднами.

На рисунку 16d показано умовну ентропію для всіх режимів і сценаріїв руху. Згідно з таблицею 6, можна побачити, що існували значущі різниці в умовній ентропії між групою з увагою і групою з автоматизацією для всіх сценаріїв руху (три повітряні судна ($F = 55.851$, $p = 0.000$), шість повітряних суден ($F = 19.761$, $p = 0.000$), та вісім повітряних суден ($F = 5.739$, $p = 0.024$)). У ручному режимі і режимі уваги умовна ентропія збільшувалася зі збільшенням руху повітряних судів.

2.9.2. Поведінка при русі (сакади)

Тривалість сакад є загально використовуваним показником ефективності пошуку [48]. Рисунок 19а показує тривалість сакад при різних рівнях автоматизації та потоку трафіку. З таблиці 6 видно, що існують значущі різниці в тривалості сакад між групою з увагою та автоматизованою групою (три літаки ($F = 11.162$, $p = 0.003$), шість літаків ($F = 8.662$, $p = 0.007$) та вісім літаків ($F = 3.100$, $p = 0.090$)). Тривалість сакад збільшувалася зі зростанням потоку трафіку в групах з ручним/уважним керуванням, тоді як в автоматизованому режимі не було виявлено чіткої системності в тривалості сакад.

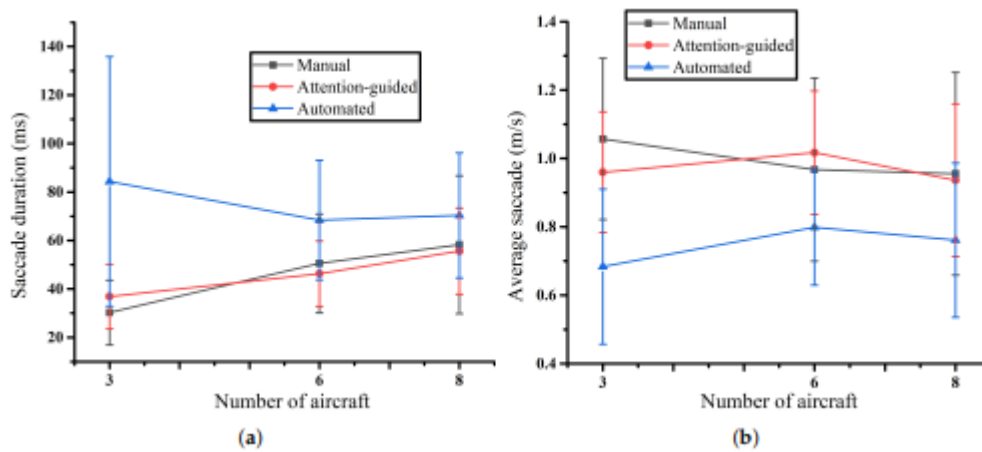


Рис.19. Статистичні результати щодо поведінки сакад. (а) Тривалість сакад, (b) середній сакад.

Фігура 19b показує середню швидкість сакади при різних рівнях автоматизації та об'ємі руху. Як видно з Таблиці 6, існують значущі відмінності у середній швидкості сакади учасників між групою "увага-керовано" та групою "автоматизовано" (три повітряні судна ($F = 12.948$, $p = 0.001$), шість повітряних суден ($F = 10.905$, $p = 0.003$), вісім повітряних суден ($F = 4.268$, $p = 0.077$)). Середня швидкість сакади знизилася зі збільшенням об'єму руху у ручному режимі та режимі "увага-керовано", тоді як середня швидкість сакади значущо не змінювалася у режимі "автоматизовано".

2.9.3. Вплив трафіку на рух очей

Для вивчення впливу трафіку на очі рухи ми провели однофакторний дисперсійний аналіз. В таблиці 7 наведено статистичні результати. R^2 , перераховане в останньому стовпчику таблиці, було обчислене з лінійних моделей регресії, з рівнем трафіку як незалежною змінною. Як видно з таблиці, середня швидкість сакад була не впливована рівнем трафіку. Інші показники рухів очей були вплинуті рівнем трафіку в режимі ручного управління або режиму під керуванням увагою. Знову ж таки, рівні трафіку не впливали на рухи очей в автоматизованому режимі.

Таблиця 7. Статистичні тести на вплив трафіку на рухи очей

Показники рухів очей	Рівень автоматизації	F	P	R²
Тривалість фіксації погляду	Ручний	21.410	0.000	0.516
	Під час уваги	51.804	0.000	0.725
	Автоматизований	0.971	0.388	0.035
Кількість точкових фіксацій	Ручний	13.513	0.000	0.396
	Під час уваги	12.403	0.000	0.383
	Автоматизований	0.301	0.742	0.006
Ентропія погляду	Ручний	6.218	0.005	0.221
	Під час уваги	4.986	0.012	0.190
	Автоматизований	0.060	0.941	0.000
Умовна ентропія	Ручний	11.046	0.000	0.341
	Під час уваги	11.423	0.000	0.369
	Автоматизований	0.678	3.238	0.018
Тривалість сакад	Ручний	6.244	0.004	0.238
	Під час уваги	5.473	0.008	0.216
	Автоматизований	0.808	0.453	0.030
Середня швидкість сакад	Ручний	0.601	0.553	0.027
	Під час уваги	0.641	0.532	0.001
	Автоматизований	1.106	0.341	0.030

2.10. Вплив автоматизації на усвідомлення ситуації

На рис. 20 показані результати балів 3D-SART учасників, тобто SAS. З рисунку видно, що усвідомлення ситуації значно зменшилося при збільшенні потоку на кожному рівні автоматизації. Ми також виявили, що усвідомлення ситуації збільшилось, коли рівень автоматизації збільшився при тому ж рівні трафіку. Виявлено, що є значущі різниці в усвідомленні ситуації учасників в ручному та автоматизованому режимах з восьми літаками в сценаріях ($F = 6,95$, $p = 0,014$), в той час як у режимах з трьома літаками ($F = 0,271$, $p = 0,607$) або шістьма літаками ($F = 2,692$, $p = 0,113$) різниці не було.

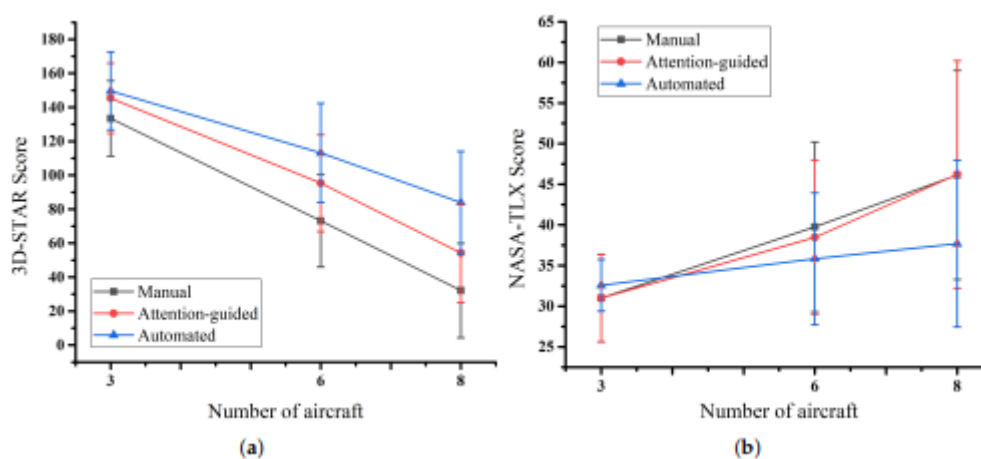


Рис.20. Статистичні результати з усвідомлення ситуації (SA) та робочого навантаження (workload). (a) Бали шкали 3D-SART, (b) бали шкали NASA-TLX.

2.11. Вплив автоматизації на робоче навантаження

Фігура 9b показує результати шкали NASA-TLX для учасників під впливом різних рівнів автоматизації. Як видно з рисунка, зі збільшенням кількості літаків збільшувалася робоче навантаження на учасника. Проводилася перевірка однорідності робочого навантаження учасників під впливом уваги та автоматизованого режиму. Виявлено, що при восьми літаках спостерігалися значущі відмінності в робочому навантаженні учасників ($F = 3,380$, $p = 0,077$), тоді як відмінностей не виявлено в сценарії з трьома літаками ($F = 0,888$, $p = 0,355$) або з шістьма літаками ($F = 0,628$, $p = 0,435$).

2.12. Різниця між студентами і фахівцями з авіаційного управління

Ми виявили, що між студентами і фахівцями з авіаційного управління практично не існує різниці за всіма вимірюваннями, за винятком швидкості сакаду в деяких сценаріях. Результати аналізу ANOVA наведено в таблиці 8. У ручному режимі існує статистична різниця між студентами і фахівцями з авіаційного управління при русі авіації в кількості шість ($p = 0.040$), тоді як у режимі, керованому увагою, чи в автоматизованому режимі виявлено статистичні відмінності в двох різних сценаріях руху (три літаки і шість літаків для режиму, керованого увагою, три літаки і вісім літаків для автоматизованого режиму).

Таблиця 8. Статистичні тести для середньої швидкості сакаду між студентами і фахівцями з авіаційного управління.

Кількість ЛА (літаків)	Ручний			Привертає увагу			Автоматизований		
	3	6	8	3	6	8	3	6	8
F	0.103	5.294	3.183	5.530	6.687	3.024	10.401	2.141	6.155
P	0.754	0.040	0.100	0.037	0.024	0.108	0.007	0.169	0.029

Висновок до розділу 2

У цій роботі досліджено різницю в очних рухах, обізнаності про ситуацію та психічному навантаженні диспетчерів повітряного руху на трьох рівнях автоматизації. Результати вказують на те, що візуальні та звукові сигнали мало впливають на очні рухи, порівняно з ручним режимом. У разі автоматизованого режиму роль учасників змінилася з приймача рішень щодо контролю на спостерігача, і їх очні рухи суттєво змінилися. Загалом, ми виявили, що зі збільшенням рівня автоматизації очікуваний рух АТС ставав більш хаотичним. Крім того, показники очних рухів учасників під автоматизованим режимом лишалися майже сталими незалежно від зміни потоку повітря. Це можливо через те, що висока автоматизація звільняла диспетчерів від ряду рутинарних завдань, і диспетчери мали додаткові візуальні ресурси для розподілу під час виконання обов'язків спостерігача. Крім того, ми виявили, що в сценарії з великою

кількістю літаків автоматизація може покращити обізнаність про ситуацію АТС та ефективно зменшити їх робоче навантаження.

Ця робота має кілька обмежень. По-перше, слід було б точніше контролювати складність завдання. Під час симуляцій літаки випадковим чином генерувалися на восьми точках екрана. Складність завдання щодо вирішення конфлікту для кожної симуляції могла бути різною. По-друге, інтерфейс взаємодії людина-комп'ютер було розділено на області з різними функціями; можливо, ми могли б дослідити дані про очні рухи в кожній зоні окремо, щоб розкрити залежність контролерів від кожної області. Нарешті, але не менш важливо, наша симуляція відрізняється від реального середовища керування повітряним рухом. На практиці диспетчери повинні приймати швидкі, правильні рішення, щоб зберегти безпеку та порядок в повітряному русі. Помилки не допускаються під час реальної роботи, в той час як під час симуляції в реальному часі ставлення учасників до роботи змінюється, оскільки їм відомо, що допускаються помилки. Це може вплинути на очні рухи та іншу фізіологічну поведінку.

Розділ 3. ПРОГНОЗУВАННЯ ЧАСОВИХ ІНТЕРВАЛІВ ДЛЯ ОПЕРАЦІЙ ПОВІТРЯНОГО РУХУ

3.1. Операційні терміни

Багато аспектів у системі управління повітряним рухом (АТМ) піддаються впливу невизначеностей, які знаходяться у динаміці з часом. Оскільки динаміка часто має недетермінований характер, є зручним визначати часові рамки та формулювати завдання оптимізації, що відповідають кожній часовій рамці. Визначення часових рамок повинно враховувати як числові обґрунтування, так і практичні мотиви. З числової точки зору, задачі повинні враховувати динаміку та невизначеності зі схожими параметрами, щоб бути числово ефективними. З оперативної точки зору важливо, щоб конвенції про часові рамки були вже відомими або легко зрозумілими для операторів-людей, щоб нові технології могли бути швидко та безпомилково впроваджені. Загальні принципи включають в себе поділ на фази онлайн та офлайн, де фаза онлайн включає активні місії повітряного транспорту, а фаза офлайн - неактивні. Останнім часом земельні операції також були включені до фази онлайн, включаючи посадку і висадку пасажирів. Це важливо, оскільки зміни в часі на землі мають значний вплив на повітряну фазу. Наявність такого взаємозв'язку сприяє формулюванню задачі безперервної оптимізації від гейту до гейту[50]. Інша різниця в часових рамках полягає в тому, наскільки швидко можуть виникнути непередбачені події, які впливають на операції повітряного транспорту, такі як конфлікти, погодні утворення, переповнення повітряного простору або аеропорту, а також відмови систем. Із цією метою введено термінологію з темпоральною класифікацією операцій АТМ, яка включає стратегічні, тактичні та екстрені часові рамки[52]. На малюнку 1 показані визначення часових рамок, які використовуються в наших дослідженнях.[5]

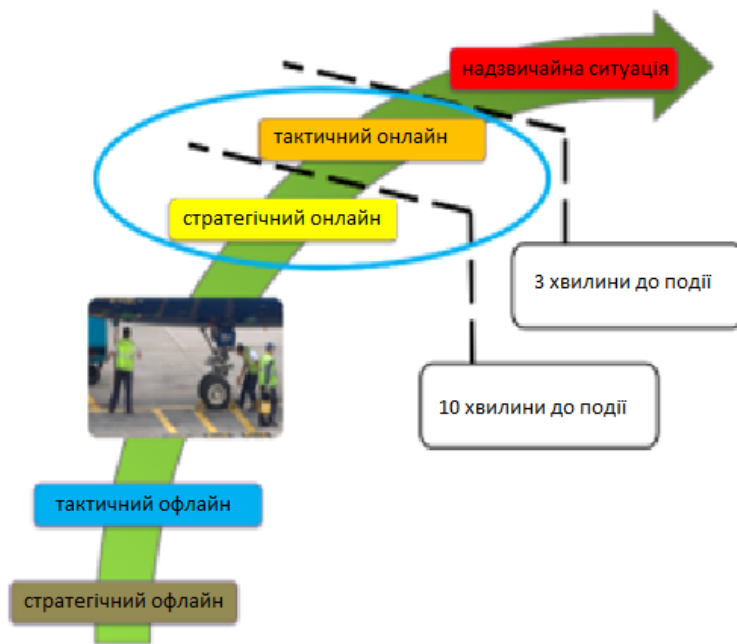


Рис.21. Передбачувані часові рамки для операцій повітряного руху офлайн і онлайн

У стратегічному часовому інтервалі вплив невизначеностей триває протягом тривалого періоду, що призводить до менш оптимальної оцінки. З іншого боку, наявність більшого часу для обчислень і прийняття рішень дозволяє використовувати більш складні моделі та алгоритми у вищорозмірних задачах оптимізації.

У тактичному часовому інтервалі невизначеності призводять до менших відхилень, але зобов'язання до досягнення безпечних рішень протягом обмеженого часу вимагає використання спрощених моделей та логіки прийняття рішень, які зазвичай базуються на апроксимаціях і лінійаризаціях.

Екстрений фаза традиційно асоціюється з використанням надійної та бездоганної логіки прийняття рішень для забезпечення безпеки повітряного транспорту.

Межі між стратегічним, тактичним і екстреним фазами зазвичай визначаються при формулюванні проблеми. Проте все ще існує значна невизначеність щодо точного розділення між стратегічними та тактичними онлайн операціями повітряного руху, і недавно розмежування базується на типі

дій, які мають бути вжиті [53]. Зокрема, стратегічні онлайн операції в основному включають тактичні дії з управління потоком повітряного руху (ATFM), ініційованих менеджером потоку перед входженням польоту в зону відповідальності, який повинен вжити заходи, тоді як тактичні онлайн операції припускаються відбуваються в межах поточного сектора і, отже, вже підпадають під відповідальність контролера даної юрисдикції.

3.2. Формулювання багатоцільової оптимізаційної задачі 4 - Dimensional Trajectory

З аналітичної точки зору, загальну задачу оптимізації траєкторії можна виразити таким чином [Ошибка! Источник ссылки не найден., 55]: "Визначте стани $x(t) \in R^n$, керування $u(t) \in R^m$, параметри $P \in R^q$, початковий час $t_0 \in R$ та кінцевий час $t_f \in R \mid t_f > t_0$, які оптимізують показники продуктивності."

$$1) \quad J = \Phi[x(t_0), x(t_f), p] + \int_{t_0}^{t_f} \mathcal{L}[x(t), u(t), p] dt$$

Підпорядкованим динамічним обмеженням

$$2) \quad \dot{X}(t) = f[x(t), u(t), t, p]$$

Підпорядкованим траєкторним обмеженням

$$3) C_{min} \leq C[x(t), u(t), t; p] \leq C_{max}$$

Та граничне з умовами

$$4) \Phi_{min} \leq \Phi[x(t_0), x(t_f), u(t_0), u(t_f); p] \leq \Phi_{max}$$

Для досягнення багатоцільової оптимальності необхідно використовувати техніку, що дозволяє передбачити один загальний показник ефективності, як у пріоритетному підході, або обробляти результати після виконання оптимізації, як у післяпохдний підход [56]. Оскільки наша увага зосереджена на оптимізаційному алгоритмі в реальному часі, ми використовуємо метод зваженої суми, який відноситься до категорії апріорної артикуляції вибору. Концептуально представлено апріорний підхід рис. 23.



Рис.22. Блок-схема багатокримінальної оптимізації з апіорним формулюванням посилянь

Методи, які ґрунтуються на градієнті і (зазвичай асоціюються із високою обчислювальною швидкістю, часто використовуються для вирішення задачі оптимального управління (ОСР) в апіорному підході. Однак їхня обмежена здатність до глобальної збіжності є значущим недоліком через значну кількість нелінійностей у моделях (таких як динаміка літака, погодні умови і т. д.), що призводить до виникнення багатьох локальних мінімумів у функціях витрат. Один із перспективних підходів - використання гібридної стратегії, яка поєднує пошук за шаблоном або еволюційний алгоритм на першому етапі для визначення глобальних областей збіжності, а потім використовує ітерації на основі градієнта для досягнення локальної оптимальності. Наш поточний алгоритм оптимізації 4DT в реальному часі базується на ітераціях, як описано в [5], і в даний момент ми розробляємо розширений гібридний варіант, який включає попередній дискретний пошук за шаблоном. Багатоцільовий алгоритм оптимізації 4DT концептуально представлений на рисунку 23. Для використання переваг, які надає теорія оптимального керування [55], всі цілі та обмеження повинні бути

включені у формулювання ОСР. Цей аспект суттєво обмежує можливість використання "чорних скриньок". Також важливо відзначити, що з точки зору чисельних обчислень зручно постачати солверу матрицю Якобі, якщо це можливо, для уникнення повного перерахунку на кожній ітерації.

Рис.23. Блок-схема багатомодельного алгоритму оптимізації 4DT



Відповідно до описаної формулювання ОСР, ми приймаємо наступний загальний вираз функції витрат в рівнянні 1 для штрафів, пов'язаних з проходженням через динамічний об'єм штрафу:

$$J_i = \sum_{j=1}^{n_{sect}} \int [P F_{i,j} * (x(t) \cap S_i(t))] dt$$

Де:

J_i = Показник продуктивності/штрафу, де i -об'єкт.

$P F_{i,j}$ = Коефіцієнт штрафу, де i -об'єкт, а j -об'єм штрафу.

$X(t)$ = Траєкторія.

$1S_i(t)$ = де j -динамічний об'єм штрафу.

Рівняння 5 використовується, у випадку 4-PNV та NG-FMS, з відповідними формами Моделі Повітряного Простору (ASM), Моделі Утворення Конденсаційних Слідів (CTM), Моделі Погодного Стану (WSM) та Моделі

Викидів Шуму (NEM), встановлюючи асоційовані коефіцієнти штрафів на відповідні значення. У нашій реалізації алгоритму 4-PNV та NG-FMS обчислення частини траєкторії в межах об'єму штрафу (рівняння 5) підтримується бібліотекою абстракції геопросторових даних (GDAL/OGR).

3.3. Моделювання і Результати

Наші моделі оптимізації були успішно використані в системах 4-PNV та NG-FMS. Оцінка алгоритмів генерації, узгодження та валідації 4DT намірів проводиться в умовах найгірших сценаріїв повітряного руху. Конкретно, ми розглядаємо ситуацію з найвищим навантаженням в області термінальних маневрів (ТМА). ТМА моделюється як паралелепіпед з квадратною площею основи 60 морських миль з кожного боку, підлога розташована на висоті 2000 футів, а стеля - на рівні FL150. В цьому тестовому сценарії основна увага зосереджена на проблемі управління послідовністю прибуття в умовах розладу: існує лише одна злітно-посадкова смуга, тому не всі літаки можуть бути очищені для переліту через точку злиття у їхній первісно запланований час. У випадках стратегічних та тактичних онлайн сценаріїв з часовим горизонтом у 10 хвилин припускається, що загальний час оптимізації, узгодження та валідації не перевищує 300 секунд. Ми також перевіряємо траєкторії на конфлікти в бічному, вертикальному та поздовжньому напрямках.

У системі 4-PNV визначається найкраща послідовність прибуття з доступних варіантів. Літаки, що використовуються в симуляції, належать до сімейства Airbus A320, мають три ступені свободи динаміки літака та початкову масу від 48000 кг до 60000 кг.

Оптимальні наміри, розраховані для кожного NG-FMS, складаються з 4D точок маршруту, в кількості від 3 до 30. Ці точки спрямовані до точок виходу або до точки злиття (підхідного фіксатора ILS - IAF). Для кожного руху розраховуються два 4DT наміри: оптимальна траєкторія для мінімізації витрат пального та оптимальна траєкторія для мінімізації часу. Забезпечення уникнення

міської зони підвищеної чутливості до шуму (NSA) здійснюється за допомогою включення вихідних даних NEM та порогів шуму прокидання (ANT) у обчислення.

Злиття-точка визначає початок загальної фази підходу, де потрібно мати поздовжню роздільність, щоб забезпечити безпечне розділення при посадці та уникнути порушень роздільності під час фази підходу. Загальний відрізок підходу було моделювано як типовий профіль ILS-підходу, який розпочинається на відстані 9,5 морських миль від злітно-посадкової смуги на висоті 3000 футів. Варто відзначити, що 4-PNV може виконувати точкові злиття також на більшій відстані від підходу та на майбутніх крутих фінальних ділянках підходу. Після збереження початкових намірів в 4-PNV, алгоритм послідовності точкового злиття виділяє доступні інтервали часу. Припустима мінімальна поздовжня роздільність становить 4 морські милі на підходному шляху для літаків середньої категорії, які наближаються зі швидкістю 140 вузлів, тому згенеровані інтервали часу мають роздільність у 90 секунд. На Рисунку 4 представлені результати одного запуску симуляції точкового злиття в області термінальних маневрів (ТМА).

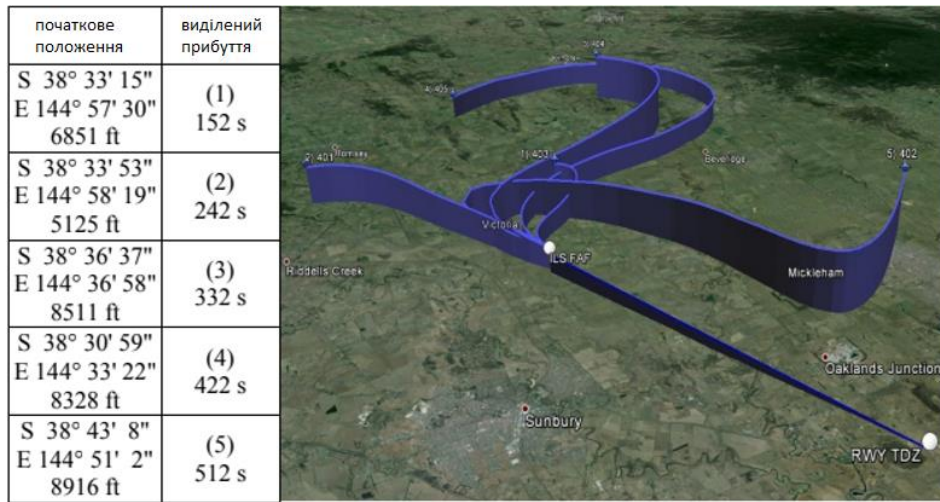


Рис.24. Результати генерації намірів 4DT, узгодження та перевірки в сценарії ТМА

3.4. Алгоритм глобальної організації повітряного руху

Обмеженість різниць у оцінці оптимуму. Можливість надійної оцінки глобального оптимуму в задачі з багатьма локальними мінімумами ґрунтується на наявності певної апріорної інформації, яка дозволяє пов'язати можливі значення функції мінімізації з відомими значеннями у точках, де вже проводилися вимірювання. Давайте розглянемо цю ситуацію більш детально, а для більшої зрозумілості припустимо, що область Q у задачі (1.1) співпадає з областю D пошуку (тобто обмежень немає).

Ми використовуємо факт того, що у багатьох прикладних задачах зміна параметрів вектора (y) призводить до зміни характеристик об'єкта, обмеженої певною мірою зміни (y). Цей факт можна інтерпретувати як відображення обмеженої потужності, що породжує зміни. Звісно, існують ситуації, коли відбуваються протилежні явища (ударні впливи, резонансні явища і таке інше), які слід моделювати як розриви характеристик.

Формальною моделлю, яка описує зазначену вище властивість обмеженості змін, для розглянутої задачі з однією характеристикою $\varphi(y)$, може бути, наприклад, така система нерівностей.

$$|\varphi(y') - \varphi(y'')| \leq K_p(y', y''), y', y'' \in D \quad (3.1)$$

де $\rho(y', y'')$ – певна функція відстані в просторі параметрів, а K - задана константа. У випадку коли у (3.1)

$$\rho(y', y'') = (\|y' - y''\|)^{1/N} \quad (3.2)$$

Де функція $\|*\|$ відповідає евклідовій метриці, говорять, що функція ρ задовольняє рівномірному умові Гельдера з показником $1/N$ та коефіцієнтом K . При $N=1$ ця умова називається умовою Ліпшиця з константою K . Ми розглянемо саме цей останній випадок.

Отже, нехай функція $\varphi(y)$, $y \in [a, b]$, задовольняє умові Ліпшиця з заданою константою K , тобто:

$$|\varphi(y') - \varphi(y'')| \leq K|y' - y''|, y', y'' \in [a, b] \quad (3.3)$$

Нехай в точках y^1, \dots, y^k були проведені експерименти в інтервалі $[a, b]$. Пронумеруємо точки y^1 за допомогою нижніх індексів в порядку зростання значень координати, тобто:

$$a \leq y_1 < \dots < y_i < \dots < y_k \leq b,$$

і позначимо обчислені в них значення функції як $z_i = \varphi(y)$, $1 \leq i \leq k$. Мал. 1.4 ілюструє сказане. Введемо функції

$$\varphi_i(y) = z_i - K|y - y_i|, y \in D, 1 \leq i \leq k,$$

для яких згідно з (3.3) має силу таке:

$$\varphi(y) \geq \varphi_i(y), y \in D, 1 \leq i \leq k$$

або

$$\varphi(y) \geq \varphi(y) = \max \{ \varphi_i(y): 1 \leq i \leq k \}, y \in D$$

Отже, результати експериментів і умова (3.3) дозволяють побудувати *мінорату* $\varphi(y)$ з (3.5) мінімізованої функції $\varphi(y)$ в області пошуку. При цьому для шуканого мінімального значення $\varphi(y^*)$ має місце оцінка.

$$\varphi_k^\circ \leq \varphi(y^*) \leq \varphi_k^*$$

де

$$\varphi_k^\circ = \min \{ \varphi(y) : y \in D \},$$

$$\varphi_k^* = \min \{ z_i : 1 \leq i \leq k \},$$

Верхній оцінці φ_k^* відповідає точка Y_k^* , якій вона досягається, тобто т. е. $\varphi_k^* = \varphi(Y_k^*)$. Нижню оцінку φ_k° можна обчислити досить просто. Якщо позначити

$$\varphi_{ki}^\circ = \min \{ \varphi(y) : y \in [y_{i-1}, y_i] \}, 1 \leq i \leq k + 1,$$

Де $y_0 = a$ и $y_{k+1} = b$, згідно з (3.7)

$$\varphi_k^\circ = \varphi_{ki}^\circ = \min \{ \varphi_{ki}^\circ : 1 \leq i \leq k + 1 \}, (3.9)$$

Слідом за цим, завдяки (3.4), (3.5), и (3.8)

$$\varphi_{ki}^\circ = (z_i + z_{i-1} - K_{\Delta i})/2, 1 \leq i \leq k, (3.10)$$

$$\varphi_{ki}^\circ = z_i - K_{\Delta i}, \varphi_{k+1}^\circ = z_k - K_{\Delta k+1}, (3.11)$$

Где $\Delta_i = y_i - y_{i-1}, 1 \leq i \leq k + 1$.

2.16.1.Метод перебору

З (3.8), а також (3.10), (3.11) випливає

$$\delta_i = \min (z_{i-1}, z_i) - \varphi_{ki}^\circ \leq K_{\Delta i}/2, 1 \leq i \leq k, (3.12)$$

$$\delta_1 = z_1 - \varphi_{k1}^\circ = K_{\Delta 1}, \delta_{k+1} = z_k - \varphi_{k+1}^\circ = K_{\Delta k+1}$$

Оскільки при цьому

$$\varphi_k^* - \varphi_k^\circ \leq \min \{ \delta_i : 1 \leq i \leq k + 1 \}$$

Це рівномірне розташування точок випробувань $y_i, 1 \leq i \leq k$, при якому $\Delta_i = 2\delta/K, 1 \leq i \leq k, \Delta_i = \Delta_{k+1} = \delta/K$, забезпечує оцінку (3.6) з точністю δ , оскільки, згідно з (3.12) – (3.13)

$$\varphi_k^* - \varphi_k^\circ \leq \delta. (3.14)$$

Такий метод пошуку оптимального рішення називається *методом перебору на рівномірній сітці*.

2.16.2. Перебір на нерівномірній сітці

Для отримання оцінки (3.14) методом перебору необхідно виконати $k = K(b-a)/2\delta$ експериментів. Цю оцінку можна досягти при значно меншій кількості експериментів, якщо врахувати, що шукане рішення y^* може належати лише множині.

$$D_k = \{ y \in D : \varphi(y) \leq \varphi_k^* \}. \quad (3.15)$$

(на рис. 25 відповідна множина D_k позначена штриховкою). Отже, можна виконати перебір на грубій сітці, яка відповідає точності $\delta' > \delta$ і вимагає невеликої кількості експериментів k' . На наступному етапі пошук перебором виконується лише в підмножині D_k з більшою точністю $\delta'' > \delta'$ і так далі (до досягнення необхідної точності δ). Збільшуючи кількість етапів і зменшуючи кількість експериментів на кожному етапі, можна побудувати повністю послідовний метод, в якому на кожному етапі виконується рівно один експеримент.

Один із таких методів, що послідовно генерують *нерівномірну сітку*, полягає в тому, що кожна наступна $k + 1$ -ша ітерація (наступний експеримент) виконується в точці

$$y^{k+1} = (y_t + y_{t-1})/2 - (z_t + z_{t-1})/2K,$$

Де досягається мінімум міноранти $\varphi(y)$, тобто досягається нижня оцінка φ_k^* з (3.7), (3.9). Цей варіант був запропонований у роботі: *Пиявський С.А.* Обґрунтованість проведення наступного експерименту в точці мінімуму міноранти φ можна (неформально) пояснити тим, що отримання малого значення мінімізованої функції φ в цій точці призведе до покращення верхньої оцінки ($\varphi_{k+1}^* > \varphi_k^*$), а отримання великого значення – до покращення нижньої оцінки ($\varphi_{k+1}^* > \varphi_k^*$), якщо остання досягалася в єдиній точці. При цьому кожен

експеримент поліпшує оцінку (3.6). Як початкові точки для експериментів можна взяти, наприклад,

$$y^1 = a, y^2 = b.$$

2.16.3. Оцінка константи і стохастична модель

Попередні роздуми базувалися на припущенні, що константа (K) у умовах (3.1) або (3.3) є заданою. Груба верхня оцінка, яку можна отримати в прикладних задачах, веде, як видно з (3.14), до необхідності використання істотно більш щільних мереж (рівномірних або нерівномірних), вузли яких використовуються для експериментів. З недооцінкою значення константи, нерівності (3.3) та вся схема оцінки оптимуму, побудована на їх основі, втрачають достовірність.

Можливий вихід полягає в наступному [4]. Замість умови (3.3), яка передбачає надійну обмеженість різниць функції, вводиться припущення, згідно з яким різниці $\varphi(y') - \varphi(y'')$ інтерпретуються як випадкові величини з абсолютним значенням математичного очікуваного значення, рівним $L/|y' - y''|$, якщо точка мінімуму y^* не лежить між точками y', y'' . У цьому випадку можна будувати поточні оцінки невідомої константи L на підставі результатів проведених експериментів, тобто на основі спостережуваних значень відносних різниць функції.

Такий підхід необхідно призводить до того, що оцінки шуканого оптимуму на підставі результатів експериментів також мають стохастичний характер. При цьому можна вводити як оцінки за допомогою ймовірнісних розподілів, так і точні оцінки, наприклад, *оцінки максимальної правдоподібності* для точки глобального мінімуму, що дозволяє побудувати послідовний метод пошуку, згідно з яким кожний наступний експеримент проводиться в поточній точці максимальної правдоподібності.

2.16.4. Алгоритм максимальної правдоподібності

Перший експеримент проводиться в довільній точці $y^1 \in (a, b)$. Точка будь-якого наступного $k + 1$ -го експерименту визначається виразом

$$y^{k+1} = \frac{y_t + y_{t-1}}{2} - \begin{cases} \frac{z_t - z_{t-1}}{2r\mu}, & 1 < t \leq k, \\ 0, & t = 1, t = k + 1 \end{cases} \quad (3.16)$$

При цьому номер t визначається з умови

$$R(t) = \max \{R(i): 1 \leq i \leq k + 1\}, \quad (3.17)$$

Де з $1 < i \leq k$

$$R(i) = \Delta_i + (z_i - z_{i-1})^2 / \mu^2 \Delta_i - 2(z_i + z_{i-1}) / r\mu, \quad (3.18)$$

$$R(1) = 2\Delta_1 - 4z_1 / r\mu, \quad R(k + 1) = 2\Delta_{k+1} - 4z_k / r\mu, \quad (3.19)$$

$$\mu = \max \{|z_i - z_{i-1}| / \Delta_i : 1 < i \leq k\}. \quad (3.20)$$

У випадку, коли вираз (3.20) дорівнює нулю, а також при $k = 1$, (3.18), (3.19) є параметром методу і має виконуватися нерівність $r > 1$.

Діаграма на рис. 26 ілюструє процес розв'язання конкретного прикладу за допомогою описаного методу (з $r = 1,4$). Вертикальні штрихи, розташовані під віссю абсцис, вказують на точки перших 42 експериментів, які створюють суттєво нерівномірну мережу, яка стискається навколо глобального мінімуму. Дуги нижньої ламаної лінії послідовно (зверху вниз) з'єднують точки (позначені темними кружечками), які відповідають парам (y^k, k) , $(y^{k+1}, k + 1)$, де y^k - це координата, а k - номер ітерації.

2.16.5. Умови збіжності

Метод (3.16) - (3.20), як вже зазначалося, послідовно виконує ітерації в точках, які найбільше ймовірно містять глобальний мінімум, оцінюючи їхнє розташування за допомогою відповідної інтерпретації результатів експериментів у межах певної стохастичної моделі. Проте правила (3.16) - (3.20) вибору ітерацій

можна досліджувати і поза вихідними припущеннями. Якщо цей алгоритм використовується для мінімізації ліпшицевої

(з константою K) функції φ , то для будь-якої граничної точки y' , породженої послідовністю $\{y^k\}$, справедливо [4]:

- 1) Точка y' вважається принаймні локально-оптимальною, якщо ця функція φ має обмежену кількість локальних мінімумів;
- 2) Якщо існує інша гранична точка y'' послідовності $\{y_k\}$, то $\varphi(y'') = \varphi(y')$, що означає, що неможлива одночасна збіжність до різних значень функції, і, отже, метод створює нерівномірну мережу при мінімізації функцій, відмінних від константи;
- 3) $z^k = \varphi(y^k) \geq \varphi(y^t)$, $k=1, 2, \dots$, тобто алгоритм не може збігатися до точок, в яких значення функції перевищує результат будь-якого проведеного експерименту;
- 4) Якщо на певному етапі виконується умова

$$r\mu > 2K, (3.21),$$

то y' є точкою глобального мінімуму функції φ і, більше того, множина всіх граничних точок послідовності $\{y^k\}$ збігається з множиною точок глобального мінімуму функції φ .

Важливо відзначити, що цей алгоритм, який не вимагає апріорного задання константи Ліпшиця, виявився ефективним при розв'язанні багатьох конкретних прикладних задач.

2.16.6. Вплив розмірності

Розглянута схема оцінки глобального оптимума на основі результатів випробувань та апріорного припущення (3.1), яке характеризує обмеженість різниць значень мінімізованої функції певною мірою різниць відповідних значень аргументу, залишається правдивою в багатовимірних задачах, тобто при $N > 1$. Однак обчислювальна складність оцінки суттєво зростає.

2.16.7. Експоненційний ріст складності перебору

Припустимо, що мінімізована функція φ задовольняє умові Ліпшица (з константою K) в припустимій області $Q = D$ з (1.4). Аналогічно до (3.4), введемо сім'ю мінорант φ_i , тобто.

$$\varphi(y) > \varphi_i(y) = z^i - K|y - y'|, y \in D, 1 \leq i \leq k, (4.1)$$

Де через y' и $z^i = \varphi(y')$ позначені відповідно точки і результати випробувань. З (4.1) випливає, що в замкнутому s -околі $U(y')$ точки y' мають місце оцінка

$$z^i - \min |\varphi(y) : y \in D \cap U(y')| \leq \delta,$$

Якщо $s = \delta/K$. Вибравши точки випробувань так, щоб вони утворювали s -мережу в області D , отримаємо оцінку шуканого рішення

$$\varphi_k^* - \varphi(y^*) \leq \delta, (4.2)$$

Де

$$\varphi_k^* = \min \{z^i : 1 \leq i \leq k\}, (4.3)$$

так як для точки розв'язку y^* і покриття області D околами $U(y')$, має місце те, що

$$\varphi(y^*) = \min (\min |\varphi(y) : y \in D \cap U(y')|), 1 \leq i \leq k$$

Рівномірна s -мережа в багатовимірній області D з рівняння (1.4) може бути ефективно побудована різними способами. При цьому загальна кількість вузлів такої рівномірної мережі перевищує $(b_1 - a_1, \dots, b_x - a_x) / s^N$, тобто зростає експоненційно зі збільшенням розмірності N

2.16.8. Складність послідовної побудови нерівномірних сіток

Подібно до одновимірного випадку, можна скоротити кількість вимірювань, необхідних для отримання оцінки (4.2) за допомогою методу перебору, якщо спочатку здійснити пошук з низькою точністю на грубій сітці,

що містить k вузлів, і на основі результатів вимірювань створити множину D_t з (3.15), де $\varphi(y)$ є верхньою огибаючою (3.5) міноранти φ_i з (4.1) та φ_k^* з (4.3). Множина D_t повинна включати рішення y^* , і подальший пошук (з великою точністю) слід здійснити в цій множині і так далі.

У випадку $N = 1$ множина (3.15) представляє собою набір відрізків на вісі дійсних чисел (див. штриховку на рис. 25). У випадку $N > 1$ конструкція цієї множини суттєво ускладнюється. Для ілюстрації ускладнень розглянемо конкретний приклад для випадку $N = 2$ та $k = 4$, який зображено на рис. 27, де в прямокутній області D позначені (чорними колами) чотири точки вимірювань та вказані значення мінімізованої функції в цих точках, а також наведені лінії рівновеликої міноранти $\varphi(y)$. Виділено накреслення неконтурної області D_k (штриховка).

Складність визначення області D_k , в яку повинна входити рівномірна мережа, що відповідає вищій точності, знімається, якщо перейти до схеми повністю послідовного пошуку, коли на кожному $k + 1$ -му кроці в відповідній області D_k виконується рівно один вимірювання, як це вже обговорювалося для випадку одного виміру. При цьому як точку y^{k+1} наступного вимірювання, що покращує оцінку (3.6), можна, наприклад, використовувати точку, в якій мінората $\varphi(y)$ досягає абсолютного мінімуму (3.7). Зазначена точка, звісно, належить області D_k , але її можна визначити шляхом мінімізації φ в більш простій області D .

У одновимірному випадку відповідно до (3.8) – (3.11) мінімізація φ виконується досить просто і сводиться до вибору мінімального з $k + 1$ значень (3.9), кожне з яких є мінімальним значенням (3.8) міноранти φ в відповідному підінтервалі $[y_{i-1}, y_i]$, $1 \leq i \leq k + 1$. Ця простота впливає з того, що при $N = 1$ кожна точка вимірювання y_i входить не більше, ніж в два підінтервали $[y_{i-1}, y_i]$, $[y_{i+1}, y_i]$, і мінімальне значення φ в кожному такому підінтервалі не

залежить від результатів вимірювань в інших підінтервалах (і може бути знайдено аналітично як функція координат кінцевих точок підінтервалу та значень мінімізованої функції в цих кінцевих точках). При $N > 1$ зв'язок між результатами вимірювань і точкою мінімуму міноранти

$$y^{k+1} = \arg \min \{ \varphi(y; y^1, \dots, y^k; z^1, \dots, z^k): y \in D \} \quad (4.4)$$

Багатовимірна функція φ є суттєвою умовною (точки локальних мінімумів, відповідно до прикладу, наведеному на рис. 1.6, позначені великими темними колами).

Фактично, правило (4.4) вибору точки наступного вимірювання само по собі включає задачу мінімізації, аналогічну вихідній задачі (1.1). Значення функції φ з (3.5), (4.1) зазвичай обчислюються набагато простіше, ніж значення характеристики об'єкта, яку потрібно мінімізувати φ з (1.1), які отримуються за допомогою аналізу складної математичної моделі цього об'єкта оптимізації. Однак задачу (4.4) доводиться вирішувати на кожній ітерації задачі (1.1). Важливо зауважити, що ця складність залишається незмінною і для підходів, відповідно до яких наступна ітерація проводиться не в точці мінімуму міноранти φ , а в точці максимальної ймовірності або в точці мінімуму очікуваного значення функції φ (обидва ці правила базуються на ймовірнісних аналогах моделі (3.1), схожої до моделі для випадку $N = 1$, яку обговорювалося вище), або за допомогою іншого правила, що забезпечує послідовне поліпшення оцінок (3.6) на кожному (або майже на кожному) кроці за рахунок виконання ітерацій в точці (4.4), яка забезпечує екстремум деякій поточній оцінці φ шуканого рішення.

Висновки до розділу 3

У цій роботі були представлені ключові особливості алгоритмів оптимізації чотирьохвимірної траєкторії (4DT), які впроваджено в системах CNS/ATM та Avionic (CNS+A), які на даний момент досліджуються, а саме в системі земельного планування, узгодження та валідації чотирьохвимірної траєкторії та бортовій системі наступного покоління для управління польотом

(NG-FMS) [5]. Представлено та обговорено припущену конвенцію часового рамцю для атмосферної діяльності, яка відбувається в режимі офлайн та онлайн, та подано загальну схему алгоритму багатоцільової оптимізації. Описано загальний вираз для функцій витрат, пов'язаних з об'ємами штрафу. Цей вираз використовується з відповідними формами Моделі Повітряного Простору (ASM), Моделі Утворення Конденсаційних Слідів (CTM), Моделі Погодного Стану (WSM) та Моделі Викидів Шуму (NEM). Майбутні публікації будуть присвячені детальному вивченню рівнянь стану, пов'язаних із моделями екологічної та економічної продуктивності. Проведено симуляцію найгірших сценаріїв для цілей валідації. Запропоновані системи 4-PNV/NG-FMS здатні відповідати вимогам до обчислювальної продуктивності в реальному часі для тактичного онлайн перерозподілу маршрутів. Майбутні дослідження визначать продуктивність генерації та виконання намірів 4DT NG-FMS в розстроєних умовах на основі різних навігаційних архітектур та в поєднанні зі стратегіями збільшення надійності на основі авіоніки [57, 58]. Нові техніки датчиків для забруднювачів, пов'язаних з авіацією, та атмосферного граничного шару/турбуленції від пухлини, які на даний момент досліджуються, нададуть цінну інформацію для динамічної оптимізації повітряного руху [, 60].

Розділ 4. АВТОМАТИЧНЕ УЗГОДЖЕННЯ НАМІРІВ І СИСТЕМА ПЕРЕВІРКИ ДЛЯ 4-DIMENSIONAL ОПЕРАЦІЇ НА ОСНОВІ ТРАЄКТОРІЇ

4.1.4-Dimensional Trajectory

Операційні переваги, які надаються підвищеною продуктивністю нових технологій навігації, можуть бути повністю використані лише через операційне впровадження систем управління повітряним рухом наступного покоління для зв'язку, навігації та служби контролю (CNS/ATM). Покращення в виділенні динамічних ресурсів повітряного простору можливе лише за умови впровадження дескрипторів чотирьохвимірної траєкторії (4DT) в контексті операцій на основі намірів (IBO). 4DT-IBO, в свою чергу, потребує переходу від традиційного голосового зв'язку до функцій переговорів та валідації, заснованих на даних. 4DT-IBO дозволить повністю реалізувати потенціал глобальних навігаційних супутникових систем (GNSS) як основного засобу повітряної навігації в майбутньому контексті CNS/ATM. В рамках проекту ENDEAVOUR Університету Кренфілд розробляється нова система планування, переговорів та валідації 4DT (4-PNV) для інтеграції в область CNS/ATM наступного покоління. Система 4-PNV надає можливості переговорів та валідації 4DT для Наступного Покоління ATM, у поєднанні з системами Наступного Покоління систем управління польотом (NG-FMS), які також досліджуються в Університеті Кренфілд. NG-FMS генерує глобально оптимальні траєкторії на основі вагових коефіцієнтів середовищевої та експлуатаційної продуктивності, відповідаючи спільним цілям програм SESAR та Clean Sky. Система 4-PNV отримує кілька варіантів намірів 4DT від кожного обладнаного системою NG-FMS літака. Надання декількох варіантів траєкторій скорочує час переговорів та зменшує потребу в обчисленні оптимальних траєкторій дистанційно контролем ATM. Система валідації, через переговори в реальному часі з літаками, перевіряє наміри траєкторій та вирішує конфлікти повітряного руху, використовуючи

відповідні критерії розділення та уникнення, тим самим встановлюючи оптимальні та безпечні траєкторії для кожного літака.

Оптимізаційна платформа для формування екологічних траєкторій літаків в умовах обмежень системи ATM (GATAC), спільно розроблена Університетом Кренфілд та партнерами з Clean Sky SGO, відіграла ключову роль у створенні та оцінці системи 4-PNV.

Процеси переговорів та валідації, а також їх інтеграція з NG-FMS, були моделювані та оцінені в різноманітних реалістичних операційних сценаріях. Літаки постійно отримували відповідні обмеження щодо використання повітряного простору та вагові коефіцієнти для оптимізації у відповідний час. Для визначення оптимального розподілу часових інтервалів на точці злиття використовувався алгоритм послідовності прибуття (точкове злиття).

У процесі валідації використовувалася модель на основі правил, яка включала справедливі евристичні принципи. Модель проводила порівняння всіх намірів 4DT попарно. У цьому контексті були представлені випадкові симуляції для концепції валідації 4-PNV, а також проведені реалістичні операційні сценарії для тестування математичних моделей.

Випробувані сценарії базувалися на інтенсивному повітряному русі та складних обмеженнях в повітряному просторі, які є характерними для регіону Європи. Отримані результати відповідають 10-хвилинному часовому інтервалу, що відповідає типовим онлайн-завданням тактичного маршрутування / перерозподілу, і підтверджують можливість використання підходу ENDEAVOUR у практичних умовах в реальному часі.

Операційні стратегії управління повітряним рухом наступного покоління (NG-ATM) формуються в рамках двох ключових дослідницьких програм: Єдиного європейського повітряного простору для досліджень управління повітряним рухом (SESAR) і програми наступного покоління системи повітряного транспорту Сполучених Штатів (NextGen). На сьогодні ці програми

є визначальними визначниками майбутньої системи повітряного транспорту як в Європі, так і в Сполучених Штатах.

Університет Кренфілд відіграє ключову роль у дослідницькій програмі Clean Sky Systems for Green Operations – Integrated Technology Demonstrator (SGO-ITD) і вже досяг значних результатів у сфері оптимізації траєкторій для екологічно стійкої авіації. Оптимізаційна платформа GATAC, розроблена спільно з європейськими дослідницькими партнерами, представляє собою комплексний і гнучкий інструмент для глобальної оптимізації траєкторій. Вона підтримує будь-які поточні і можливі майбутні критерії і моделі в універсальній та зручній модульній архітектурі. Ці результати досліджень Clean Sky передбачається використовувати в майбутній системі повітряного транспорту.

Програма SESAR має ряд стратегічних цілей, які співпадають з завданнями Clean Sky SGO-ITD, включаючи підвищення пропускної здатності повітряного простору, ефективності, безпеки та екологічної стійкості. SESAR спрямована на розвиток автоматизованої та інтегрованої системи АТМ, що співпрацює для забезпечення більш гнучкого управління ресурсами повітряного простору, як показано на Рис. 28.



Рис.25. Комбіновані цілі SESAR і Clean Sky (адаптовано з [61])

Це включатиме передачу різних функцій та послуг Управління повітряним рухом (АТМ) іншим ключовим учасникам, таким як Центри операцій авіакомпаній (АОС) та екіпажі польотів, з метою підвищення загальної ефективності системи.

Ефективність та результативність запропонованих стратегій NG-АТМ в значній мірі залежать від характеру обміну інформацією та основних операційних та технологічних основ системи. На жаль, внутрішня динамічна природа різних моделей, які підтримують операції АТМ, ще не повністю враховується. У багатьох існуючих системах інформація розглядається як статична протягом певних періодів часу, детерміністично, до надходження наступного оновлення. Неспроможність ефективно обробляти динамічну природу та невизначеність в режимі реального часу призводить до загальних неефективностей системи. Для подолання цих неефективностей система розвивається в напрямку операцій на основі намірів/траєкторій (ІВО/ТВО), орієнтованих на результати, на всіх етапах польоту. Тому вкрай важливо впровадити концепцію 4DT через розробку та впровадження наземних і повітряних систем, які надають такі можливості:

- Постійну синхронізацію траєкторій та стану, так щоб час став динамічно управляємим ресурсом.
- Підвищення переходу від традиційного голосового зв'язку до операцій на підставі даних.
- Вбудовану підтримку об'єктів, пов'язаних із навколишнім середовищем, в автоматизованих системах з метою зменшення впливу на навколишнє середовище при мінімізації загальних витрат на польот.
- Підвищену здатність використовувати концепцію Спільного прийняття рішень (СDM) серед всіх учасників, використовуючи точну інформацію, отриману від повітряних систем.
- Зміна ролі наземного АТМ від орієнтованих на команду та управління одиниць до високоавтоматизованого приймача рішень в

інтероперабельному середовищі, на основі траєкторій, обраних користувачем (намірами).

Досягнення цих цілей базується на нових системах Зв'язку, Навігації і Слідкування (CNS), які дозволяють мережеві операції, забезпечують точну повітряну навігацію та оптимізують відстань між повітряними суднами для максимального використання повітряного простору і аеропортової місткості. Ці нові технології будуть інтегровані в гармонізовані та взаємодійські повітряні та наземні операційні та технічні архітектури, які відповідатимуть потребам всіх регіонів Європи.

Щодо робочого навантаження контролерів, стратегічний документ SESAR D3 вказує, що обмежувальним фактором для NG-ATM є робоче навантаження контролерів [62]. Політ за задалегідь визначеним маршрутом давно вважається безпечним, оскільки це зменшує робоче навантаження контролера. Контрольні комунікації з повітряними суднами переважно здійснюються за допомогою радіотелефонії. Взаєморозуміння інструкцій має велике значення, і повідомлення повинні бути короткими і однозначними. Ерцбергер [63] пропонує, що звільнення контролера від робочого навантаження підвищить місткість повітряного простору. Це можна досягти шляхом автоматизації тактичного контролю за моніторингом та управлінням розділенням повітряного простору. Після цього можна буде послабити обмеження місткості, пов'язані з робочим навантаженням. Фактори, які впливають на робоче навантаження контролера в даний час, наведено на Рис. 26.

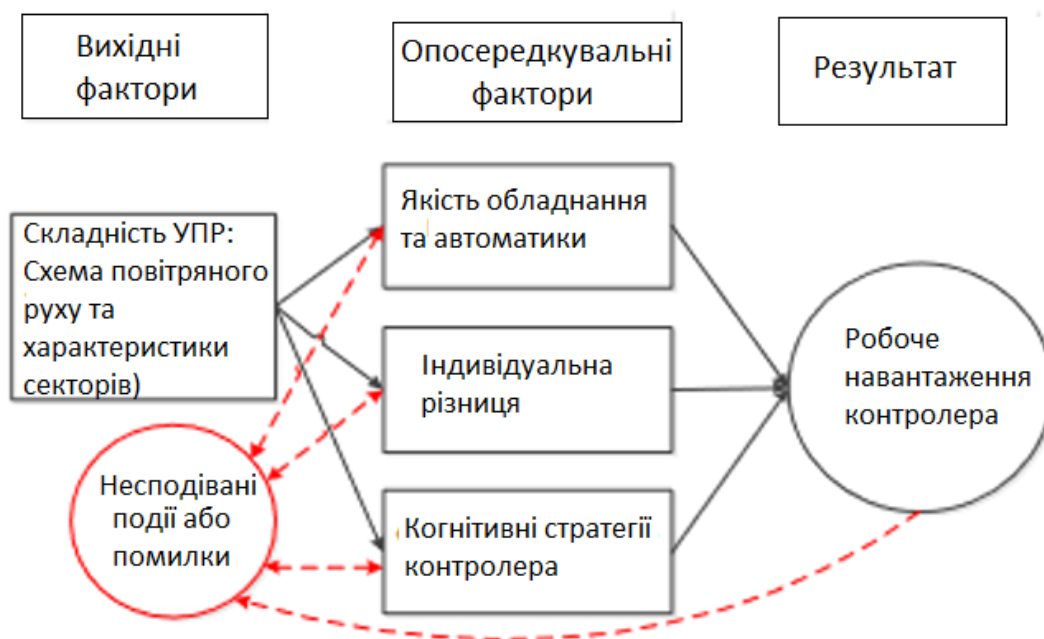


Рис.26. Фактори, що впливають на робоче навантаження контролера

Зі зростанням рівня автоматизації, ролі пілота і контролера повітряного руху постійно еволюціонують. Контролери та пілоти все більше приймають рішення більш високого рівня, базуючись на відповідному нагляді. Проте політика Міжнародної організації цивільної авіації (МОУАКА) щодо автоматизації, спрямованої на людину, в межах CNS/ATM, визначає, що кінцева відповідальність за траєкторію польоту повітряного судна все ще залишається за пілотом, і безпечний розділ повітряного простору пов'язаний з АТС [64]. SESAR прагне до високоавтоматизованої, але не автономної системи [65]. Використання інструментів підтримки прийняття рішень (DST) з ефективними візуальними відображеннями буде ключовим для збереження обстановкової обізнаності при зменшенні участі людей у кожному процесі [66,67]. Самостійне розділення не завжди призводить до сприйнятого зменшення робочого навантаження контролера [68]. Машина відмінно впорається з рутинними і чітко визначеними завданнями та є точними при виконанні багатьох завдань одночасно [70]. Рутинні завдання, такі як передбачення конфліктів у повітряному русі, повинні бути автоматизовані. Комп'ютери є більш послідовними, мають зменшений час реакції і підвищену точність [71]. Люди відзначаються здатністю робити

висновки на основі індуктивного мислення, що робить їх більш ефективними при прийнятті рішень вищого рівня [70]. Контролер буде задіяний лише в ситуаціях, коли система не може вирішити ситуацію на основі програмних процедур [72]. Проектування автоматизованої системи повинно забезпечити збереження обстановкової обізнаності контролера і мати надійні резервні варіанти. Важливо, щоб контролер мав когнітивне уявлення про тривимірну траєкторію повітряного руху. SESAR Release 2012[65] передбачає амбіційні цілі щодо поліпшення умов праці контролера, включаючи автоматизацію та розширення традиційних завдань контролера. Автоматизація охоплює допомогу при маршрутизації на рульовій доріжці, оптимізацію розкладу та обмін даними. Завдання буде делеговано більшій кількості учасників повітряного простору, які надають допомогу в управлінні розділенням, прийнятті рішень щодо управління потоками та пропонування альтернативних маршрутів [73].

В. Огляд основ управління та оптимізації потоку повітряного руху у майбутній європейській системі динамічного управління потоком повітряного руху (ATFM) подано на Рис. 30.



Рис.27. Огляд майбутньої європейської динамічної Air Traffic Flow Management

У рамках динамічної системи управління потоком повітряного руху (ATFM) функціонує кілька процесів, які виконуються в режимі онлайн. Ці процеси включають в себе керування потужністю для організації руху між повітряними секторами, а також планування, упорядкування та об'єднання конкретних рейсів.

4.2. Концепція проекту 4- Planning, Negotiation and Validation

Система 4-PNV дозволяє планувати, обмінюватися даними та узгоджувати / валідувати інформацію в реальному часі з системами наступного покоління управління повітряним рухом (NG-FMS), які також були розроблені. NG-FMS створює глобально оптимальні траєкторії, враховуючи вагові показники продуктивності, які узгоджуються між службами навігації повітряним рухом (ANSP) та центрами авіаційної діяльності (АОС), відповідно до цілей SESAR та

Clean Sky. Траєкторії передаються на землю через мережу передачі даних повітря-земля наступного покоління (NG-ADL). Інноваційна система 4-PNV отримує кілька варіантів траєкторій 4DT від кожного обладнаного системою NG-FMS літального апарату. Подання декількох варіантів траєкторій скорочує час узгодження та зменшує необхідність в дистанційному розрахунку оптимальних траєкторій системою управління повітряним рухом. Як тільки оптимальні траєкторії без конфліктів визначені, система 4-PNV видає наказ кожному літаку летіти за підтвердженими траєкторіями, і літаки надсилають підтвердження на землю, як це показано на Рис. 31.

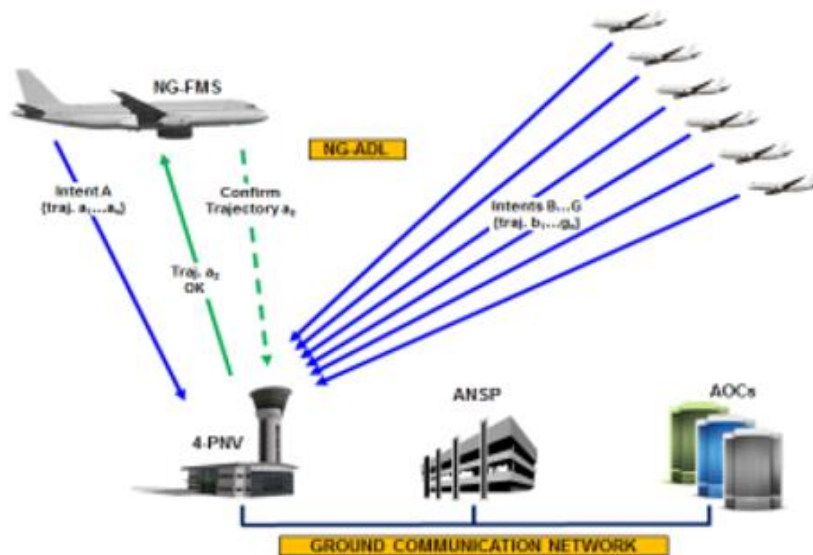


Рис.28. Концепція операцій 4- Planning, Negotiation and Validation (1)

Коли система NG-FMS не може визначити оптимальні траєкторії згідно зі своїми попередніми вимогами, система 4-PNV виявляє це інформуючи систему NG-FMS на борту. На основі вагових коефіцієнтів продуктивності, які згодом узгоджуються між центрами авіаційної діяльності (AOCs) та службами навігації повітряним рухом (ANSPs), система 4-PNV розраховує новий набір оптимальних траєкторій (наміри AOCs/ANSP) і передає їх на літальний апарат. Потім система NG-FMS на борту літака визначає вибрану траєкторію і надсилає підтвердження на землю, як показано на малюнку 5. Це також може статися, коли новий цикл

узгодження ініціюється системою 4-PNV, наприклад, у випадку конфліктів в повітряному русі або введення прямих даних від ANSP/AOCs.

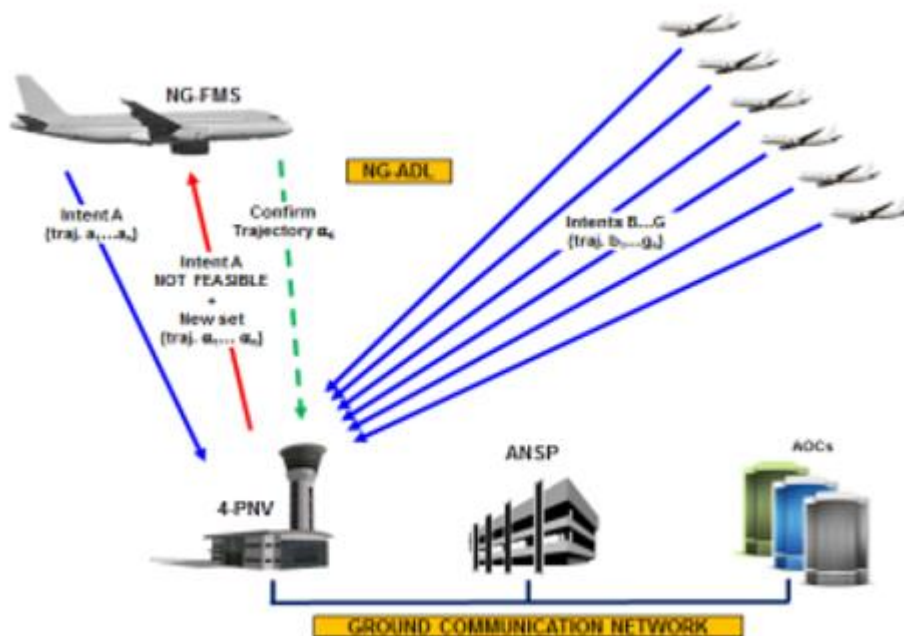


Рис.29. Концепція операцій 4- Planning, Negotiation and Validation (2)

Для досягнення цілей SESAR/NextGen і відповідення критеріям Clean Sky використовується метод онлайн-оптимізації управління потоком повітряного руху. Цей метод включає в себе оптимізацію густозаселених повітряних просторів, перенаправлення і перепланування в реальному часі. Цього досягається шляхом обміну обмеженнями повітряного простору, обмеженнями маршрутів і загальними критеріями оптимізації з NG-FMS, який генерує наміри, складаються з кількох оптимальних траєкторій (з урахуванням пріоритетів). Загальне прийняття рішень 4DT покращується завдяки використанню автоматизованих схем узгодження. Збільшена автоматизація, зокрема, дозволяє більшій кількості літаків летіти оптимальними траєкторіями, обмежуючи втручання оператора контролю повітряного руху (АТСО) на високому рівні і в екстрених ситуаціях. Збільшена гнучкість повітряного простору дозволяє використовувати більш екологічні та ефективні профілі польотів. Це покращення

процесу прийняття рішень призводить до підвищення ефективності та безпеки операцій.

А. Вимоги до моделі 4-PNV для "одноразового" узгодження змін у плані польоту повинні відповідати наступним вимогам:

- 1) Система повинна створювати безпечну траєкторію без конфліктів для всіх повітряних суден і не дозволяти їм перевищувати регуляторні пороги щодо відстаней між ними.
- 2) Система повинна мати високу швидкість обчислення, менше ніж 10 хвилин від моменту виявлення необхідності зміни плану польоту до видання зазначеної безконфліктної траєкторії.
- 3) Система повинна бути здатна працювати з декількома повітряними суднами в супер щільному повітряному просторі, покращуючи можливості людей-контролерів. Процес підтвердження не повинен бути обмежуючим фактором для місткості повітряного простору.
- 4) Система повинна покращувати оптимальність повітряного руху з точки зору виконання глобальних цілей щодо повітряного простору від SESAR і Clean Sky.

В. Терміни онлайн-операцій управління повітряним рухом

На стратегічному та тактичному рівнях було проведено аналіз проблем управління повітряним рухом з метою встановлення верхньорівневих операційних і технічних вимог до системи 4-PNV для її належної інтеграції з NG-FMS. Останні дослідження та результати, що стосуються оптимізації 4DT в рамках Clean Sky, використовуються з метою використання їхнього потенціалу для досягнення користі в рамках SESAR. Розглядаються різні оптимальні алгоритми для операцій 4-PNV на стратегічному та тактичному рівнях. Моделі також враховують принципи планування рейсів з урахуванням об'єктивів безпеки. Важливо враховувати питання, такі як синхронізація траєкторій і

синхронізація інформації для забезпечення безпечного та своєчасного керівництва повітряним рухом в контексті 4DT IBO. Зокрема, бортові авіонічні системи та земельні системи АТМ використовують моделі прогнозування / оцінювання спільних траєкторій, щоб визначити та впровадити послідовне математичне рішення. Це досягається шляхом визначення спільних дескрипторів і обмежень для повітряних судів, які обмінюються між літаками та землею. Згідно з Барн'є та Альїньолем [81], були розглянуті наступні часові горизонти для онлайн-процесів динамічного АТМ:

- Стратегічне онлайн-планування (SO): Планування заздалегідь на 20 хвилин або більше. Центральна управлінська одиниця потоком (CFMU) розраховує та оновлює прогнози потоку для регіональних одиниць АСС, які відповідають за земельні затримки та повітряні перенаправлення при необхідності. Зміни до плану польоту зазвичай ініціюються системою 4-PNV.

- Тактичне онлайн-планування (TO): Планування в реальному часі від 20 до 10 хвилин уперед. Зміни до плану польоту можуть бути ініційовані літаком або системою 4-PNV. Пілот літака має доступ до інформації про найближчі умови повітряного простору від системи сенсорів літака, тому він є найкраще розташованим для планування перенаправлення.

- Надзвичайна ситуація: Планування менше ніж на 10 хвилин уперед. Керівництво повітряним рухом надає ручні команди для забезпечення безпечного проходу, а системи безпеки направляють літак в безпечну зону. У надзвичайних ситуаціях пілот може використовувати заздалегідь встановлені процедури для отримання дозволів.

Розроблена система 4-PNV обладнана можливостями для ведення переговорів та підтвердження, які були спеціально адаптовані для використання в стратегічному онлайн-плануванні (планування заздалегідь на 20 хвилин і більше) і тактичному онлайн-плануванні (планування на від 20 до 10 хвилин

уперед), як показано на рисунку 33. У випадках надзвичайних ситуацій (планування менше ніж на 10 хвилин уперед) застосовуються стандартні процедури з безпосередньою участю пілота і/або диспетчера повітряного руху.



Рис.30. Передбачувані часові рамки для операцій УПР в режимі офлайн і онлайн

4.3. Моделі і алгоритми 4- Planning, Negotiation and Validation

У цьому розділі ми представимо моделі та алгоритми, які були розроблені та впроваджені в систему 4-PNV. Всі використані моделі були піддані симуляціям у реалістичних тестових сценаріях, які будуть описані у наступному розділі. Симуляційні випадки охоплювали всі фази польоту та конфігурації повітряного простору. Особлива увага була приділена області маневрування в аеропорту (ТМА). У ТМА, контроль повітряного руху в режимі онлайн часто важливий, оскільки траєкторії підлітання та зниження повітряних суден форсовано перетинаються, що вимагає частого тактичного втручання, і, загалом, обмежена місткість злітно-посадкової смуги призводить до збільшення черги прибуття, навіть коли не має руйнувань. Хоча концепції, такі як 4DT-операції та Continuous Curved Descent Approaches (CCDA), передбачається, що вони

зменшати затор в області ТМА, практичні аспекти впровадження, особливо в контексті ІВО, мали бути оцінені, особливо в контексті ІВО.

А. Модель багатоцільової траєкторії

Система 4-PNV використовує модель багатоцільової траєкторії в реальному часі, яка є аналогічною тій, що реалізована в NG-FMS і описана в Ramasamy et al. [89]. Зокрема, у 4-PNV використовується модель лінійного точкового маси з трьома ступенями свободи (3DOF), яка дозволяє генерувати оптимальні траєкторії на землі. Дескриптори динаміки повітряного судна діляться між NG-FMS та 4-PNV, разом із відповідними станами повітряного судна, для забезпечення належної синхронізації траєкторій.

В. Ваги продуктивності

Генерується родина ваг продуктивності з різними витратами, пов'язаними з кожною продуктивністю. АТМ може змінювати коефіцієнт витрат для можливості генерації різних траєкторій. Глобальний оптимум є пріоритетом 1, зі зменшенням або зміною оптимальності для інших пріоритетів. Приклад чотирьох наборів ваг продуктивності подано в Таблиці 9.

Таблиця 9. Структура наборів вагових коефіцієнтів ефективності

	Час польоту	Спалювання палива	Шум	Перевищення зборів	Кут крену
Пріоритет 1	K_{A1}	K_{B1}	K_{C1}	K_{D1}	K_{E1}
Пріоритет 2	K_{A2}	K_{B2}	K_{C2}	K_{D2}	K_{E2}
Пріоритет 3	K_{A3}	K_{B3}	K_{C3}	K_{D3}	K_{E3}
Пріоритет 4	K_{A4}	K_{B4}	K_{C4}	K_{D4}	K_{E4}

Ця пропозиція спрямована на врахування користувацьких траєкторій та загальних цілей повітряного простору. Найкраще було б знизити загальні витрати для всіх повітряних суден, але це складна задача з численними мінімумами. Тому проблему поділяють і розв'язують спільно. Оптимальні траєкторії визначаються для кожного повітряного судна, і потім застосовується алгоритм на основі правил для знаходження траєкторії без конфліктів для кожного повітряного судна. Після цього це обговорюється та підтверджується системою NG-FMS кожного повітряного судна.

Щодо пункту С. Петлі переговорів про наміри: Для впровадження системи 4-PNV важливим є надійний протокол переговорів та підтвердження. Переговорні петлі можуть бути використані, коли є достатньо часу та гнучкості у повітряному просторі для завершення процесу та відсутні облікові записи про безпеку. Для відповіді на ці вимоги потрібно мати швидкий процес для знаходження безконфліктних траєкторій 4D та їх можливого варіанту. Стандартний протокол переговорів визначений у EUROCONTROL's DOC 97-70-14 [79].

Залежно від доступного часу, можуть використовуватися різні протоколи для ітеративного створення оптимального плану польоту, враховуючи всі обмеження. У всіх випадках в першу чергу розглядається "одноразовий спроба" переговорів. Онлайн-процеси розподілені між різними системами, такими як NG-FMS, центри обслуговування авіаліній (АОС), система управління інформацією всієї системи (SWIM), центри управління потоком повітряного руху (ATFM) та центри управління повітряним рухом (ATCC). До такої інтегрованої архітектури завжди включаються аспекти, такі як надійний та високоємний канал передачі даних, нагляд та моніторинг.

NG-FMS перевіряє можливість досягнення контрольного часу прибуття (СТА) та допусків, враховуючи відомий операційний обгортковий повітряного судна. NG-FMS створює кілька можливих та оптимальних намірів траєкторій

4DT. На землі система 4-PNV аналізує та вибирає найкращу комбінацію намірів серед усіх повітряних суден для досягнення загальних цілей, уникати конфліктних маршрутів. Наміри траєкторій, що включають унікальний ідентифікатор повітряного судна, категорію повітряного судна та часові параметри повітряного судна, передаються. Наміри обробляються відносно 3D-положення, швидкості та часу. Алгоритм 4-PNV гарантує вельми швидкі та надійні обчислення для забезпечення планування в реальному часі. Розроблені петлі переговорів показані на малюнках 7 та 8, які відповідно відображають ініційовані петлі 4-PNV та петлі, ініційовані NG-FMS.

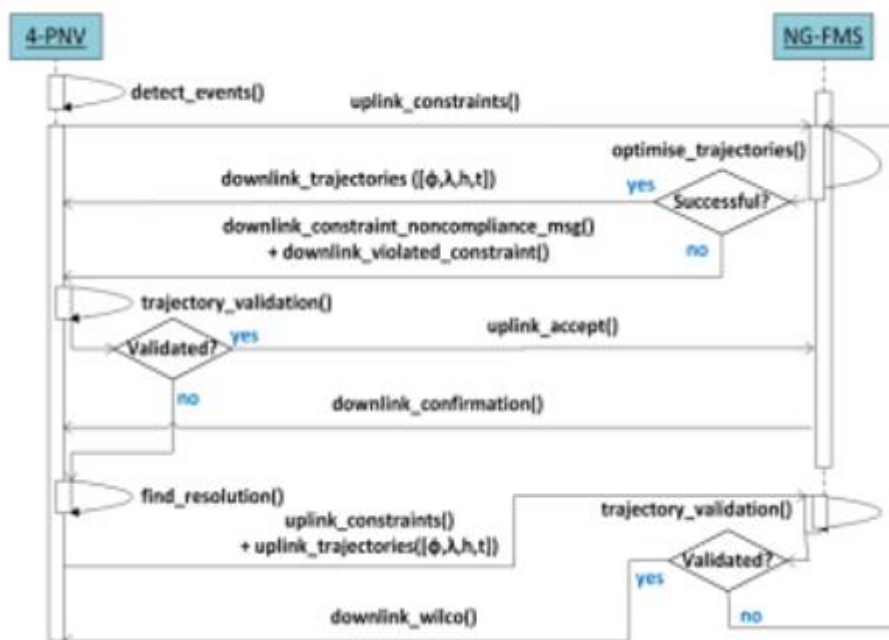


Рис.31. 4- Planning, Negotiation and Validation ініційован цикл узгодження/перевірки

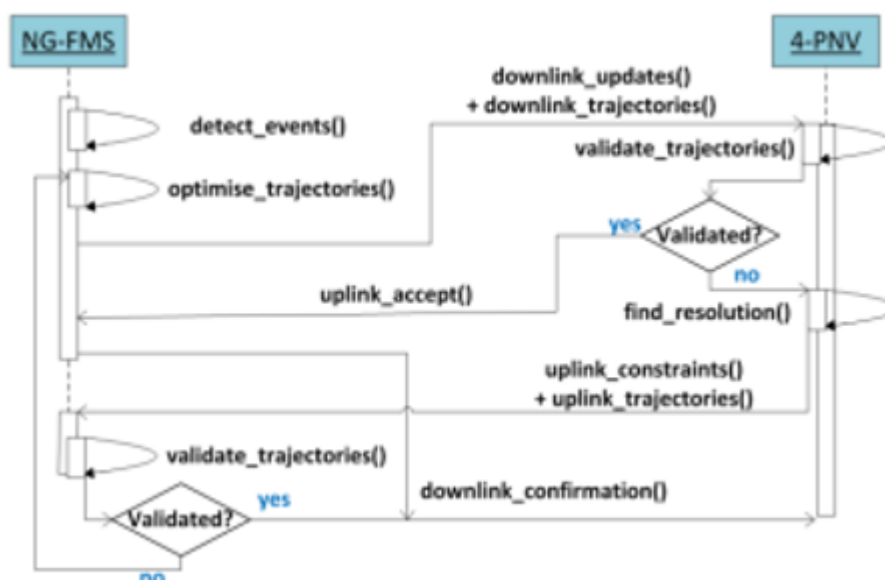


Рис.32. Next Generation of Flight Management Systems ініціював цикл узгодження/перевірки.

Земельна система 4-PNV виступає ключовим учасником у стратегічному онлайн-сценарії, оскільки вона постійно оновлює своє знання про глобальну ситуацію завдяки мережі на землі та власним алгоритмам передбачення траєкторій. Невизначеності, такі як довгостроковий прогноз погоди, закриття аеропортів або насиченість повітряних секторів, змушують 4-PNV ініціювати стратегічні переговори, надсилаючи нові обмеження на NG-FMS, які потім використовуються для оптимізації траєкторій та для переговорів і підтвердження на борту повітряного судна.

У іншому випадку, 4-PNV може розраховувати оптимальні траєкторії для AOCs/ANPS та надсилати їх для підтвердження повітряним судном. Якщо після оцінки на борту виявляються порушення продуктивності або обмежень (наприклад, недостатньо пального), повітряне судно відправляє повідомлення про відмову разом з новим наміром на перевірку 4-PNV.

У стратегічних онлайн-сценаріях можуть бути допущені множинні петлі переговорів, але завдяки існуванню багатьох намірів траєкторій також знижуються вимоги до пропускнуої здатності каналу передачі даних. Якщо з якихось причин нові введені обмеження не можуть бути виконані, то переговори

все одно можуть бути продовжені завдяки прямому втручання пілотів та диспетчерів.

У тактичному онлайн-сценарії як NG-FMS, так і 4-PNV можуть ініціювати переговори щодо траєкторії. 4-PNV діє переважно як ключовий приймач рішень. NG-FMS може ініціювати переговори щодо траєкторії через свіжо виявлені зміни в погоді, погіршення продуктивності, відмови обладнання або аварійні ситуації на борту. Інші фактори, пов'язані з маневрами, такі як неефективні зміни курсу та недосяжні швидкості та висоти під час злету / сходження через фактичну вагу повітряного судна, також можуть бути причиною переговорів. У тактичному онлайн-сценарії завжди шукають "одноразовий" переговор через обмежений час та строгі зобов'язання щодо управління повітряним рухом. Так само, якщо не вдається отримати рішення через переговори щодо траєкторії, буде розглянуто пряме втручання диспетчерів та пілотів.

Щодо обчислювальної складності, задача знаходження оптимальної комбінації траєкторій повітряних суден вважається NP-складною [74] [75], що означає, що її неможливо вирішити за поліноміальний час [76]. Алгоритм вважається "ефективним" лише в тому випадку, якщо його можна вирішити за поліноміальний час або швидше [74]. Тому для цього типу задач потрібні наближені методи оптимізації [74]. Крім того, лише кілька обчислювально ефективних алгоритмів підходять для моделювання передбачуваних можливостей контролера [77].

Рішення, яке найкраще відповідає цілям SESAR та Clean Sky, вимагає знаходження комбінації траєкторій, які не конфліктують між собою та сприяють зменшенню загального забруднення, витрат та затримок. Ця задача комбінаторної оптимізації (COP) може бути вирішена за допомогою точних або евристичних алгоритмів. Точні алгоритми шукають рішення, перебираючи всі можливі комбінації, і, отже, часто вимагають надмірно багато обчислювального

часу. Евристичні методи можуть знайти рішення значно швидше, але не гарантують, що вони будуть найбільш оптимальними [78].

Траєкторії розглядаються шляхом порівняння їх по парам. Загальна довжина траєкторій розбивається на сегменти з певним кроком часу, який залежить від швидкості кожного повітряного судна, оскільки відстані між ними фіксовані. Відстані між кожними вузлами початкової траєкторії та відповідними вузлами траєкторії, яку порівнюють, оцінюються. Оцінка обчислювального часу проводиться також.

$$1) \quad t_c \propto \frac{n(n-1)p}{2} \cdot p(w)$$

де n - кількість повітряних суден, участь яких урахована; p - кількість часових кроків для порівняння траєкторій; $p(w)$ - ймовірність того, що траєкторія (w) призведе до конфлікту і, отже, потрібно аналізувати іншу траєкторію. Зменшення обчислювального часу можливе шляхом обмеження використаних змінних та застосування обрізки. Перше обмеження передбачає об'єднання повітряних суден в кластери, але вимагає накладання кластерів один на одного. Останнє зменшує кількість кластерів шляхом обмеження їх в часі, висоті і географічних областях (секторах).

Наміри траєкторій 4DT формуються на основі концепції Вільсона [86]. Опис цих намірів включає 3D точки, які визначають тривалість часу, в яку генеруються обсяги невизначеності, що рухаються вздовж визначеного маршруту. Для коротких часових інтервалів, які розглядаються для операцій 4-PNV, застосовується локальна модель плоского земного шару. Роздільна здатність для просторового та часового представлення визначається згідно з характеристиками ARINC 702A-3, що використовуються у системах управління польотами ARINC. Крім того, враховується унікальна інформація про кожне повітряне судно, вітер та дані про продуктивність, щоб забезпечити точність генерації траєкторій на землі. Результати сімейства оптимізованих намірів

траєкторій, створених на борту повітряного судна за допомогою ваг продуктивності, можна описати наступним чином:

$$2) \quad J_i = \{w_1, w_2, \dots, w_{n-1}, w_n\}$$

Попарне порівняння проводиться в порядку пріоритету, визначеному принципом розкладу і може бути представлено математично за допомогою нижньої і верхньої трикутних матриць наступним чином:

$$3) \quad \begin{bmatrix} J_1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ J_1 & J_2 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots \\ J_1 & J_2 & J_3 & \dots & J_{n-2} & 0 \\ J_1 & J_2 & J_3 & \dots & J_{n-2} & J_{n-1} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} J_2 & J_3 & \dots & J_{n-1} & J_n \\ 0 & J_3 & \dots & J_{n-1} & J_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & J_{n-1} & J_n \\ 0 & 0 & \dots & 0 & J_n \end{bmatrix}$$

Кількість часових інтервалів, на яких забезпечується відстань, визначається таким чином, щоб відстань, яку літаки подолають протягом одного інтервалу часу, завжди була меншою за мінімум розділення для всіх повітряних суден. У випадку міжнародних маршрутів це призводить до визначення інтервалу часу валідації, зазвичай близько 15 секунд, оскільки це час, необхідний двом літакам, які рухаються зі швидкістю 500 вузлів, щоб подолати мінімальну відстань розділення 5 морських миль [81]. Модель 4-PNV також використовується в області термінальних маневрів (ТМА), з меншими мінімумами розділення і змінними маневрами та різними швидкостями. Потік повітряних суден в мережі змінюється з часом, тому часові інтервали моделюються динамічно. Алгоритм валідації 4-PNV обчислює інтервали, необхідні для кожної пари траєкторій, і забезпечує, що розділення між літаками, які перевіряються, дотримується. Обмеження нерівностей перевіряються для кожного розділення між парами літаків по одному за одним на кожному інтервалі часу [82]. Це показано на (4, 5), де D - відстань, а H - різниця висоти між двома літаками (i і j), а D_{\min} і H_{\min} - мінімумами розділення. Літаки розглядаються як частина набору порівнянь з n завдань і не можуть бути ідентичними завданнями.

$$4) \quad \Delta d_{ij} \geq D_{\min} \begin{cases} 1 \leq i \leq N \\ 1 \leq j \leq N \\ i \neq j \end{cases}$$

$$5) \quad \Delta h_{ij} \geq H_{\min} \begin{cases} 1 \leq i \leq N \\ 1 \leq j \leq N \\ i \neq j \end{cases}$$

Якщо літак наближається до горизонтального розділення з іншим літаком, система також перевіряє, чи не порушують вони мінімальний вертикальний інтервал. Модель 4-PNV також враховує можливість утворення вихорів. Зазвичай на нижній висоті вихори рухаються зі швидкістю 5 вузлів і опускаються на 1000 футів нижче, ніж проходить літак [83]. Область небезпеки від вихорів не завжди співпадає з траєкторією літака. Тому поточні регуляторні вимоги для горизонтального розділення включають кут 45 градусів і висоту 1000 футів нижче [84]. Модель турбулентності вихорів, яку використовує система 4-PNV, враховує поведінку цих вихорів, згідно з визначенням, наведеним у документі ICAO Doc 4444 [84]. Відстань між літаком та можливими вихорами перевіряється, щоб переконатися, що вона не опускається нижче встановленого порогу. Геометрія маршруту, отримана в результаті моделювання турбулентності вихорів, представлена на малюнок 9.

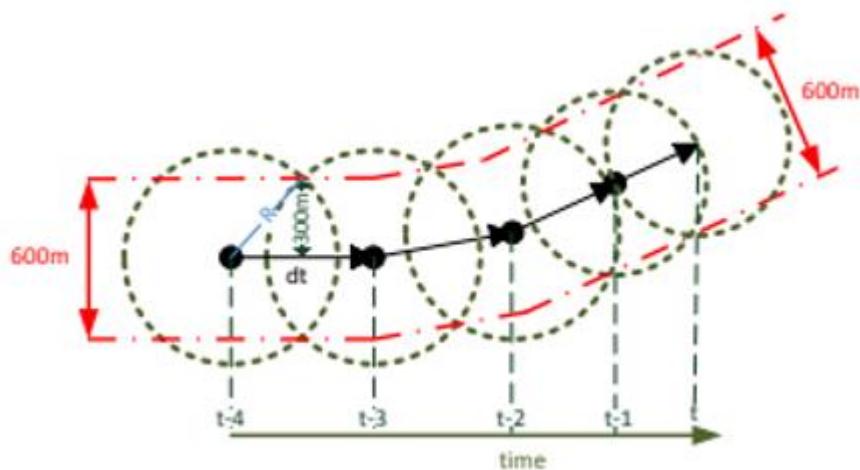


Рис.33.

Моделювання часових кільватерних вихорів

Алгоритм для моделі перевірки 4-PNV наведено на Рис.37.

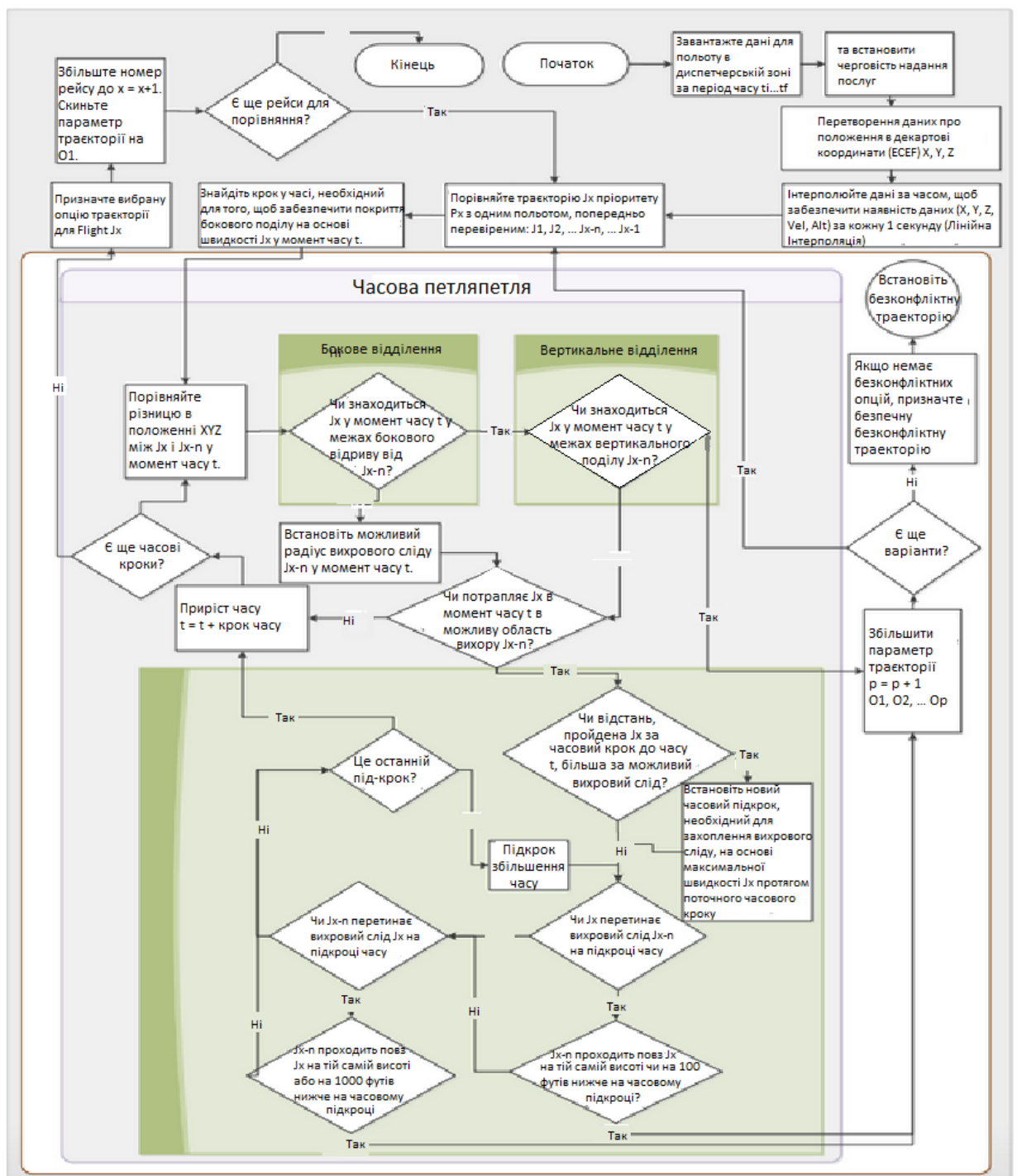


Рис.34. Алгоритм перевірки 4-PNV

4.4. Симуляція та результати

Нижче подані результати попередніх переговорів і валідації намірів 4DT з використанням системи 4-PNV на землі. Ці результати можуть бути використані як у стратегічних онлайн сценаріях, так і в тактичних онлайн сценаріях, і припускається, що загальний час оптимізації, переговорів і валідації не перевищує 300 секунд. Траєкторії перевіряються на конфлікти в бічному, вертикальному і поздовжньому напрямках, з використанням поточних мінімальних відстаней [24]. У специфікаціях кожної симуляції наведено час виконання. Припускається, що графік завдань для валідації був визначений з урахуванням пріоритетів і дотримувався принципу "перший запланований - перший обслуговується" (FSFS). Також припускається, що варіанти траєкторій були розроблені з урахуванням глобальної оптимізації. На даному етапі моделювання воронки вітру не враховано.

В якості сценарію випробувань для операцій ENDEAVOUR у найгіршому випадку обрано контекст області термінального маневрування (ТМА). Тому був розроблений спрощений сценарій ТМА, який враховує прильоти і відльоти. Цей сценарій моделює поточний пік прильотного трафіку і включає реалістичний прильотний трафік для однієї процедури ILS на підхідному курсі 270°, транзитний трафік на різних висотах та точках виходу, а також один відлітний трафік до обраної точки виходу.

Цей попередній тестовий сценарій є статичним у тому сенсі, що в нього не входить і не виходить додатковий трафік після початку симуляції. Випробувані літаки - це Airbus A320, і їх параметри динаміки взяті з BADA [87, 88], а початкова вага літаків різниться від 58000 кг до 70000 кг.

Оптимальні наміри, обчислені кожним NG-FMS, складаються з "перельоту" 4D точок, від 3 до 30, на точки виходу або на точку злиття - фіксовану точку підходу ILS (IAF). Для кожного трафіку обчислюються два 4DT наміри:

оптимальна траєкторія для мінімізації споживання пального і оптимальна траєкторія для мінімізації часу.

Мінімізація часу та пального зазвичай конфліктують одна з одною, тому генеруються два різні наміри. Літакам не надають обмежень часу до першого процесу оптимізації, і надіслані вниз наміри вказують бажаний час прибуття на точки виходу або на точку злиття в системі 4-PNV.

Основний акцент цього тестового сценарію випробувань спрямований на проблему послідовності прильоту. З огляду на обмежену кількість злітних смуг, не всі літаки можуть бути вибрані для перельоту через точку злиття у визначений час. Точка злиття позначає початок спільного підхідного лінійного сегмента, де потрібно дотримуватися продольного розділення для можливості успішного вильоту на вільну смугу і для попередження конфліктів на підході.

Спільний підхідний лінійний сегмент було смодельовано як типовий профіль підходу ILS, починаючи з 9 морських миль від смуги на висоті 3000 футів. Тим не менше, 4-PNV також може виконувати послідовність прильоту для майбутніх дуже коротких фінальних сегментів підходу. Після того, як початкові наміри були збережені в 4-PNV, алгоритм послідовності точкового злиття виділяє доступні інтервали часу відповідно. З урахуванням мінімального горизонтального розділення 4 морські милі для літаків, що наближаються зі швидкістю 140 вузлів, згенеровані інтервали часу характеризуються розділенням 100 секунд.

В. Результати для області термінального маневрування у густому трафіку представлені у вигляді інтервалів часу для точки злиття підходу, а також входячого порядку і положення. Докладні характеристики семи випадково згенерованих трафіків наведено в наступних таблицях 10-16.

Таблиця 10-16. Результати сценарію Terminal Manoeuvring Area

	Початкове положення	Точка злиття
Порядок	1	5
Широта	N51°48'56''	N51°28'38''
Довгота	W1°57'45''	W1°41'19''
Висота	4500 ft	3000 ft
Час	0 s	244 s

	Початкове положення	Точка злиття
Порядок	2	3
Широта	N51°35'16''	N51°28'38''
Довгота	E0°5'52''	W1°41'19''
Висота	3800 ft	3000 ft
Час	0 s	344 s

	Початкове положення	Точка злиття
Порядок	3	2
Широта	N51°30'59''	N51°28'38''
Довгота	W1°14'53''	W1°41'19''
Висота	11400 ft	3000 ft
Час	0 s	444 s

	Початкове положення	Точка злиття
Порядок	4	4
Широта	N51°27'55''	N51°28'38''
Довгота	E0°9'23''	W1°41'19''
Висота	15700 ft	3000 ft
Час	0 s	544 s

	Початкове положення	Точка злиття
Порядок	5	7
Широта	N51°27'55''	N51°28'38''
Довгота	E0°9'23''	W1°41'19''
Висота	10400 ft	3000 ft
Час	0 s	644 s

	Початкове положення	Точка злиття
Порядок	6	6
Широта	N51°24'44''	N51°28'38''
Довгота	W1°3'55''	W1°41'19''
Висота	14400 ft	3000 ft
Час	0 s	744 s

	Початкове положення	Точка злиття
Порядок	7	1
Широта	N51°51'37''	N51°28'38''
Довгота	W1°56'8''	W1°41'19''
Висота	11600 ft	3000 ft
Час	0 s	844 s

Отриманий сценарій представлений на Мал. 39. Середній час обробки становив 164 секунди після 10 симуляцій. Найменший обчислювальний час становив 89 секунд, а найбільший - 302 секунди. Знову ж таки, розбіжності в часі пов'язані з виконанням симуляцій на неспеціалізованій системі. Час обробки зростає приблизно експоненційно зі збільшенням кількості повітряних судів, що відповідає загальній думці в літературі [25].

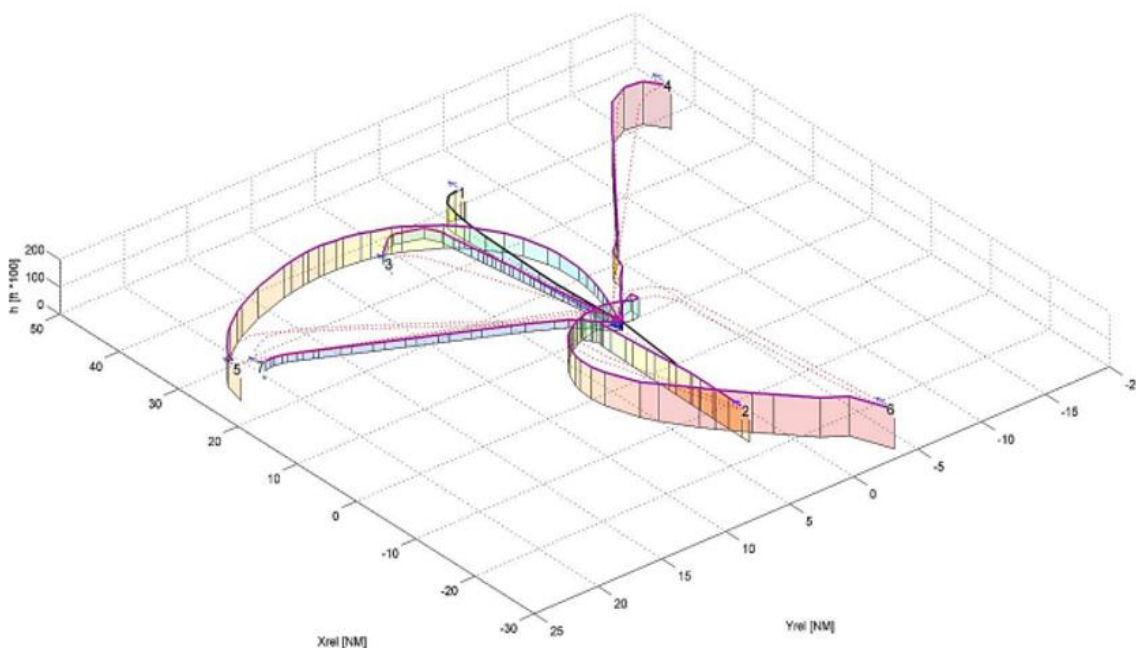


Рис.35. Відображення результатів тесту Terminal Manoeuvring Area

Висновок до розділу 4

У цій роботі пропонується концептуальний дизайн нової системи для планування, переговорів і валідації траєкторій у чотирьох вимірах (4-PNV). Ця система призначена для допомоги контролерам повітряного руху в стратегічних та тактичних операціях в реальному часі. Вона спрямована на досягнення цілей SESAR і Clean Sky у сфері авіаційного управління повітряним рухом. Один з ключових елементів цієї системи - це процес валідації в режимі найближчого реального часу, який дозволяє автоматично перевіряти траєкторії на відсутність конфліктів у високоінтенсивному повітряному русі, коли необхідно

переорганізувати повітряний простір або рух літаків через зміни умов повітряного простору менше, ніж за 10 хвилин.

У статті представлені сценарії симуляційних випробувань, які використовуються для перевірки моделей валідації 4-PNV у реалістичних операційних сценаріях. Ці сценарії базуються на інтенсивному повітряному русі та складних умовах повітряного простору, які є типовими для Європи. За допомогою MATLAB на ПК з одним ядром процесора час обробки для створення рішень без конфліктів для 20 літаків в області маневрів аеропорту (ТМА), яка включає як прильоти, так і відльоти, становить менше 180 секунд протягом 10 хвилин. Проте, зі збільшенням кількості літаків час обробки зростає експоненційно. Також вказано, що використання високопродуктивного скомпільованого коду та високопродуктивної платформи може покращити час обчислень.

Максимальний час, необхідний для обчислення оптимальних траєкторій 4DT протягом 10 хвилин від NG-FMS, становив 120 секунд. У випадку великої щільності повітряного руху процес створення намірів NG-FMS, їх передача в 4-PNV та переговори/валідація виконується за менше ніж 300 секунд. Ці результати відповідають стандартному 10-хвилинному часовому проміжку для типових онлайн завдань тактичного маршрутування/перемаршрутування і роблять підхід ENDEAVOUR придатним для квазі-реальних застосувань.

Розділ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1. Перелік шкідливих та небезпечних виробничих чинників

Серед ключових небезпечних факторів, що впливають на працю суб'єкта, можна виділити наступні:

- Зменшена або збільшена рухливість повітря.
- Підвищена або понижена температура повітря у робочій зоні.
- Збільшена або зменшена вологість повітря.
- Недостатня освітленість робочої зони природним світлом або її відсутність.
- Високий рівень шуму на робочому місці.

Ці чинники безпосередньо впливають на об'єкт праці та можуть відбуватися прямо в приміщенні, де він працює.

Таблиця 17. Оптимальні значення параметрів мікроклімату

Пора року	Категорія робіт	Температура повітря, град. С	Відносна вологість повітря, %	Швидкість руху повітря, м/с
Холодна	легка-1 а	23-24	50-60%	0,1
	легка-1 б	22-23	50-60%	0,1
Тепла	легка-1 а	24-25	50-60%	0,1
	легка-1 б	23-24	50-60%	0,2

Для оцінки необхідності нормалізації параметрів робочого середовища, припустимо, що в поточному робочому середовищі відносна вологість становить 75%, температура повітря - 23 градуси Цельсія, а швидкість руху повітря - 0.2 м/с.

Враховуючи прийняті параметри робочої зони суб'єкта та оптимальні значення відповідно до стандарту, можна зробити висновок, що потрібно

провести нормалізацію рівня вологості повітря в робочій зоні, зменшивши його до оптимального діапазону 50-60%, та зменшити швидкість циркуляції повітря в робочій зоні до відповідних 0.1 м/с. Ці фактори можуть не призводити безпосередньо до травмувань людини, але зменшують комфортність умов праці і можуть викликати проблеми зі здоров'ям у довгостроковій перспективі. Зниження комфорту умов праці, в свою чергу, може призвести до погіршення ефективності працівника при виконанні його повсякденних обов'язків.

4.2. Розробка заходів з охорони праці

Давайте розглянемо основні кроки для нормалізації умов праці суб'єкта з метою забезпечення його здоров'я та створення безпечного робочого середовища. Ми розглянемо такі заходи, як вирівнювання умов повітря у робочій зоні, вплив шуму на працівника підприємства, а також питання пожежної безпеки.

4.2.1. Повітря у робочій зоні

У тих випадках, коли приміщення використовує централізовану систему повітрязабезпечення, пряме провітрювання з вуличного повітря зазвичай не є можливим. Для стабілізації якості повітря рекомендується проводити регулярне вологе прибирання. Крім того, важливо належним чином налаштувати внутрішню систему вентиляції для забезпечення достатніх обсягів свіжого повітря без створення сильних потоків, які можуть спричинити активну циркуляцію повітря та викликати протяги. Як додатковий захід нормалізації, рекомендується встановлення зволожувачів повітря для розпилення рідини та підтримки оптимального рівня вологості, відповідно до встановлених стандартів. У випадку потреби у підвищенні вологості можна використовувати аерозольні парогенератори, розташовані вздовж периметру робочої зони.

4.2.2. Вплив шуму на працівника підприємства

Навіть невеликий рівень шуму (50-60 дБА) може створити значне навантаження на нервову систему людини, що може впливати на її

психологічний стан. Це особливо часто спостерігається у тих, хто займається інтелектуальною діяльністю. Ефекти низького рівня шуму можуть варіювати в залежності від таких факторів, як вік, стан здоров'я, характер роботи та час виникнення шуму.

При виконанні роботи за комп'ютером, особливо при потребі високої концентрації уваги, важливо створити комфортні умови, що включають в себе відсутність зайвого шуму в приміщенні. Це необхідно як для зменшення негативного впливу на здоров'я та нервовий стан людини, так і для підтримання високого рівня концентрації. Посторонні шуми, особливо ті, що є гучкими, можуть виступати як подразник, що не лише може негативно вплинути на здоров'я працівника, але й знизити його робочу ефективність при виконанні завдань.

Людина може адаптуватися до роботи в умовах шуму, проте тривалий вплив інтенсивного шуму може викликати загальну втому, порушення слуху, а іноді й глухоту, а також впливати на процеси травлення та структуру внутрішніх органів.

Заходи для захисту від шуму можна розділити на колективні та індивідуальні, причому останні слід передбачати на етапі проектування промислових споруд та обладнання. Особлива увага повинна бути приділена теплоізоляції. Додатковим заходом може бути розмежування трудової діяльності та технічних робіт в різні часи, якщо це можливо. Наприклад, проведення технічно шумних робіт, які неможливо ізолювати від робочого простору працівників, у тих періодах, коли це найменше перешкоджатиме робочому графіку працівників. Це дозволить зменшити вплив шуму не лише за рахунок поліпшення звукоізоляції та зменшення кількості джерел шуму, але і через їхнє часове розмежування.

5.2.3. Пожежна безпека

На робочому місці, коли працюється за персональним комп'ютером чи ноутбуком, зазвичай відсутні вибухонебезпечні речовини. Однак серед приладів,

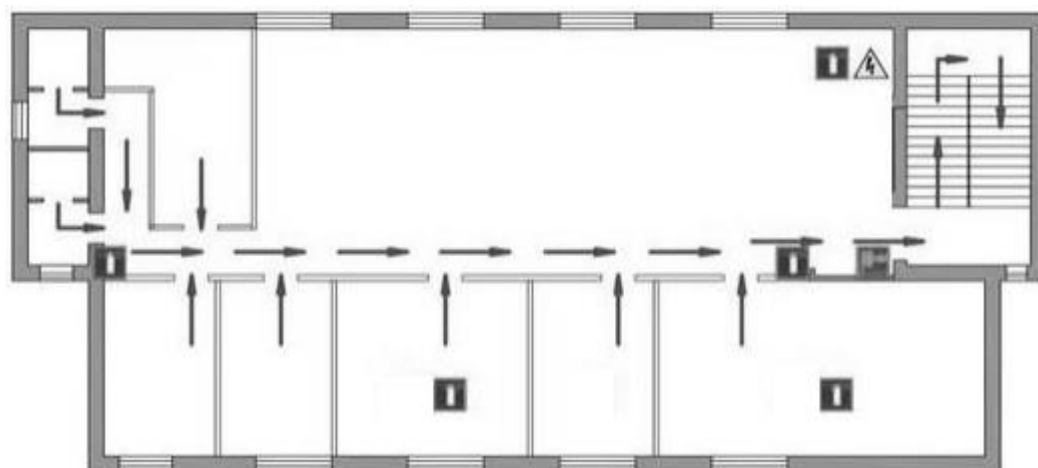
що можуть бути потенційно небезпечними з точки зору пожежної безпеки, можна виділити персональні робочі пристрої працівників, розетки безпосередньо на їх робочих місцях, а також прилади або зони, які можуть становити пожежну загрозу всередині приміщення, такі як електрощитові та області проведення газових або електрокомунікацій.

Основними причинами пожеж є порушення технологічних регламентів, несправність використовуваного обладнання або неправильна його експлуатація, а також небезпечне поводження з відкритим вогнем.

Для тушіння пожежі в приміщенні можна використовувати вуглекислотні та порошкові вогнегасники. При цьому важливо враховувати потужність електроустаткування: вуглекислотні вогнегасники можна використовувати для тушіння установок до 10 кВт, тоді як порошкові вогнегасники - для установок потужністю до 1 кВт, але не в закритих приміщеннях.

Додатково рекомендується встановлювати системи загального оповіщення про пожежу та системи автоматичного гасіння вогню, де це можливо. У службових приміщеннях з оргтехнікою площею 20 м² повинен бути встановлений 1 газовий вогнегасник масою не менше 3 кг. Приміщення, де розміщена оргтехніка, також повинні мати переносні газові вогнегасники відповідно до кількості приміщень та їхнього призначення.

Рис.
План



36.

евакуації з приміщення

Крім того, слід розробляти плани евакуації на випадок пожежі чи іншої небезпеки, які повинні бути розміщені на кожному поверсі та вказувати шляхи евакуації. У випадку евакуації, працівники повинні залишити свої робочі місця та використовувати бокові сходи, уникаючи використання ліфтів під час пожежної тривоги.

Для поліпшення умов охорони праці пропонується вчасно проводити інструктажі з охорони праці за розкладом та застосовувати заохочення для працівників, які виявляють або усувають недоліки в охороні праці.

Висновок до розділу 5

Під час розробки цього розділу проведений аналіз робочих умов в офісному приміщенні суб'єкта. Були визначені основні шкідливі та небезпечні чинники, які впливають на або знаходяться в робочих приміщеннях.

Також проведено вивчення варіантів організації пожежної безпеки у приміщенні, в результаті чого виявилася необхідність оснащення приміщень порошковими та вуглекислотними вогнегасниками для ефективного гасіння можливих пожеж. Також встановлено потребу у встановленні автоматичних систем сигналізації про пожежу та димку, а також систем автоматичного гасіння в приміщеннях, де це технічно можливо.

Загальний Висновок

Співпраця є ключем до вирішення проблем в галузі авіаційного управління повітряним рухом та авіаційних технологій. Ця співпраця повинна здійснюватися на всіх рівнях, від диспетчерів та пілотів до розробників систем та регулюючих органів. Важливо створити сприятливе середовище для відкритого обміну інформацією та спільного прийняття рішень.

Впровадження сучасних технологій та автоматизації в авіаційній сфері може покращити ефективність та безпеку руху повітряних суден. Але важливо зберігати баланс між автоматизацією та ручним управлінням, а також розуміти вплив автоматизації на процеси та приймати відповідні заходи.

Дослідження траєкторій та оптимізація польотів є важливим етапом у розвитку авіаційних технологій. Це сприяє покращенню управління повітряним рухом та зменшенню ризиків конфліктів. Важливо розробляти та використовувати сучасні системи для оптимізації та валідації траєкторій.

Забезпечення безпеки та ефективності в повітряному русі вимагає постійного вдосконалення технологій та систем управління. Це означає, що авіаційна галузь має бути відкритою до інновацій та постійного вдосконалення, щоб забезпечити безпеку та зручність для пасажирів та учасників повітряного руху.

Отже, загальний висновок полягає в тому, що співпраця, впровадження сучасних технологій та автоматизації, дослідження траєкторій та постійне вдосконалення грають важливу роль у розвитку авіаційної галузі. Це сприяє покращенню безпеки та ефективності в повітряному русі, що є критичним для подальшого розвитку авіаційної сфери.

Список літератури

1. SESAR Consortium, The ATM Target Concept - D3, SESAR Definition Phase, 2007[Електронний ресурс] Режим доступу \www/URL: <https://www.scientific.net/AMM.629.327>
2. Eurocontrol, Trajectory Negotiation in a Multi-sector Environment, Programme for Harmonised ATM Research in Eurocontrol (PHARE), Bruxelles, Belgium, 1997. [Електронний ресурс] Режим доступу\www/URL : https://www.researchgate.net/publication/271966673_Trajectory_Negotiation_in_a_Multi-sector_Environment
3. E. Mueller, Experimental Evaluation of an Integrated Datalink and Automation -Based Strategic Trajectory Concept, in proceedings of AIAA Aviation Technology, Integration and Operations conference 2007 (ATIO2007), Belfast, Northern Ireland, 2007. DOI: 10.2514/6.2007-7777
4. A. Gardi, R. Sabatini, S. Ramasamy, and K. de Ridder, 4-Dimensional Trajectory Negotiation and Validation System for the Next Generation Air Traffic Management, in proceedings of AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference 2013 (GNC2013), Boston, MA, USA, 2013. DOI: 10.2514/6.2013-4893[Електронний ресурс] Режим доступу\www/URL: https://www.researchgate.net/publication/263973440_4-Dimensional_Trajectory_Negotiation_and_Validation_System_for_the_Next_Generation_Air_Traffic_Management
5. S. Ramasamy, R. Sabatini, A. Gardi, and Y. Liu, Novel flight management system for real-time 4-dimensional trajectory based operations, in proceedings of AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference 2013 (GNC2013), Boston, MA, USA, 2013. DOI: 10.2514/6.2013-4763 [Електронний ресурс] Режим доступу\www/URL: https://www.researchgate.net/publication/263973622_Novel_Flight_Management_System_for_Real-Time_4-Dimensional_Trajectory_Based_Operations

6. Eurocontrol - SESAR JU, European ATM Master Plan - The Roadmap for Sustainable Air Traffic Management, 2nd ed, Brussels, Belgium, 2012.
7. Global Air Traffic Management Operational Concept. Doc 9854 AN/458.- ICAO. 2005,-83 p.
8. 4D trajectory based operation in high density terminal control area considering the uncertainty of weather forecast data.[Електронний ресурс] Режим доступу\www/URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/4D-trajectory-based-operation-in-high-density-area-Tezuka/a2b304e685a21c075bef34e2318782f7abf34187>
9. Ризики зіткнення та ешелонування повітряних кораблів./ В.П. Харченко, Г.Ф. Аргунов, О.Є. Луппо, С.А. Загора.-К.: НАУ, 2011.- 316 с.
- 10.Ahlstrom, U.; Friedman-Berg, F.J. Using eye movement activity as a correlate of cognitive workload. *Int. J. Ind. Ergon.* 2006, 36, 623–636.
[Електронний ресурс] Режим доступу\www/URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169814106000771?via%3Dihub>
- 11.Tokuda, S.; Palmer, E.; Merkle, E.; Chaparro, A. Using saccadic intrusions to quantify mental workload. *Proc. Hum. Factors Ergon. Soc. Ann. Meet.* 2009, 2, 809–813. [Електронний ресурс] Режим доступу\www/URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169814106000771?via%3Dihub>
- 12.Di Stasi, L.L.; Marchitto, M.; Antolí, A.; Vaccino, T.; Cañas, J.J. Approximation of on-line mental workload index in ATC simulated multitasks. *J. Air Transp. Manag.* 2010, 16, 330–333.
[Електронний ресурс] Режим доступу\www/URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S096969971000027X?via%3Dihub>
- 13.Müller, A.; Petru, R.; Seitz, L.; Englmann, I.; Angerer, P. The relation of cognitive load and pupillary unrest. *Int. Arch. Occup. Environ. Health* 2011, 84, 561. [Електронний ресурс] Режим доступу\www/URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00420-010-0590-7>

14. Imants, P.; Greef, T.D. Eye Metrics for Task-Dependent Automation. In Proceedings of the European Conference on Cognitive Ergonomics, Vienna, Austria, 1–3 September 2014.
[Электронный ресурс] Режим доступа \www/URL: <https://dl.acm.org/doi/abs/10.1145/2637248.2637274>
15. Kang, Z.; Bass, E.J.; Lee, D.W. Air traffic controllers' visual scanning, aircraft selection, and comparison strategies in support of conflict detection. In Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting, Chicago, IL, USA, 27–31 October 2014; Volume 2014, pp. 77–81.
[Электронный ресурс] Режим доступа \www/URL: <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/1541931214581017>
16. Palma Fraga, R.; Kang, Z.; Crutchfield, J.M.; Mandal, S. Visual Search and Conflict Mitigation Strategies Used by Expert en Route Air Traffic Controllers. *Aerospace* 2021, 8, 170. [Электронный ресурс] Режим доступа \www/URL: <https://www.mdpi.com/2226-4310/8/7/170>
17. Marchitto, M.; Benedetto, S.; Vaccino, T.; Cañas, J.J. Air traffic control: Ocular metrics reflect cognitive complexity. *Int. J. Ind. Ergon.* 2016, 54, 120–130.
[Электронный ресурс] Режим доступа URL:
18. Mertens, H.W.; Milburn, N.J.; Collins, W.E. Practical color vision tests for air traffic control applicants: En route center and terminal facilities. *Aviat. Space Environ. Med.* 2000, 71, 1210–1217. [Электронный ресурс] Режим доступа \www/ URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169814116300452?via%3Dihub>
19. van Meeuwen, L.W.; Jarodzka, H.; Brand-Gruwel, S.; Kirschner, P.A.; de Bock, J.J.P.R.; van Merriënboer, J.J.G. Identification of effective visual problem solving strategies in a complex visual domain. *Learn. Instr.* 2014, 32, 10–21. [Электронный ресурс] Режим доступа \www/ URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959475214000061?via%3Dihub>

20. Wang, Y.; Wang, L.; Lin, S.; Cong, W.; Xue, J.; Ochieng, W. Effect of Working Experience on Air Traffic Controller Eye Movement. *Engineering* 2021, 7, 488–494. [Электронный ресурс] Режим доступа \www/ URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095809921000096?via%3Dihub>
21. Sheridan, T.B.; Verplank, W.L. *Human and Computer Control of Undersea Teleoperators*; Technical Report; Massachusetts Institute of Technology: Cambridge, MA, USA, 1978. [Электронный ресурс] Режим доступа \www/ URL: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19790007441>
22. FITTS, P.M. Psychological research on equipment design in the AAF. *Am. Psychol.* 1947, 2, 93–98. [Электронный ресурс] Режим доступа \www/ URL: <https://psycnet.apa.org/doiLanding?doi=10.1037%2Fh0053785>
23. Parasuraman, R.; Sheridan, T.; Wickens, C. A model for types and levels of human interaction with automation. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.-Part A: Syst. Humans* 2000, 30, 286–297. [Электронный ресурс] Режим доступа \www/ URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/844354>
24. SESAR Joint Undertaking. *Automation in Air Traffic Management—Long-Term Vision and Initial Research Roadmap*; SESAR Joint Undertaking: Brussels, Belgium, 2020. [Электронный ресурс] Режим доступа \www/ URL: https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Automation+in+Air+Traffic+Management%E2%80%94Long+Term+Vision+and+Initial+Research+Roadmap&author=SESAR+Joint+Undertaking&publication_year=2020
25. Endsley, M.R. Toward a Theory of Situation Awareness in Dynamic Systems. *Hum. Factors* 1995, 37, 32–64. [Электронный ресурс] Режим доступа \www/ URL: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1518/001872095779049543>
26. Wickens, C.D. Situation Awareness and Workload in Aviation. *Curr. Dir. Psychol. Sci.* 2002, 11, 128–133. [Электронный ресурс] Режим доступа \www/ URL: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1111/1467-8721.00184>

27. Bedny, G.Z.; Karwowski, W.; Jeng, O.J. The situational reflection of reality in activity theory and the concept of situation awareness in cognitive psychology. *Theor. Issues Ergon. Sci.* 2004, 5, 275–296. [Электронный ресурс] Режим доступа \www/ URL: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/1463922031000075070>
28. Rose, J.; Bearman, C.; Dorrian, J. The Low-Event Task Subjective Situation Awareness (LETSSA) technique: Development and evaluation of a new subjective measure of situation awareness. *Appl. Ergon.* 2018, 68, 273–282. [Электронный ресурс] Режим доступа \www/ URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0003687017302703?via%3Dihub>
29. Mogford, R.H. Mental Models and Situation Awareness in Air Traffic Control. *Int. J. Aviat. Psychol.* 1997, 7, 331–341. [Электронный ресурс] Режим доступа \www/ URL: https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1207/s15327108ijap0704_5
30. Durso, F.T.; Bleckley, M.K.; Dattel, A.R. Does Situation Awareness Add to the Validity of Cognitive Tests? *Hum. Factors J. Hum. Factors Ergon. Soc.* 2006, 48, 721–733. [Электронный ресурс] Режим доступа \www/ URL: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1518/001872006779166316>
31. Zhou, Y.; Zeng, Y.; Yang, J.; Shi, R.; Wang, Q. A computational approach to air traffic controller situation awareness based on multi-sensor data. *Adv. Psychol. Sci.* 2015, 23, 1879–1885. [Электронный ресурс] Режим доступа \www/ URL: <https://journal.psych.ac.cn/xlkxjz/CN/10.3724/SP.J.1042.2015.01879>
32. Vidulich, M.A.; Stratton, M.; Crabtree, M.; Wilson, G. Performance-based and physiological measures of situational awareness. *Aviat. Space Environ. Med.* 1994, 65, A7–A12. [Электронный ресурс] Режим доступа \www/ URL: <https://europepmc.org/article/med/8018083>
33. Durso, F.T.; Geldbach, K.M.; Corballis, P. Detecting Confusion Using Facial Electromyography. *Hum. Factors J. Hum. Factors Ergon. Soc.* 2012, 54, 60–

69. [Электронный ресурс] Режим доступа \www/ URL: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0018720811428450>
34. Endsley, M.R. Direct measurement of situation awareness: Validity and use of SAGAT Development of Queries. In *Situation Awareness Analysis and Measurement*; Endsley, M.R., Garland, D.J., Eds.; CRC Press: New York, NY, USA, 2000. [Электронный ресурс] Режим доступа \www/ URL: <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.4324/9781315087924-9/direct-measurement-situation-awareness-validity-use-sagat-mica-endsley>
35. Zhang, T.; Yang, J.; Liang, N.; Pitts, B.J.; Prakah-Asante, K.O.; Curry, R.; Duerstock, B.S.; Wachs, J.P.; Yu, D. Physiological Measurements of Situation Awareness: A Systematic Review. *Hum. Factors* 2020. [Электронный ресурс] Режим доступа \www/ URL: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0018720820969071>
36. Durand, N. Constant speed optimal reciprocal collision avoidance. *Transp. Res. Part C: Emerg. Technol.* 2018, 96, 366–379. [Электронный ресурс] Режим доступа \www/ URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0968090X18314232?via%3Dihub>
37. Durand, N.; Gotteland, J.B.; Matton, N. Visualizing complexities: The human limits of air traffic control. *Cogn. Technol. Work* 2018, 20, 233–244. [Электронный ресурс] Режим доступа \www/ URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10111-018-0468-0>
38. Suresh, K.; Chandrashekhara, S. Sample size estimation and power analysis for clinical research studies. *J. Hum. Reprod. Sci.* 2012, 5, 7–13. [Электронный ресурс] Режим доступа \www/ URL: https://journals.lww.com/jhrs/fulltext/2012/05010/sample_size_estimation_and_power_analysis_for.3.aspx
39. Fehd, H.M.; Seiffert, A.E. Eye movements during multiple object tracking: Where do participants look? *Cognition* 2008, 108, 201–209. [Электронный ресурс] Режим доступа \www/ URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0010027707002776?via%3Dihub>

40. McIntire, L.K.; McKinley, R.A.; Goodyear, C.; McIntire, J.P. Detection of vigilance performance using eye blinks. *Appl. Ergon.* 2014, *45*, 354–362. [Электронный ресурс] Режим доступа \www/ URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0003687013000938?via%3Dihub>
41. van de Merwe, K.; van Dijk, H.; Zon, R. Eye Movements as an Indicator of Situation Awareness in a Flight Simulator Experiment. *Int. J. Aviat. Psychol.* 2012, *22*, 78–95. [Электронный ресурс] Режим доступа \www/ URL: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10508414.2012.635129>
42. Shannon, C.E. A Mathematical Theory of Communication. *Bell Syst. Tech. J.* 1948, *27*, 379–423. [Электронный ресурс] Режим доступа \www/ URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6773024>
43. Diaz-Piedra, C.; Rieiro, H.; Cherino, A.; Fuentes, L.J.; Catena, A.; Di Stasi, L.L. The effects of flight complexity on gaze entropy: An experimental study with fighter pilots. *Appl. Ergon.* 2019, *77*, 92–99. [Электронный ресурс] Режим доступа \www/ URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0003687019300274?via%3Dihub>
44. Salmon, P.; Stanton, N.; Walker, G.; Green, D. Situation awareness measurement: A review of applicability for C4i environments. *Appl. Ergon.* 2006, *37*, 225–238. [Электронный ресурс] Режим доступа \www/ URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0003687005000554?via%3Dihub>
45. Uhlarik, J.; Comerford, D.A. *A Review of Situation Awareness Literature Relevant to Pilot Surveillance Functions*; Technical Report; Federal Aviation Administration, National Technical Information Service: Springfield, VA, USA, 2002.
46. Hart, S.G.; Staveland, L.E. Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research. In *Advances in Psychology*; Elsevier: North-Holland, The Netherlands, 1988; Volume 52, Chapter C; pp. 139–183. [Электронный ресурс] Режим доступа \www/ URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0166411508623869>

47. Levene, H. *Contributions to Probability and Statistics: Essays in Honor of Harold Hotelling*; Stanford University Press: Stanford, CA, USA, 1960; pp. 278–292. [Электронный ресурс] Режим доступа \www/ URL: https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Contributions+to+Probability+and+Statistics:+Essays+in+Honor+of+Harold+Hotelling&author=Levene,+H.&publication_year=1960
48. Liang, Z. The Effectiveness of Infographics Layout in Information Searching and Scanning: An Eye tracking Study. Master's Thesis, The Pennsylvania State University, State College, PA, USA, 2013. [Электронный ресурс] Режим доступа \www/ URL: <https://etda.libraries.psu.edu/catalog/19090>
49. Anllo-Vento, L.; Luck, S.J.; Hillyard, S.A. Spatio-temporal dynamics of attention to color: Evidence from human electrophysiology. *Hum. Brain Mapp.* 1998, 6, 216–238. [Электронный ресурс] Режим доступа \www/ URL: [https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/\(SICI\)1097-0193\(1998\)6:4%3C216::AID-HBM3%3E3.0.CO;2-6](https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/(SICI)1097-0193(1998)6:4%3C216::AID-HBM3%3E3.0.CO;2-6)
50. Åsa Svensson. Human-Automation Teamwork: Current Practices and Future Directions in Air Traffic Control. Ph.D. Thesis, Linköping University, Linköping, Sweden, 2020.
51. SESAR Joint Undertaking, SESAR and the Environment, Brussels, Belgium, 2010.
52. N. Barnier and C. Allignol, Trajectory deconfliction with constraint programming, *The Knowledge Engineering Review*, vol. 27, pp. 291-307, 2012. DOI: 10.1017/s0269888912000227 [Электронный ресурс] Режим доступа \www/ URL: https://www.researchgate.net/publication/228839502_Trajectory_Deconfliction_with_Constraint_Programming
53. ICAO, Report of the Air Traffic Flow Management Seminar and Report of the Second Meeting of the Asia/Pacific ATFM Steering Group (ATFM/SG/2), Hong Kong, China, 2013.
54. A. V. Rao, Trajectory Optimization, in *Encyclopedia of Aerospace Engineering*, Wiley, 2010.

55. J. T. Betts, Practical methods for optimal control and estimation using nonlinear programming, 2nd ed. vol. 19: SIAM, 2010. [Электронный ресурс] Режим доступа \www/ URL: <https://www.researchgate.net/publication/267671565> Practical methods for optimal control and estimation using nonlinear programming 2nd ed
56. R. T. Marler and J. S. Arora, Survey of multi-objective optimization methods for engineering, Structural and Multidisciplinary Optimization, vol. 26, pp. 369-395, 2004. DOI:10.1007/s00158-003-368-6
57. R. Sabatini, T. Moore, and C. Hill, A new avionics-based GNSS integrity augmentation system: Part 1 - Fundamentals, Journal of Navigation, vol. 66, pp. 363-384, 2013. DOI: 10.1017/S0373463313000027 [Электронный ресурс] Режим доступа \www/ URL: <https://www.researchgate.net/publication/259432557> A New AvionicsBased GNSS Integrity Augmentation System Part 1 - Fundamentals
58. R. Sabatini, T. Moore, and C. Hill, A new avionics-based GNSS integrity augmentation system: Part 2 - Integrity flags, Journal of Navigation, vol. 66, pp. 501-522, 2013. DOI: 10.1017/S0373463313000143 [Электронный ресурс] Режим доступа \www/ URL: <https://www.researchgate.net/publication/259433560> A New AvionicsBased GNSS Integrity Augmentation System Part 2 - Integrity Flags
59. A. Gardi and R. Sabatini, Unmanned aircraft bistatic lidar for CO2 column density determination, in proceedings of IEEE Metrology for Aerospace Conference 2014, Benevento, Italy, 2014
60. M. Marino, S. Watkins, R. Sabatini, and A. Gardi, Unsteady Pressure Measurements on a MAV Wing for the Design of a Turbulence Mitigation System, in proceedings of IEEE Metrology for Aerospace Conference 2014, Benevento, Italy, 2014 [Электронный ресурс] Режим доступа \www/ URL: <https://www.researchgate.net/publication/264240463> Unsteady Pressure Me

[asurements on a MAV Wing for the Design of a Turbulence Mitigation System](#)

- 61.Howlett, P, “Transport Research and Innovation Portal”, Co-operative Air Traffic Management – Ph. 1 Oct. 2006.
- 62.SESAR, “SESAR The ATM Target Concept (2007)”, 2007.
- 63.Erzberger, H, “The Automated Airspace Concept”, 4th USA/Europe ATM R&D Seminar, Santa Fe, New Mexico, USA, 2001.
- 64.ICAO, “Human Factors in CNS/ATM systems”, Human factors digest n. 11, Vols. Circular 249-AN/149, 1994.
- 65.SESAR, “SESAR release 2012”, Brussels, 2012.
- 66.Flathers III, G W, “An Airspace Simulator for Separation Management Research”, MPhil Thesis, University of Sheffield, 2011.
- 67.Wichman, K D, Lindberg, L G, Kilchert, L, Bleeker, O F., “Europe’s Emerging Trajectory-Based ATM Environment”, in Proceedings of Digital Aviation System Conference 22, 2003.
- 68.Bianco, L, Dell'Olmo P, & Odoni, A R, “New Concepts and Methods in Air Traffic Management”, Springer, Berlin, 1997.
- 69.Majumdar, A, Ochieng, W Y, “The factors affecting air traffic controller workload. A multivariate analysis based upon simulation modelling of controller workload”, from Proceedings of 81st Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington DC, 2001.
- 70.Fitts, P M, “Human Engineering for an effective air-navigation and traffic-control system”, Columbus Ohio: Ohio State University Research Foundation, 1951.
- 71.Cook, A, “European Air Traffic Management. Principles, Practice and Research”, Hampshire, England: Ashgate, 2007.
- 72.Archambault, N, “Potentiality of computer-assisted speed regulations”, LOG (DGAC/DTI/SDER), Toulouse, France, 2005.

73. Idris, H, Vivona, R, Garcia-Chico, J L, “Trajectory- Oriented Approach to Managing Traffic Complexity. Operational Concept and Preliminary Metrics Definition”, NASA, L3 Communications, Billerica, Massachusetts, April 2008.
74. Jardin, M. R., “Real-Time Conflict-Free Trajectory Optimization,” in 5th USA/Europe ATM 2003 R&D Seminar, Budapest, Hungary, 23-27 June 2003.
75. Tomlin, C, Bayen, A, Ye Y & Zhang, J, “MILP formulation and polynomial time algorithm for an aircraft scheduling problem”, in Proceedings of the 42nd IEEE Conference on Decision and Control, Maui, Hawaii USA, December 2003.
76. Erickson, J, “Algorithms Course Materials. Lecture 29: NP-Hard Problems”, 2009. [Online]. Available: <http://www.cs.uiuc.edu/~jeffe/teaching/algorithms/>. [Accessed 1 Aug 2012].
77. Bayen, A M, “Computational Control Of Networks Of Dynamical Systems: Application To The ational Airspace System”, Stanford University, 2004.
78. Raidl, G R & Puchinger, J, “Combining (Integer) Linear Programming Techniques and Meta-heuristics for Combinatorial Optimization”, Studies in Computational Intelligence (SCI) 114, p. 31–62, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.
79. EUROCONTROL, “Trajectory Negotiation in a Multi- sector Environment”, Programme for Harmonised ATM Research in Europe (PHARE), Brussels, Version 1.1 June 1998.
80. Visser, H G “Airplane Performance Optimisation”, in Encyclopaedia of Aerospace Engineering, John Wiley and Sons, Ltd, 2010.
81. Barnier, N & Allignol, C “Trajectory De-confliction with Constraint Programming”, The Knowledge Engineering Review, Cambridge University Press, p. 1–15, 2009.
82. Jardin, M R, “Real-Time Conflict-Free Trajectory Optimization”, from Proceedings of 5th USA/Europe ATM 2003 R&D Seminar, Budapest, Hungary, 23-27 June 2003.
83. Blajev, T, “Wake Vortex Turbulence”, Hindsight – EUROCONTROL, pp. 18 - 20, January 2006.

84. ICAO “Doc. 4444 ATM/501, Air Traffic Management: Procedures for Navigation Services”, vol. ATM/501, 2007.
85. Globus, A, Jacoby, R H, Prevot, T, Wong, J K, “Rapid Generation and Utilization of Four Dimensional Trajectories for Air Traffic Control and Management Applications in MACS”, from Proceedings of AIAA InfoTech 2011.
86. Wilson, I A B, “4-Dimensional Trajectories and Automation Connotations and Lessons learned from past research”, from Proceedings of Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference – ICNS ’07, USA, 2007.
87. EUROCONTROL, “User Manual for the Base of Aircraft Data (BADA) Revision 3.8”, Brussels, Belgium, 2000.
88. EUROCONTROL, BADA – Aircraft Performance Operational File (A388_.OPF), Brussels, Belgium, 2011.
89. Ramasamy S, Sabatini R, Liu Y, Gardi A, “A Novel Flight Management System for SESAR Intent Based Operations”, from Proceedings of European Navigation Conference 2013, Vienna, Austria, 2013.