

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**ФАКУЛЬТЕТ АЕРОНАВІГАЦІЇ, ЕЛЕКТРОНІКИ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ**  
**КАФЕДРА АЕРОНАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМ**

**ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ**

Завідувач кафедри

д-р техн. наук, проф.

\_\_\_\_\_ В.Ю. Ларін

«\_\_»\_\_\_\_\_2021 р.

**ДИПЛОМНА РОБОТА**  
**(ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)**  
**ВИПУСКНИКА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА**  
**ЗА ОСВІТНЬО-ПРОФЕСІЙНОЮ ПРОГРАМОЮ**  
**«СИСТЕМИ АЕРОНАВІГАЦІЙНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ»**

**Тема: «Розрахункова модель часу затримки прибуття літака у аеропорт  
призначення»**

**Виконав:** \_\_\_\_\_ С.М. Тарасевич

**Керівник: д-р техн. наук, проф.** \_\_\_\_\_ В.В. Конін

**Нормоконтролер** \_\_\_\_\_ Т.Ф.Шмельова

**Київ 2021**

# НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет аеронавігації, електроніки та телекомунікацій  
Кафедра аеронавігаційних систем  
Спеціальність 272 «Авіаційний транспорт»  
ОПП «Системи аеронавігаційного обслуговування»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Ларін В.Ю.

\_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2021р.

## ЗАВДАННЯ

### на виконання дипломної роботи

\_\_\_\_\_ Тарасевича Станіслава Миколайовича \_\_\_\_\_

1. Тема дипломної роботи: «Розрахункова модель часу затримки прибуття літака у аеропорт призначення»

затверджена наказом ректора від 22.10.2021 р. № 2339/ст.

2. Термін виконання роботи: з 6.10.2021 по 12.12.2021

3. Вихідні дані до роботи: апаратно–програмний комплекс для обробки відкритих інформаційних баз даних системи ADS-B. Отримана після обробки інформація застосовується в середовищі Matlab для обрахунку і візуального (графічного) представлення різноманітних параметрів.

4. Зміст пояснювальної записки:

- огляд загальних положень відносно причин та наслідків затримок літаків;
- залежні кооперативні системи спостереження;
- математична модель-основа програми;
- модель часу затримки прибуття літака в аеропорт призначення.

5. Перелік обов'язкового графічного (ілюстративного) матеріалу: дані пояснювальних матеріалів, рисунки результатів проведених досліджень, таблиці, додатки.

#### 6. Календарний план–графік

№ пор.	Завдання	Термін виконання	Відмітка про виконання
1.	Вибір напрямку дослідження.	01.09.21 р. – 06.10.21 р.	Виконав:
2.	Огляд загальних положень відносно причин та наслідків затримок літаків	06.10.21 р. – 22.10.21 р.	Виконав:
3.	Відбір та формування даних для обробки.	22.10.21 р. – 24.10.21 р.	Виконав:
4.	Огляд загальних характеристик залежних кооперативних систем спостереження ADS-B, ADS-C.	24.10.21 р. – 5.11.21 р.	Виконав:
5.	Створення та моделювання програмної частини в середовищі Matlab. Аналіз і обробка результатів.	5.11.21 р. – 29.11.21 р.	Виконав:
6.	Оформлення пояснювальної записки та інших документів	29.11.21 р. – 07.12.21 р.	Виконав:
7.	Підготовка документів та презентації	07.12.21 р. – 14.12.21 р.	Виконав:

7. Дата видачі завдання: "06" жовтня 2021 р.

Керівник дипломної роботи \_\_\_\_\_ Конін Валерій Вікторович

Завдання прийняв до виконання \_\_\_\_\_ Тарасевич Станіслав Миколайович

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломної роботи магістра «Розрахункова модель часу затримки прибуття літака у аеропорт призначення»: 104 с., 31 рис., 4 дод., 64 джерела.

Об'єкт дослідження – повітряні рейси.

Мета роботи – створити програму для визначення часу затримки літальних апаратів використовуючи дані ADS-B та програмне забезпечення Matlab.

Мета дослідження – проаналізувати отримані експериментальні дані точності функціонування програми для обчислень з різними даними та додатковими умовами. З висновками щодо подальшого використання цієї системи в авіації.

В першому розділі дипломної роботи наведені основні причини затримок рейсів та їх наслідки на основі аналітичного обзору. Вплив тенденцій розвитку/стагнації аеропортових комплексів та повітряного простору на зменшення (або збільшення) пропускної здатності і затримок.

У другому розділі розглянуто залежні кооперативні системи спостереження такі як: ADS-B, ADS-C (додатково розглянуто систему MLAT). Вплив систем на отримання достовірної і своєчасної інформації необхідної для безпечної навігації та збільшення пропускної здатності (зменшення часу затримок).

У третьому розділі описано математичну модель-основу програми, яка створена для прорахунку часу затримок літака на маршруті та різноманітних відхилень траєкторій польоту в залежності від умов.

У четвертому розділі наведено результати обчислень з висновками щодо точності отриманих даних та доцільності використання.

ЛІТАК, ЗАТРИМКА, ПОЛОЖЕННЯ, ПРОГНОЗ, ФУНКЦІЯ ЩІЛЬНОСТІ ЙМОІВРНОСТІ, СТАТИСТИЧНИЙ МЕТОД, ТОЧНІСТЬ, НАВІГАЦІЯ.

## **АРКУШ ЗАУВАЖЕНЬ**

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ .....	10
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЗАГАЛЬНИХ ПОЛОЖЕНЬ ВІДНОСНО ПРИЧИН ТА НАСЛІДКІВ ЗАТРИМОК ЛІТАКІВ .....	14
1.1. Основні причини затримок руху літаків.....	14
1.2. Пропускна здатність аеропортів.....	21
1.3. Пропускна здатність повітряного простору .....	28
1.3.1. Основні етапи прогнозування повітряного руху.....	30
1.3.2. Класифікація інструментів, що використовуються для оцінки трафіку та потужності.....	34
1.3.3. Інформаційні мережеві засоби .....	34
1.3.4. Інструменти моделювання.....	38
1.3.5. Методика обчислення потужності секторів .....	40
1.3.6. Застосування методів і засобів прогнозування пропускної спроможності в аеронавігаційній системі України .....	42
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1 .....	45
РОЗДІЛ 2. ЗАЛЕЖНІ КООПЕРАТИВНІ СИСТЕМИ СПОСТЕРЕЖЕННЯ.....	46
2.1. Алгоритм функціонування системи ADS-C.....	49
2.1.1. Види застосування .....	50
2.1.2. Функціональні можливості ADS-C .....	51
2.1.3. Звіти ADS-C .....	52
2.2. Алгоритм функціонування системи ADS-B .....	53
2.2.1. Режим S .....	54
2.2.2. UAT.....	55
2.2.3. ОБЧ-лінія цифрового зв'язку режиму 4.....	56
2.2.4. Функціональні характеристики ADS-B .....	57
ВИСНОВКИ ДО РОЗІДЛУ 2 .....	61
РОЗДІЛ 3. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ-ОСНОВА ПРОГРАМИ .....	62
3.1. Поліноміальна модель руху літака.....	62
ВИСНОВКИ ДО РОЗІДЛУ 3 .....	69

РОЗДІЛ 4. МОДЕЛЬ ЧАСУ ЗАТРИМКИ ПРИБУТТЯ ЛІТАКА В АЕРОПОРТ ПРИЗНАЧЕННЯ.....	70
4.1. Прогноз затримки за моделлю літака .....	70
4.2. Статистичний метод.....	72
4.3. Чисельна демонстрація.....	76
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4 .....	80
ВИСНОВКИ ДО ДИПЛОМНОЇ РОБОТИ .....	82
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ .....	85
ДОДАТОК А.....	91
ДОДАТОК Б.....	98
ДОДАТОК В .....	99
ДОДАТОК Г .....	103

## ВСТУП

**Актуальність дослідження.** Затримки літаків є серйозною проблемою в сучасній системі повітряного руху. Постійно зростаюча кількість користувачів повітряного простору різко збільшує пропускну здатність аеропортових споруд та мережі маршрутів, що в свою чергу призводить до різкого збільшення навантаження усіх систем забезпечення польотів та збільшення ризику помилок (або відхилень) розрахунків/прогнозувань. Відкладення рейсів є результатом значних витрат для органів управління повітряним рухом і додаткових зборів з авіакомпанії, яка враховує вартість квитка.

Затримки можуть бути використані як числова характеристика ефективності повітряного транспорту. Наприклад, у повітряному просторі Євроконтролю середній час затримки на прибуття становить 12,4 хвилини на 2020 рік.

Основними причинами затримок може бути групування за джерелом:

- авіакомпанія. Включає затримки, які виникли стороною, яка доглядає за пасажирами та багажем; завантаження вантажу; обслуговування літаків і рампи; технічні проблеми та налаштування обладнання літака; пошкодження літаків; льотні операції та екіпаж.
- аеропорт. Містить затримки, спричинені засобами аеропорту; обмеження в аеропортах призначення та відправлення.
- в дорозі. Управління потоками повітряного руху (ATFM) через вимоги управління повітряним рухом (ATC) на маршруті; Персонал АТЦ та обладнання АТФМ.
- урядові включають затримки з причин безпеки та імміграції.
- погода.
- різне.
- реакційність є результатом несвоєчасного прибуття літака, пасажирів, вантажу або екіпажу.



Найбільше затримок у 2020 році виявився аеропортами Лондона Станстед (EGSS), із середньою затримкою на прибуття 22,9 хвилини та Барселони (LEBL) – 22,4 хвилини.

Існують різні сценарії прогнозування затримок повітряного руху. Деякі з них базуються на використанні кінематичної моделі літака для прогнозування траєкторії за виміряною швидкістю, кутовою орієнтацією, заздалегідь спланованою траєкторією та деякими умовами навколишнього середовища, такими як погодні умови. Інші підходи використовують статистичний аналіз доступних рядів даних для категоризації та прогнозування затримок. У цьому випадку можна використовувати регресійний аналіз, підхід дерев рішень, нейронну мережу, імовірнісне прогнозування або теорію нечітких множин.

Крім того, прогноз затримки повітряного руху може характеризувати експлуатаційні характеристики певного обсягу повітряного простору, аеропорту, маршрутів або всієї системи повітряного руху.

Дані прогнозу погоди для аеропортів-інтендантів можуть покращити ефективність прогнозування через великий вплив погоди на формування затримок.

Продуктивність алгоритму прогнозування повітряного руху підтримує ефективність управління повітряним рухом.

Таким чином, дослідження та розробка розрахункової моделі часу затримки прибуття літака у аеропорт призначення – є науково-актуальною та своєчасною задачею.

У роботі використовується функція лінійної регресії та поліноміальна модель для детальної обробки статистичних даних та створення легкого методу обчислювальної потужності для прогнозування затримки літака на основі поточного розташування літака та відомої заздалегідь визначеної траєкторії.

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ

**ADS-B** – Automatic Dependent Surveillance-Broadcast - автоматичне залежне спостереження - ширококомове

**AFIS** – Aerodrome Flight Information Service - польотно-інформаційне обслуговування на аеродромі

**AFIZ** – Aerodrome Flight Information Zone - аеродромна зона польотної інформації

**AFTN** – Aeronautical Fixed Telecommunication Network - мережа авіаційного фіксованого електрозв'язку

**AFUA** – Advance Flexible Use of Airspace - вдосконалене гнучке використання повітряного простору

**AIM** – Aeronautical Information Management - управління аеронавігаційною інформацією

**AIRAC** – Aeronautical Information Regulation and Control - регламентація та контролювання аеронавігаційної інформації

**AIS** – Aeronautical Information Service - Обслуговування аеронавігаційної інформації

**AMAN** – Arrival MANager - система менеджменту прибуття

**AMC** – Airspace Management Cell - орган менеджменту повітряного простору

**AMHS** – Aeronautical Message Handling System - система обробки повідомлень ОПР

**APM** – Approach Path Monitoring - моніторинг траєкторії польоту на глісаді

**APV** – Approach Procedures with Vertical guidance - заходження на посадку з вертикальним наведенням

**APW** – Area Proximity Warning - попередження про наближення до зони обмеження польотів

**ARO** – Air Traffic Service Reporting Office - пункт збору донесень щодо ОПР

**ASBU** – Aviation System Block Upgrades - вдосконалення блоків авіаційних систем

**ASM** – Airspace Management - управління використанням (менеджмент) повітряного простору

**ASTERIX** - All-purpose STructured Eurocontrol Surveillance Information Exchange - протокол Євроконтролю щодо обміну радіолокаційними даними

**ATCO** – Air Traffic Controller - диспетчер повітряного руху

**ATFCM** – Air Traffic Flow and Capacity Management - організація потоків повітряного руху та менеджмент пропускної спроможності

**ATIS** – Automatic Terminal Information Service - автоматичне термінальне інформаційне обслуговування

**ATM** – Air Traffic Management - організація повітряного руху

**ATS** – Air Traffic Service - обслуговування повітряного руху

**ATZ** – Aerodrome Traffic Zone - зона аеродромного руху

**AUP** – Airspace Use Plan message - план використання повітряного простору

**A-CDM** – Airport Collaborative Decision Making - система спільного прийняття рішень в аеропортах

**A-RNP** – Advanced Required Navigation Performance - вдосконалені необхідні навігаційні характеристики

**BFD** – Basic Flight Data message - повідомлення щодо основних польотних даних

**CFD** – Change to Flight Data message - повідомлення щодо зміни польотних даних

**CPDLC** – Controller Pilot Data Link Communication - дуже високочастотна лінія передачі даних для зв'язку "диспетчер - пілот"

**CTA** – Control Area - диспетчерський район

**CTR** – Control Zone - диспетчерська зона

**DLS** – Data Link Service - служба передачі даних

**D-ATIS** – Digital Automatic Terminal Information Service - автоматичне надання термінальної інформації за цифровими каналами передавання даних

**D-VOLMET** – Digital Routine voice broadcasts of MET information for aircraft in flight - автоматичне надання метеорологічної інформації на маршруті за цифровими каналами передавання даних

**EAD** – European AIS Database - Загальноєвропейська база даних CAI

**ERNIP** – European Route Network Improvement Plan - Європейський план вдосконалення маршрутів

**FL** – Flight Level - рівень польоту

**FMP** – Flow Management Position - орган організації потоків повітряного руху

**FMTP** – Flight Message Transfer Protocol - протокол передачі повідомлень щодо виконання польотів

**FUA** – Flexible Use of Airspace - гнучке використання повітряного простору

**GANP** – Global Air Navigation Plan - глобальний аеронавігаційний план

**GNSS** – Global Navigation Satellite System - глобальна навігаційна супутникова система

**GPS** – Global Positioning System - система глобального позиціонування

**MLAT** – MultiLATERation - багатопозиційна система спостереження

**NOTAM** – Notice To AirMen - повідомлення для пілотів

**OLDI** – On-Line Data Interchange - протокол обміну даними ОПП

**TMA** – Terminal area - термінальний диспетчерський район

**TWR** – Tower - аеродромна диспетчерська вишка

**UIR** – Upper Flight Information Region - верхній район польотної інформації

**UTA** – Upper Control Area - верхній диспетчерський район

**UUP** – Update Airspace Use plan - оновлений план використання повітряного простору

**WAM** – Wide Area Multilateration - широкозонна багатопозиційна система спостереження

**WGS** – World Geodetic System - всевітня геодезична система

**ОПП** – Обслуговування Повітряного Руху

**ОППР** – Організація потоків повітряного руху

**РПІ** – Район Польотної Інформації

**САІ** – Служба Аеронавігаційної інформації

**ЦПІ** – Центр Польотної Інформації

## **РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЗАГАЛЬНИХ ПОЛОЖЕНЬ ВІДНОСНО ПРИЧИН ТА НАСЛІДКІВ ЗАТРИМОК ЛІТАКІВ**

### **1.1. Основні причини затримок руху літаків**

#### **Обмеження з управління повітряним рухом (УПР)**

Починаючи з 80 -х років, пасажиропотік повітря зростає з півмільярда до понад трьох мільярдів пасажирів на рік. Це велика кількість літаків у небі, які перевозять багато людей у будь -якій точці. І більшість цього трафіку зосереджена лише в декількох вузлах, таких як Лондон, Париж та Нью -Йорк. Подальші рейси також супроводжуються більшими обмеженнями та правилами, коли авіакомпанії часто змінюють маршрути в останню хвилину через погоду та струмені літаків. Останнє ускладнюється через намагання авіакомпаній бути економічно ефективними та оптимізувати свою паливну ефективність.

Інше питання - інфраструктура:

Деякі райони світу не мають такого радіолокаційного покриття, як Європа чи США, наприклад. Це змушує регулятори повітряного руху вимагати більших періодів часу між зльотами та посадками для забезпечення безпеки, що легко перетворюється на ланцюгову реакцію, якщо один або кілька рейсів затримуються.

#### **Несприятливі погодні умови**

Різні аеропорти мають різні стандарти щодо затримок, спричинених несприятливими погодними умовами, які зазвичай визначаються національними регулюючими органами, такими як Федеральне авіаційне управління (FAA) у США, наприклад. Несприятливі погодні умови часто згадуються як одна з основних причин затримок рейсів, проте вони не такі поширені, як думає більшість людей. Це тому, що навіть якщо погода не виглядає оптимальною, це не означає, що рейс не можна виконувати вчасно.

Коли ми говоримо про несприятливі погодні умови, що впливають на виконання польоту, ми в основному говоримо про екстремальні погодні умови - наприклад, торнадо, хуртовину, урагани тощо - які зазвичай становлять лише близько 6% усіх затримок польоту.

На практиці це означає, що хоча авіакомпанії часто називають погану погоду причиною затримки, це найчастіше не фактична причина. Це також те, чому ви можете мати право на компенсацію, навіть якщо авіакомпанія повідомила вам, що рейс затримується через негоду.

Для того, щоб визначити, чи дійсно погода стала причиною затримки рейсу, ми розглянемо звіти METAR. Останні - це формат звітування про погоду, що використовується в авіації. Ці звіти містять різну інформацію, включаючи температуру, точку роси, напрямок та швидкість вітру, опади, хмарність, видимість та атмосферний тиск.

Інформація закодована, її потрібно розшифрувати та проаналізувати, щоб зрозуміти, чи міг рейс виконуватись вчасно. Ось чому пасажирів дозволяють Службі вирішувати їхні претензії: у нас є технічна експертиза, щоб перевірити, чи не стикався ваш рейс з несприятливими погодними умовами, чи ні, і юридична команда, яка може аргументувати ситуацію, коли авіакомпанія не співпрацює.

### **Зіткнення з птахами**

Іноді політ може затримуватися в результаті зіткнення літака з твариною, що перебуває в повітрі (зазвичай це птах). В авіації такі події називають "ударами птахів" ("birdstrike").

На відміну від того, що ви можете очікувати, вони не такі вже й рідкісні випадки: лише в США в середньому щорічно відбувається близько 13 000 інцидентів із птахами.

Більшість таких ударів відбувається під час зльоту та посадки. Хоча вони, як правило, завдають невеликої шкоди, вони все ж розцінюються як загроза безпеці. Удари птахів викликають затримки рейсів.

Протокол безпеки вимагає від авіакомпаній виконання певного набору процедур після удару птаха, що може вплинути на його своєчасну роботу. Це може призвести до того, що називається "затримкою обертання" або "ефектом удару".

### **"Ефект удару" через затримку літака**

Ефект удару є основною причиною так званої "затримки обертання" - тобто, коли рейс затримується через запізнення літака.

Оскільки авіакомпанії оптимізують використання свого флоту, нерідкі випадки, коли ваш рейс може затримуватися, так як літак, який повинен виконувати ваш рейс, затримувався на своєму попередньому маршруті. Важливо, однак, зазначити, що "ефект від удару" автоматично не звільняє перевізника від відповідальності щодо виплати компенсації згідно з ЕС261/2004.

### **Страйки робітників**

Так само, як і в більшості галузей, персонал авіакомпанії може вирішити оголосити страйк, щоб збільшити робочу силу, та розпочати переговори зі своїм роботодавцем. Вплив цих страйків може бути мінімальним, так само як він може повністю скалічити бізнес та спричинити величезні витрати авіакомпанії.

Наприклад, у вересні 2019 року пілоти British Airways вирішили оголосити 48 -годинний страйк, який торкнувся сотень тисяч пасажирів. Для багатьох ці страйки не зрозумілі і викликають хвилю невдоволення (і це справедливо) серед постраждалих пасажирів.

Однак, якщо розглядати динаміку галузі, яка майже повністю спирається на робочу силу фахівців, стає зрозуміліше, що персонал має значну кількість можливостей для ведення переговорів.



На перший погляд, страйк вважається надзвичайною обставиною, і компенсація не вимагається, якщо ваш рейс був порушений. При цьому є певні винятки, які слід враховувати. Якщо рейс не припадає на період негайного страйку, але його переривають, то перевізник не може посилатися на пункт про надзвичайні обставини і повинен задовольнити вашу претензію.

### **Очікування з'єднання пасажирів**

У деяких випадках авіакомпанія може дещо затримати рейс, щоб сіли пасажирів, які сполучаються з різних рейсів.

Як загальне ефірне правило, перевізники не будуть чекати на з'єднання пасажирів. Однак, схоже, вони підходять до цього в кожному конкретному випадку.

Наприклад, якщо немає інших пасажирів, які постраждають і не пропустять їхнє з'єднання, або якщо сумки пасажирів уже завантажені, і розвантаження їх займе більше часу, ніж очікується на посадку людей. В такому разі відповідальний офіцер може вирішити почекати їх. Інші обставини, які можуть змусити рейс чекати на з'єднання пасажирів – це якщо час їх слота був відсунутий і все одно затримався.

### **Очікування багажу**

Коли пасажирів декількома рейсами подорожують із зареєстрованим багажем, його також слід перенести на наступний рейс. У деяких випадках це може бути причиною невеликої затримки рейсу, оскільки наземне обслуговування потребує трохи більше часу на передачу багажу.

Так само, як і очікування пасажирів, це буде розглянуто в кожному конкретному випадку. При цьому малоімовірно, що рейс затримається на кілька годин, оскільки наземне обслуговування передає багаж.

Комерційні авіакомпанії не тільки перевозять пасажирів та їх багаж. Фактично вантаж становить від 5 до 10% їх загального доходу.

Одним з найпоширеніших прикладів є Поштова служба США, яка орендує вантажні приміщення 15 000 із 25 000 комерційних пасажирських рейсів. Отже, рейс іноді може затримуватися через запізнення прибуття вантажу.

Знову ж таки, ми не говоримо про велику затримку в 4 години, спричинену затримкою вантажу, але нерідкі випадки, коли невелике відхилення від графіка є результатом саме цього.

### **Очікування екіпажу**

Як правило, рейс не може злетіти, якщо він не відповідає необхідній кількості екіпажу, яка становить десь близько одного бортпровідника на 50 місць. Насправді пасажирів не можуть почати посадку на борт, якщо ця вимога не буде виконана.

В результаті рейс може бути затриманий, якщо екіпаж ще не прибув (що не так вже й рідко).

Однак для рейсів, які вилітають з вузла авіакомпанії або, як правило, з завантаженого аеропорту, такого як Париж або Лондон, це не так часто, оскільки авіакомпанія, ймовірно, має екіпаж. Однак у деяких інших ситуаціях існує ймовірність того, що екіпаж може прибути з іншого пункту призначення, і якщо цей рейс затримається, це зробить і екіпаж.

Неможливо затримати рейс на кілька годин, якщо екіпаж запізнився. Оскільки ці ситуації підпадають під контроль перевізника, пасажирів мають право вимагати компенсації.

### **Дотримання вимог щодо відпочинку льотного екіпажу**

Встановлені правила, які гарантують, що члени екіпажу, тобто пілоти та стюардеси, добре відпочивають перед польотом. Іноді екіпаж може збільшити свій робочий час через труднощі в плануванні або затримку обертання (рейс, який був затриманий через пізній прибуття попереднього рейсу).

У цих ситуаціях, якщо авіакомпанія не зможе замінити екіпаж, є велика ймовірність, що літак буде приземлений.

Як і в попередньому випадку, ці обставини перебувають під контролем перевізника (тобто забезпечення відповідного планування, наявність екіпажу в режимі очікування тощо) і не звільняють їх від відповідальності. Отже, згідно з ЕС261/2004, якщо ваш рейс був затриманий через те, що екіпаж не розрахував свій час, ви маєте право на компенсацію.

### **Очікування харчування**

Ще одна менш відома причина, яка може спричинити затримку рейсу - очікувати на харчування. Включає не лише продукти харчування, а й посуд, сервісний посуд, гігієнічні та інші предмети для допомоги пасажиром.

Все вище перелічене управляється агентом громадського харчування, який відповідає за всі аспекти діяльності лінії громадського харчування, такі як завантаження та розвантаження обладнання та витратних матеріалів, керування великими вантажівками для громадського харчування, управління запасами тощо. Очевидно, що існує багато переміщення, і аспекти іноді йдуть не так, як планувалося, що може спричинити додаткову затримку.

### **Отримання дозволу**

Список речей, які повинні відбутися до того, як двигуни літака навіть увімкнуться, довгий. Підводячи підсумок, деякі основні події, які відбуваються, це:

- Пілоти готують літак до зльоту.
- Екіпаж зачиняє двері, і здійснюється зв'язок з Управлінням повітряного руху (АТС).
- УВД або негайно, або через деякий час дасть дозвіл на відштовхування та запуск.
- АТС визначає руліжну доріжку, однак пілоти тримаються подалі від злітно - посадкової смуги.

- Нарешті, УВД дає дозвіл вийти на злітно -посадкову смугу, і літак починає зліт.

Під час підготовки до кожного кроку було зроблено багато речей, які визначатимуть, чи зможе літак злетіти вчасно. Наприклад, диспетчерський та експлуатаційний контроль авіакомпанії вирішуватимуть і плануватимуть маршрут, яким пройде літак, враховуючи погодні умови, ємність палива, навантаження пасажирів тощо.

Ці вимоги безпеки поділяються на чинники, які перебувають під контролем авіакомпаній, і на тих, що ні. Це може вплинути на те, чи відповідає затримка рейсу відповідно до EC261/2004 для компенсації.

### **Підготовка літака**

Підготовка до зльоту вашого літака починається, як тільки він приземляється з попереднього польоту.

Деякі з основних видів діяльності:

- Підключення літака до наземної системи живлення, щоб забезпечити живлення для змінного струму
- Завантаження громадського харчування та утилізація вживаних віз для камбузів
- Прибирання туалетів і всього літака
- Заправка паливом
- Підготовка до відштовхування

Є багато речей, які можуть затримати підготовку літака, а отже, його зліт вчасно. Щось таке просте, як несвоєчасне очищення літака через брак персоналу, може вплинути на час посадки, що може призвести до того, що політ втратить свій часовий слот тощо. Досить рідко (але не неможливо) затримка рейсу на кілька годин через проблеми, пов'язані з підготовкою.

### **Усунення механічної проблеми**

Літаки підлягають дуже суворому технічному обслуговуванню і це необхідна міра.

Нерідкі випадки, коли рейс затримується через технічну проблему, яка вимагає негайної уваги.

Деякі з найбільш поширених проблем, які виникають перед зльотом, пов'язані з:

- Проблеми з паркуванням літаків
- Проблеми з системою зливу води взимку
- Забруднення системи кондиціонування повітря
- Проблеми з лопатями вентилятора двигуна
- Забруднення палива

Що стосується затримок рейсів, спричинених технічною несправністю, яка потребує негайної уваги, Регламент ЄК261/2004 чітко визначає, що пасажери мають право на компенсацію. Так само Департамент транспорту США також заявляє, що технічна проблема, навіть якщо вона надзвичайна, не звільняє перевізника від відповідальності.

### **Дотримання обмежень ваги**

Кожен літак має максимальну злітну масу (MTOW), що є загальною вагою вантажу, пасажирів та їх багажу, палива, харчування тощо. Якщо літак перевищує цю вагу, він не може злетіти.

Це не постійне значення - воно залежить від таких речей, як атмосферні умови та висота. Отже, літак, що злітає на рівні моря, матиме інший MTOW, ніж літак, що злітає на більшій висоті.

Це ще одна причина затримки, або ще гірше - відмова у посадці. На щастя, так само, як і технічна проблема, вона не кваліфікується як надзвичайні обставини, і авіакомпанія повинна виплатити компенсацію.

## **1.2. Пропускна здатність аеропортів**

В умовах сучасності повна інтеграція будь-якої країни в сполучену міжнародну транспортну систему неможлива без розвитку та оптимізації галузі

авіаперевезень. Тоді як якість, різноманітність, оперативність та вартість авіатранспортних послуг безпосередньо залежать від розвитку транспортної інфраструктури, одним із ключових елементів якої є аеропорти (та сполучені з ними вузли) [1,2].

Аеропорт як комплекс споруд, призначених для оптимізованого обслуговування повітряних суден, є одночасно і початковим пунктом, і завершальною сходинкою авіатранспортного процесу. А у окремих випадках – і пунктом транзитного очікування.

Аеропорт – це глобальне поле концентрації та координації дій усіх основних (та другорядних) постачальників авіатранспортних послуг: авіаперевізників, авіатранспортних підприємств і аеронавігаційних служб. Що обумовлює високу значущість аеропортів в процесі ефективної організації транспортного обслуговування пасажирів та вантажів.

Виступаючи в ролі оператора транспортного процесу, аеропорт надає певний перелік послуг для усіх користувачів різних рівнів авіатранспортної системи: для авіакомпаній (технічне обслуговування (відповідно до норм міжнародної стандартизації), стоянка, заправка (дозаправка), метеорологічні та навігаційні послуги тощо), для пасажирів (зали очікування (та VIP зали), камери схову, ресторани, магазини, лінії проходження контролю тощо); а також послуги контролю, що відповідають інтересам та стандартам безпеки держави (митний контроль, аналіз пасажиропотоку, повне забезпечення безпеки польотів та ін.). Перелік цих послуг та їх ефективність з точки зору сервісу та економіки насамперед визначається циклічністю розвитку аеропортових комплексів.

Разом з тим, майже не вивчена проблема управління аеропортовими комплексами за стадіями життєвого циклу. Також недослідженими залишаються питання, що стосуються практичного застосування базису такого типу управління. Одним із головних показників складу якого є «пропускна здатність аеропорту», визначення якого в довгостроковій перспективі надає змогу пролонгації позитивної динаміки у розвитку аеропортової мережі. Аеропорт в

першу чергу призначений для прийому та відправки різних повітряних суден, а також обслуговування повітряних перевезень (транзитів) і має для цих цілей необхідне обладнання (усіх класифікацій), авіаційний обслуговуючий персонал та інших працівників системи [2,3,4].

Аеропорт – це багатофункціональне авіатранспортне підприємство, що є наземним осередком будь-якої авіаційної транспортної системи (яка в свою чергу забезпечує зліт і посадку повітряних суден та їх повне обслуговування, прийом і відправлення пасажирів, багажу користувачів, вантажів та пошти), а також створює необхідні умови для функціонування усіх авіакомпаній, державних органів регулювання порядку, митниці, сприяє зросту ділової активності. Що, насамперед, спрямовано на покращення рівня обслуговування пасажирів та інших клієнтів (споживачів авіа послуг) і забезпечення економічної стабільності аеропорту.

Аеропорт можна розглядати як виробничу систему, яка складається з аеродромного, перонного, аеровокзального й аеронавігаційного комплексів, а також зведених допоміжних підрозділів, що забезпечують повноцінне функціонування системи. Таким чином, розглядаючи аеропорт як окрему складну транспортно-технологічну систему, бачимо, що, як і для всіх інших систем, діяльність усіх аеропортів підпорядкована законам циклу. Існуючий циклічний процес зворотних та незворотних проявів зовнішнього середовища аеропортів суттєво впливає на ділову активність і їх економічний розвиток, що зумовлює потребу у розробці методики визначення стадії життєвого циклу аеропорту і урахування результатів обчислень при виробленні стратегії розвитку усієї системи. Зазвичай використовуються окремі поєднані частини теорії циклів, що застосовуються в залежності від тієї або іншої точки зору розробника і загального позиціонування політики управління аеропортовим комплексом.

Зрозуміло, що у такому випадку не йде мова про дотримання принципу забезпечення повної системності, оскільки спостерігається випадкове поєднання безлічі циклів та ресурсів, що знаходяться у розпорядженні організації (в даному

випадку аеропорту) у тому числі таких як: трудові, матеріальні, природні, фінансові та технічні [5,7].

Цикл існування аеропортового комплексу на пряму залежить від розвитку динамічних характеристик його ресурсного потенціалу (економічно-оборотного, інтелектуального та технологічного капіталу, виконаних послуг тощо), а також від рівня ефективності керування процесами відтворення та оновлення усієї інфраструктури аеропорту відповідно до стадій циклу існування.

Поміж різних думок при визначенні керування циклом існування аеропорту виділено два головних підходи – органічний (організаційно-оптимізаційний) і матеріальний (за циклом відновлення ресурсів). Проте, дотримання виключно принципів органічного підходу зовсім не забезпечує відтворення всіх процесів авіакомпанії, оскільки вона виступає в якості споглядача зовнішніх впливів та факторів, залежна від їх зміни.

Матеріальний підхід за своєю методикою протилежний органічному і заснований не на спогляданні, а на повному управлінні середовищем, з метою виконання запланованих цілей (на базі керування ресурсами та їх комплексно-динамічними характеристиками). Збільшення циклу існування комплексів аеропортів і забезпечення зростання виявляється повністю залежним від оновлення ресурсів та того, наскільки новація (що лежить у її основі) спроможна забезпечити прибутково-валідне використання ресурсів у межах середовища, що було підтверджено під час практичного використання. Аеропорти, які знаходяться на етапі «зросту» або «стагнації», оновлюють технології, покращують інфраструктуру, збільшують перелік послуг, змінюють види діяльності підрозділів, чим продовжують цикл існування переходом у стадію «оновлення» [8].

Пропускна здатність аеропорту (за кількістю перевезених пасажирів на рік) дорівнює:

$$W_n = q \cdot \theta_r^{max} \frac{T_\delta \cdot 365}{k_\delta \cdot k_r}$$



де  $q$  – середня планована кількість пасажирів на один літак;

$\theta_r^{max}$  – пропускна здатність аеродрому (зльотів і посадок літаків за годину);

$T_\delta$  – кількість годин роботи аеропорту на добу;

$k_\delta$  – коефіцієнт добової нерівномірності руху літаків (відношення максимальної добової кількості зльотно-посадкових операцій до середньодобової за рік);

$k_r$  - коефіцієнт часової нерівномірності руху літаків, тобто відношення максимальної часової кількості злітно-посадкових операцій до середньогодинної за максимальну добу.

Середня планована кількість пасажирів на один літак визначається за формулою:

$$q = S \sum w_i \cdot v_i \cdot j_i$$

де  $w_i$  – співвідношення частоти руху літаків різних типів;

$v_i$  – пасажиромісткість літаків;

$j_i$  - коефіцієнт, що враховує відсоток комерційного завантаження (як правило  $j_i = 0,75$ ).

Прогнозування  $p_i$  і  $m_i$  на перспективу 10-15 років є доволі складним процесом, тому буде більш правильно визначати величину  $q$  на підставі усіх статистичних даних за декілька років [7,8].

Пропускна спроможність аеропорту  $\theta_r^{max}$  залежить насамперед від наступних факторів: злітно- посадкові характеристики літаків, що визначають час займання злітно-посадкової смуги (ЗПС); інтервали часу між злітно-посадковими маневрами (що встановлені для забезпечення максимальної безпеки польотів), умови обслуговування багажів і вантажу, можливості контролю безпеки польотів і обслуговувати (забезпечити своєчасний сервіс) пасажирів.

Кількість годин роботи аеропорту на добу  $T_\delta$  головним чином залежить від інтенсивності потоку рейсів, кількості транзитного руху, розташування аеропорту та навколишня інфраструктура (відстань та транзит до міста). [9]

Так, при наявності інтенсивного нічного руху і відсутності будь-якого обмеження часу роботи аеропорту за умовами шуму  $T_\delta = 24$ . В усіх інших

випадках визначення величини  $T_{\delta}$  потребує додаткових статистичних досліджень, або інформації з реєстрів. Одним з головних факторів, що впливають на пропускну здатність аеропортів, є нерівномірний (погано спланований) рух літаків. Тому у доступних методах розрахунку навантажувальної потужності будівель і усіх споруд аеропортів, відслідковування нерівномірності руху літаків будується за допомогою коригуючих коефіцієнтів, які в свою чергу не в повній мірі розкривають усі специфіки процесу прильоту та вильоту літаків протягом певного інтервалу часу. Через це, більш доцільно проводити дослідження нерівномірності руху літаків в аеропортах (та аеропортових зонах) на підставі використання сучасних математичних теорій (теорія ймовірності та математична статистика), які дають можливість з найбільшою вірогідністю та точністю розкрити нюанси технологічних процесів. Для цілей прогнозування усі параметри, що впливають на пропускну здатність аеропорту (за загальною кількістю пасажирів), для кожного окремого об'єкта повинні бути визначені на основі аналізу переміщення літаків та перевезень (враховуючи специфічні місцеві особливості економіки району, умови клімату, географічні та транспортні умови) [9,10,11].

Загальна пропускну здатність аеропорту на довгострокову перспективу (за річною кількістю вантажних перевезень  $W_b$ ) може бути розрахована відповідно до пропускну здатності за кількістю пасажирів  $W_n$ , при використанні методології вирівняних статистичних рядів:

$$W_b = \frac{\sum_{i=1}^n (W_{ni} - \bar{W}_n)(W_{bi} - \bar{W}_b)}{\sum_{i=1}^n (W_{ni} - \bar{W}_n)} (W_n - \bar{W}_n) + W_b$$

$$\text{де } \bar{W}_n = \frac{\sum_{i=1}^n W_{ni}}{n} \quad \text{і} \quad \bar{W}_b = \frac{\sum_{i=1}^n W_{bi}}{n}$$

$n$  - тривалість попереднього досліджуваного періоду в роках

За дослідженнями цього напрямку відомо, що рух потоків вильотів і посадок літаків в різних аеропортах протягом доби підпорядковується найпростішим законам (паусонівським). Тобто, вірогідність прильоту в проміжок часу  $t$  дорівнює кількості  $K$  літаків, та може бути задана формулою:

$$P_k(t) = \frac{(\theta_b^{\text{cep}} \cdot t)^k}{K} \cdot e^{-\theta_b^{\text{cep}} \cdot t}$$

$\theta_b^{\text{cep}}$  – математичне очікування фактору зльотів і посадок літаків (середньо годинна інтенсивність потоку).

Використовуючи це рівняння, можемо визначити значення максимальної часової інтенсивності:

$\theta_b^{\text{cep}} = K$ , при відомому  $\theta_b^{\text{cep}}$ , за принципом утворення практичної неможливості неправдоподібних подій та їх комбінацій. Для точної відповіді у поставленому завданні використовують таблиці розподілу Пуассона.

Середньорічну інтенсивність руху можна визначити за формулою:

$$\theta_b^{\text{cep}} = \frac{\theta_{\delta}^{\text{max}}}{T_{\delta}} \cdot 365$$

Перспективи майбутнього належать аеропортам, які забезпечують повне управління своїми ресурсами за допомогою надання (або продажу) послуг з урахуванням збільшення пропускної спроможності за стадіями циклу існування на основі аналізу глобальних потреб пасажирів і компаній-користувачів. Управління відповідно стадій життєвого циклу є зручним та вигідним інструментарієм для керування аеропортовим комплексом. Зазвичай, теорії управління вивчають комплекси аеропортів в статичному зрізі, а не в довгостроковій перспективі (досить відкритій до впливів зовнішнього середовища). Збір характеристики пасажиропотоку стає основною функцією управлінського менеджменту з точки зору збільшення пропускних можливостей комплексів різних аеропортів, що в свою чергу допомагає наблизити управлінський вплив до реальних умов економіки, потреб пасажирів і компаній-споживачів [12].

Аеропорти, які не враховують ці критерії під час побудови стратегії розвитку, мають цикл існування у рамках одного покоління техніки і технологій. В результаті технічного і «морального» зношення, вони закінчують свою діяльність переходом у стадію стагнації, а потім – кризи [13].

Таким чином, в умовах мінливої зовнішньої та внутрішньої ситуації, аеропорти повинні концентрувати увагу не лише на проблемах, але і виробляти стратегію управління, яка дозволила б корегувати методики відповідно за змінами, що відбуваються в оточенні аеропортів. На підставі чого планувати і розробляти загальні концепції оптимізації та зростання своєї пропускної здатності. При низько ефективному плануванні пропускної здатності аеропорту, невідповідності ринковій ситуації і потребам пасажирів (пасажиропотоку/вантажопотоку) може стати причиною порушення діяльності, викликати спад і занепад виробництва та реалізації послуг підприємств (аеропортів), тим паче, що вплив зовнішнього середовища підсилює небажані фактори, що негативно впливають на загальну динаміку розвитку аеропортів у часовому зрізі. Наявність такого роду проблем у практичних умовах вирізняється швидким скороченням чисельності та загальним спадом інтенсивності діяльності усіх типів аеропортів, змінами в роботі транспортної системи через перерозподіл потокових навантажень. Використання інструментів управління за стадіями циклу існування може підтримати і подовжити процес загального відтворення аеропортових послуг у ланці авіаперевезень. Також дозволяє досягти значно більшого рівня їх економічного розвитку та перейти зі стадії стагнація у стадію «оновлення», відновити цикл існування (подовження терміну на новому рівні).

### **1.3. Пропускна здатність повітряного простору**

Загальновідомим фактом є те, що останніми роками попит на повітряний транспорт значно зростає. Не лише ANSP (постачальник аеронавігаційних послуг), аеропорти та користувачі повітряного простору, а й підрозділи ATFCM (управління потоками повітряного руху та пропускною спроможністю) докладають максимум зусиль, щоб максимально використовувати пропускну здатність повітряного простору. Але все одно з часом потрібно більше [14,15].

На етапі експоненційного зростання перевезень, підвищення безпеки, зменшення затримок та авіаційних випадків, вимагатимуть нових підходів. Щоб вирішити цю проблему та покращити управління ємністю мережі, мінімізуючи обмеження, необхідно розглянути різноманітні рішення ATFCM. Останні узгоджені ЄВРОКОНТРОЛЮ (Європейською організацією з безпеки аеронавігації) шляхи – це ті, які можуть бути пов’язані з підвищенням пропускної здатності та ефективності польоту. Це передбачає планування діяльності на рівні мережі, обробку інформації з різних сховищ, її інтеграцію в єдиний прогноз і, нарешті, пошук рішень для задоволення потреб у потужності.

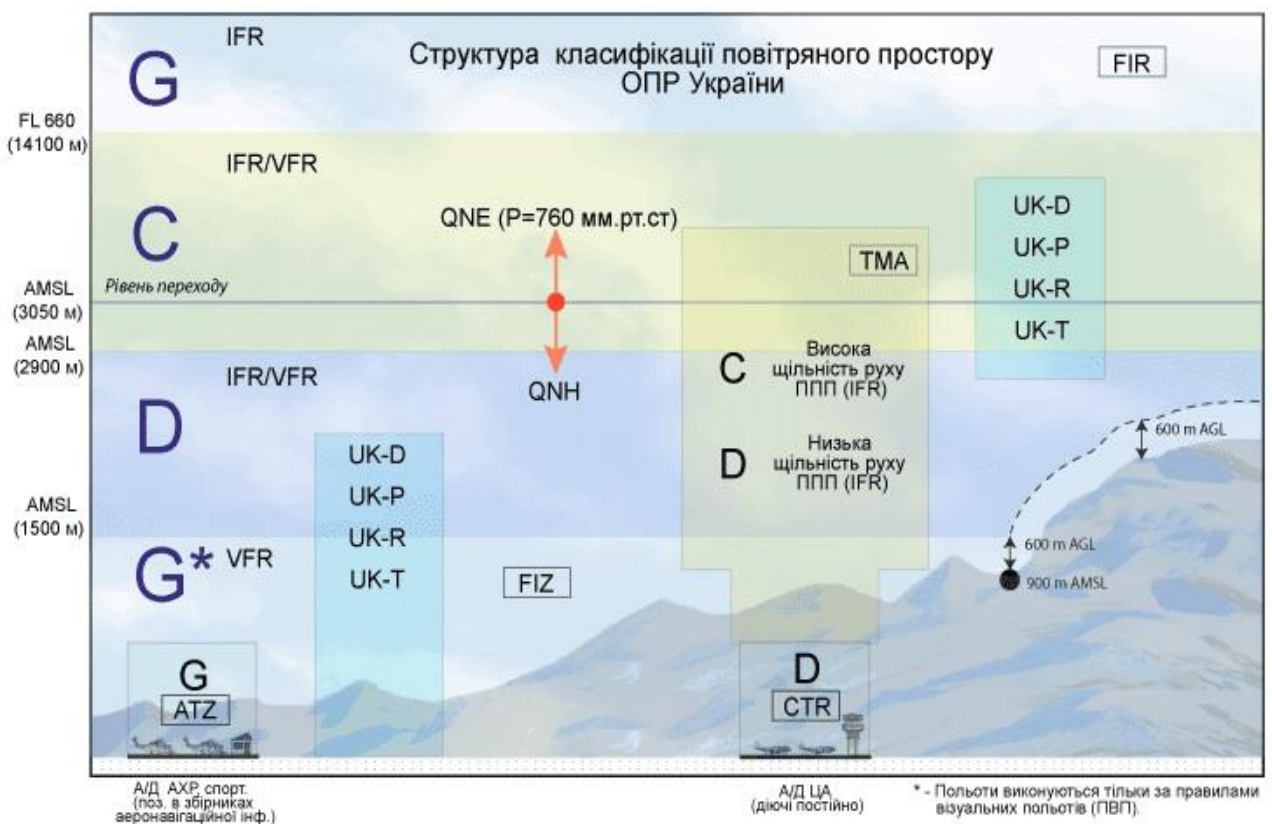


Рисунок 1.1 – Структура класифікації повітряного простору ОПР України [17].

Процедури, ролі та обов’язки ATFCM були встановлені відповідно до Плану операцій європейської мережі на 2016-2019/20 рр., який надає консолідований огляд прогнозованої сезонної, місячної, щотижневої та щоденної ситуації ATFCM. Він включає наявну інформацію про попит на трафік та плани пропускної спроможності, ідентифікуючи вузькі місця та

представляючи заходи ATFCM та ASM, передбачені для їх противаги. План роботи мережі надає коротко- та середньостроковий прогноз того, як працюватиме мережа терміналів, включаючи очікувані показники на мережевому та локальному рівнях [16,17,18].

### **1.3.1. Основні етапи прогнозування повітряного руху**

Установою, відповідальною за прогнозування повітряного руху, є відділ статистики та прогнозування ЄВРОКОНТРОЛЮ (STATFOR). В основному він створює 7-річні прогнози (також відомі як середньостроковий прогноз) річної кількості переміщень польотів за ППП для різних обсягів повітряного простору. Група користувачів STATFOR, що складається з органів цивільної авіації, ПАНО та інших галузевих організацій, збирається один-два рази на рік для перегляду та оновлення попереднього прогнозу.

Прогноз польоту складається в чотири етапи:

- початковий річний прогноз;
- щомісячний прогноз тенденцій;
- місткість аеропорту;
- мережа повітряного простору.

#### ***Початковий річний прогноз***

Він аналізує різні вхідні параметри і на їх основі розбиває трафік на 5 сегментів:

- вантажні рейси базуються на зростанні ВВП (валового внутрішнього продукту);
- невеликі пари аеропортів (< 25 рейсів на рік) залишаються постійними;
- польоти ділової авіації базуються на спостережуваній тенденції на державному рівні разом із економічним зростанням, останніми тенденціями річного перевезення;

- для інших перевезень (тут «інші» – більшість пасажирських рейсів) розглядається використання підходу з боку пропозиції чи попиту, а також історичні дані про рейси, демографічні показники, частка ринку лоукост, яка відображає рух рейсів лоукост авіакомпаній [19].

Сторона пропозиції використовується, якщо трафік відповідає одній із стандартних історій (кільцеві рейси, довгострокова стабільність або зниження трафіку та пряма залежність від ВВП) і якщо попит перевищує пропозицію. Інакше саме попит рухає та обмежує зростання.

Що стосується попиту, кількість пасажирів розраховується на основі кількості рейсів, типу літака та коефіцієнтів навантаження, потім зростає відповідно до зростання ВВП, а еластичність – це потік, потім перетворюється назад на кількість рейсів за допомогою числа відношень між місцями та рейсами, відкаліброваних на основі історичних даних.

### ***Щомісячний прогноз тенденцій***

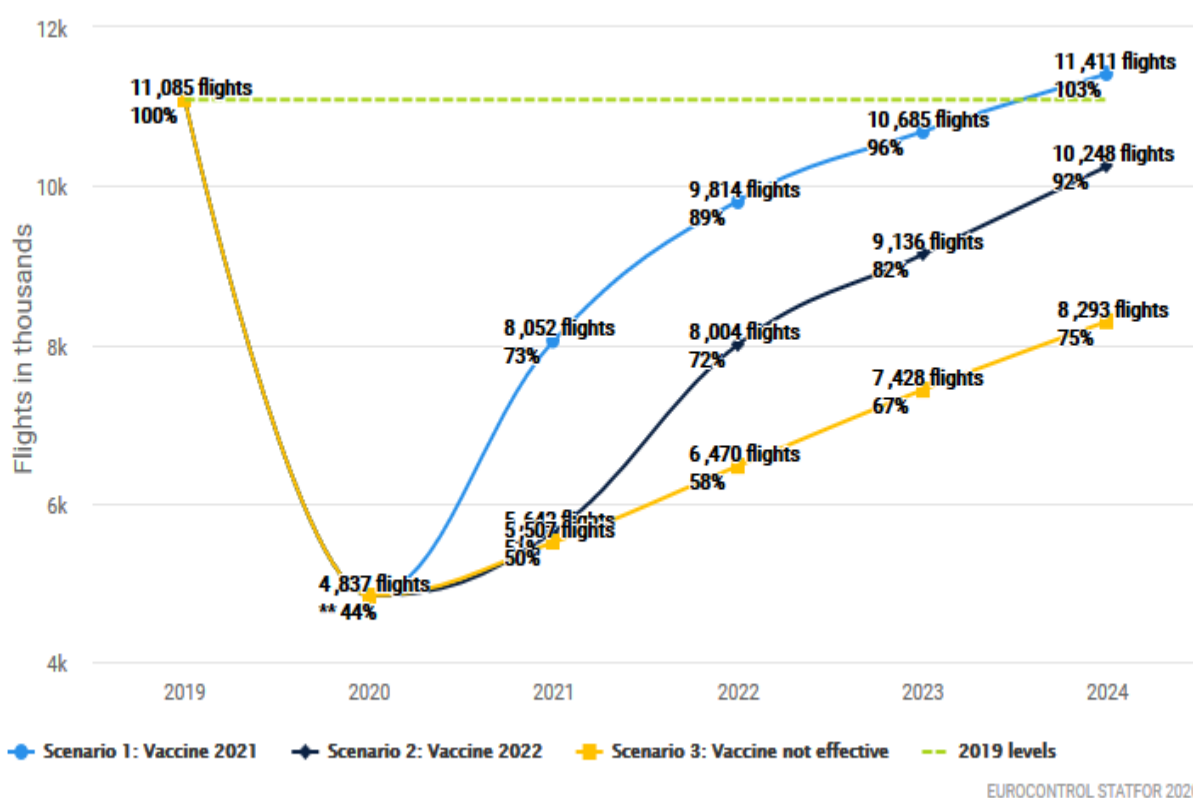
Він зосереджується на моделюванні тенденцій трафіку в часових рядах щомісяця. Кінцевий результат – кількість рейсів на місяць на пару зон або регіонів. П'ять окремих прогнозів (з різним горизонтом, часом і географічним роздільною здатністю) сприяють прогнозу в цілому:

- метод державного потоку прогнозує кожну державу окремо, а всередині держави — окремі прогнози для кількох основних «потоків»: внутрішні рейси, перельоти та прибуття/виліт;
- метод розкладів використовує дані з опублікованих розкладів на майбутні місяці та порівняння попередніх розкладів з реальними рейсами;
- компонент прогнозованості використовує дані про економічне зростання та ціни на паливо як пояснювальні змінні для калібрування ідеальної моделі заднього плану на відомий період, щоб отримати модель прогнозу якомога ближчу до прогнозу виробництва. Потім він застосовує модель, знайдену на державному рівні, для короткострокового горизонту;

• перші роки Початкового річного прогнозу також вносять свій внесок у місячний прогноз. Розріз інформації річного рівня допомагає скорегувати та адаптувати щомісячний прогноз під певні обмеження та особливості регіону де його застосовують [20,21].

На рис 1.2 зображено тенденцію розвитку та прогнозування європейських польотів після обмежень Covid19.

Forecast for \*Europe 2020-2024  
Actual and % change compared to 2019



\*Europe = ECAC 44 Member States

\*\*Forecast 2020 based on scenario 2

Рисунок 1.2 – Тенденція розвитку та прогнозування європейських польотів після обмежень Covid19 [17].

### Обмеження аеропорту

Початковий річний прогноз потім узгоджується з цим новим місячним прогнозом тенденції. Отримане зростання на пару аеропортів для всіх типів



польотів потім порівнюється з майбутніми можливостями аеропортів, які будуть надані аеропортами.

### *Перельоти*

Останнім кроком є обчислення кількості рейсів у кожному повітряному просторі за допомогою цих рейсів з аеропорту в аеропорт. Це робиться за допомогою комбінації маршрутів через повітряний простір, що спостерігалися в базовий рік, і тенденцій зростання обльоту на зону руху. Кожен з наступних прогнозів доповнює і водночас обмежує попередній, що призводить до появи результуючого прогнозу польоту (рис. 1.3).



Рисунок 1.3 – Етапи та вхідні дані для обрахунку (прогнозування) пропускної здатності повітряного трафіку

### 1.3.2. Класифікація інструментів, що використовуються для оцінки трафіку та потужності

Щоб гарантувати, що всі значні зміни повітряного простору можуть бути оцінені з точки зору ATFCM та планування польотів і точно відображені в операційних системах мережі, використовуються різні засоби [22].

В основному вони орієнтовані на збір, систематизацію інформації та моделювання транспортних потоків і структур повітряного простору. Представлені в роботі можна класифікувати таким чином (рис. 1.4).

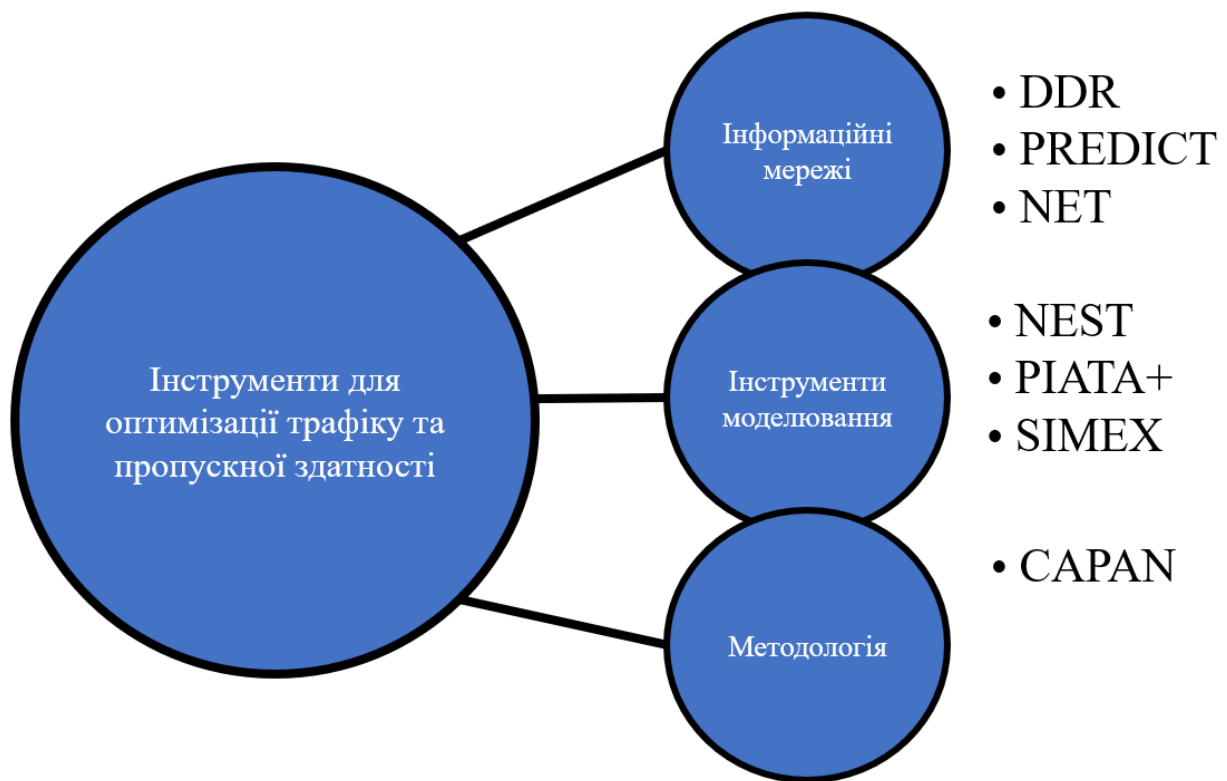


Рисунок 1.4 – Класифікація інструментів, що використовуються для оптимізації повітряного простору

### 1.3.3. Інформаційні мережеві засоби

Репозиторій даних попиту (DDR) був створений для підтримки процесу спільного планування мережі, надаючи доступ до консолідованого та інтегрованого європейського стратегічного погляду на попит і розподіл трафіку.

Веб-портал DDR2 надає простий і всеосяжний інтерфейс, що дозволяє створення та завантаження майбутнього трафіку для цілей планування та минулого трафіку, для післяопераційного аналізу тенденцій трафіку, статистики та порівняння маршрутів для підтримки ефективності польотів. Він також забезпечує завантаження інструментів для моделювання проектування повітряного простору та планування потужності. Веб-додаток DDR може генерувати різноманітні зразки трафіку, як показано нижче [23,24]:

- майбутні зразки трафіку відповідно до низького, базового або високого прогнозу STATFOR;
- зразки майбутнього трафіку з поточним розподілом попиту (план польоту / план польоту, доповнений радіолокаційними даними);
- зразки майбутнього трафіку з новими маршрутами, розрахованими для майбутнього середовища;
- зразки минулого трафіку з новими маршрутами розраховані для майбутнього середовища.

Для створення нових маршрутів доступні два варіанти:

- найкоротший шлях (мінімальна довжина маршруту);
- найдешевший шлях (мінімальна вартість з урахуванням довжини маршруту та маршрутних зборів).

Майбутні зразки трафіку можна збагатити DDR2 за допомогою намірів польоту.

PREDICT є основним інструментом мережевих операцій, який використовується для підтримки попереднього тактичного планування на день, який планується (D). Вхід PREDICT складається з:

- дані польоту: історичний попит, отриманий з (першого подання) планів польоту в D-7, за замовчуванням використовується для побудувати майбутній прогноз трафіку. Кілька виправлень історичного попиту застосовуються в Predict для створення:
- заміна історичних RPL (RepetitiveFlight Plan) майбутніми RPL;

- збагачення історичних даних FPL (плану польоту) планами польотів DDR2, щоб краще відобразити нові рейси або видалити історичні рейси, про які повідомлялося, що не виконуються в майбутньому;
- маршрутні з'єднання через обмеження/зміни повітряного простору;
- ENV (середовище) Data: PREDICT отримує нові дані про середовище кожні 4 тижні як частину звичайного циклу AIRAC, а також оновлення середовища в режимі онлайн. На Рис. 1.5 зображено регіони з повністю/частково обмеженим рухом у 2021 році. Що в свою чергу значно впливає на побудову та оптимізацію маршрутів (маршрутні з'єднання через обмеження/зміни повітряного простору).

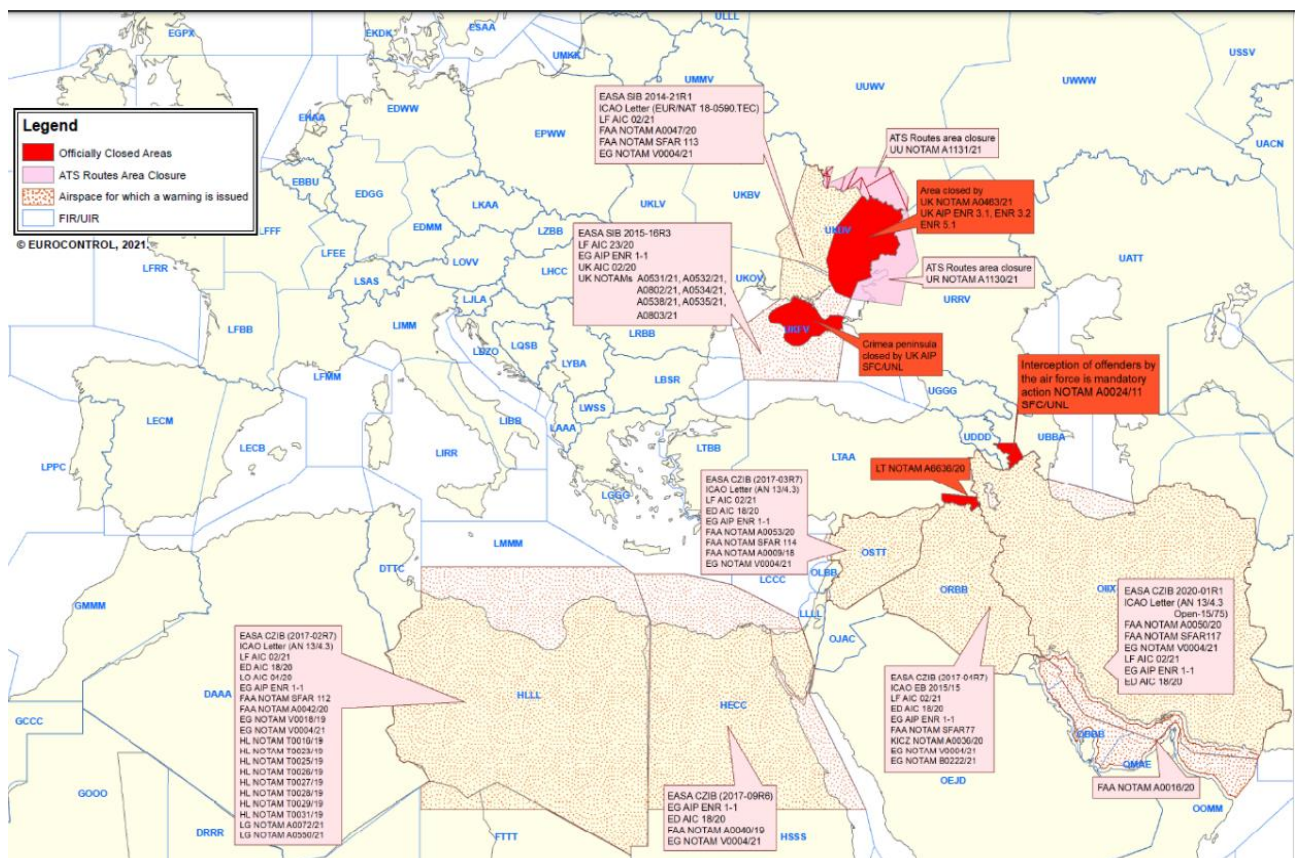


Рисунок 1.5 – Регіони повітряного простору повністю (або частково) недоступні для польотів цивільної авіації у 2021 році

Інструмент мережевих подій (NET) являє собою рух до централізованого підходу для полегшення планування та координації подій на мережевому та місцевому рівнях. NET складається з консолідованого сховища інформації про події, отриманої EUROCONTROL з різних джерел і зберігається в різних базах

даних, і надає унікальну точку доступу до цього репозиторію зацікавленим користувачам як внутрішнім, так і зовнішнім для theAgency.NET, доступний у вигляді портрета «Календар мережевих подій». На порталі Network Manager, доступному на всіх етапах планування (стратегічний, до-тактичний, тактичний, післяопераційний). Таким чином, NET збільшує видимість подій, які можуть вплинути на роботу мережі, і має на меті уможливити ідентифікацію взаємозалежностей та підтримати підвищення ефективності при координації та плануванні заходів із пом'якшення наслідків у співпраці із зацікавленими сторонами. Наразі репозиторій NET (база даних) зберігає інформацію про події з таких джерел:

- ERNIP (План покращення європейської мережі маршрутів), частина 2 – версія ARN 2016-2019/21, яка включає пропозиції повітряного простору, заплановані до впровадження протягом зазначеного періоду; а також усі готові пропозиції, що зберігаються в попередніх версіях ERNIP Частина 2; (100% охоплення даними пропозицій);
- база даних аеропорту Corner, яка включає поточні та заплановані заходи аеропорту; лише вибрані події (60% охоплення даними про події);
- спеціальні події (100% охоплення даних);
- військові події (100% охоплення даних);
- події ATFCM (100% охоплення даними);
- пряме введення через власний інтерфейс на порталі NOP.

NET дані підтримують кілька розділів Плану роботи мережі, таких як Глава 7, Додаток 3, Додаток 4, Додаток 5 (Заходи підвищення пропускнуої спроможності ACC), Додаток 6 (Поточні та заплановані заходи в аеропортах). База даних NET забезпечує прямий вхід до DDR2 (включений до календаря подій DDR2) і в майбутньому може надавати дані безпосередньо іншим інструментам планування за потребою, наприклад, STATFOR, SIMEX, NEST та інші [25].

### 1.3.4. Інструменти моделювання

NEST (Network Strategic Tool) — це інструмент для моделювання на основі сценаріїв, розроблений EUROCONTROL. Він використовується менеджером мережі та постачальниками аеронавігаційних послуг (ANSP) для:

- проектування та розробка структури повітряного простору;
- планування потужності та виконання аналізу пов'язаних поштових операцій;
- організація транспортних потоків на стратегічному етапі ATFCM;
- підготовка сценаріїв для підтримки швидкого моделювання в реальному часі;
- спеціальні дослідження на локальному та мережевому рівні.

NEST використовується для оптимізації доступних ресурсів і підвищення продуктивності на рівні мережі. NEST також може використовуватися локально центрами управління зонами (ACC) або аеропортами, а також глобально для стратегічного планування на рівні мережі. NEST може обробляти та консолідувати велику кількість даних, що охоплюють кілька років, але також дозволяє користувачеві детально аналізувати й спостерігати за 10-хвилинними періодами даних.

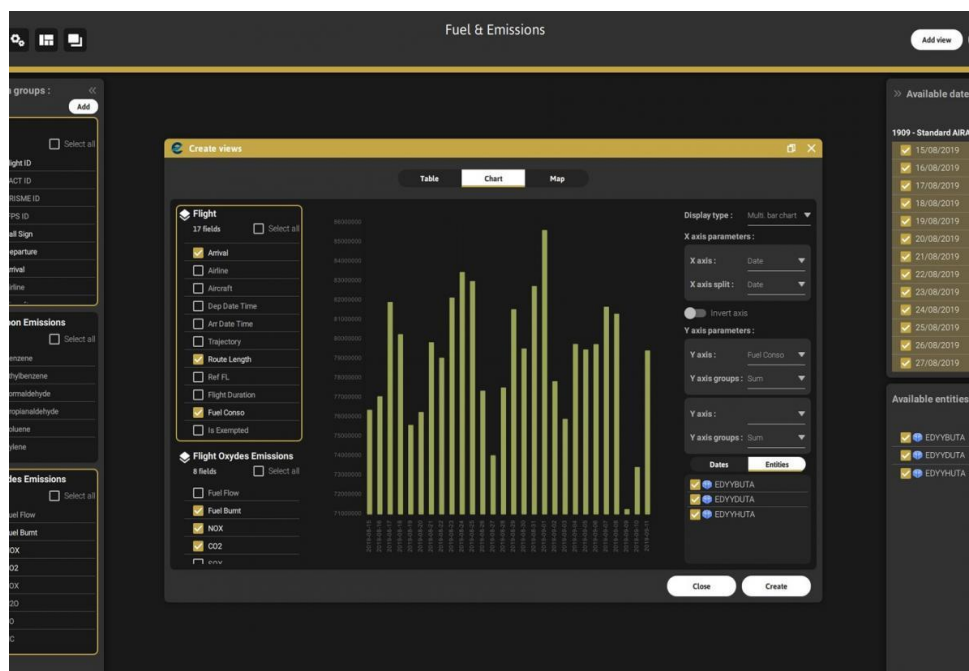


Рисунок 1.6 – Інтерфейс програми моделювання сценаріїв NEST-R (EUROCONTROL)

NEST заснований на сценарії: користувачі можуть вносити зміни до вихідного набору даних або еталонного сценарію, щоб моделювати необмежену кількість різних варіантів оперативного планування. NEST використовує набори даних, що детально описують консолідований загальноєвропейський повітряний простір і мережу маршрутів, попит і розподіл трафіку, а також прогнози трафіку STATFOR, які надає EUROCONTROL в кінці кожного циклу AIRAC (рис. 1.7) [26].

Алгоритми моделювання включають:

- зразки майбутнього трафіку;
- розподіл 4D трафіку;
- оптимізатор конфігурації;
- регулятор, симуляція затримки.



Рисунок 1.7 – Можливості мережевого стратегічного інструментарію

Інструмент аналізу показників ефективності для аеропортів (PIATA+) — це конфігурована система на основі ПК, яку можна використовувати для аналізу будь-якого режиму роботи аеропорту, включаючи використання кількох злітно-посадкових смуг. Він підтримує поетапний підхід до підвищення ефективності та ефективності аеропорту.

Результати цього аналізу можуть бути включені в процес декларування місцевої потужності, а отримані цифри використовуються як вхідні дані в процес планування мережі. PIATA+ може додатково використовуватися у вправах з підвищення потужності, щоб визначити потенційний приріст потужності, коли розглядаються модифікації існуючої інфраструктури, наприклад, будівництво нової швидкої руліжної доріжки. Результатом PIATA+ є набір даних та інформації про те, як система злітно-посадкової смуги аеропорту на даний момент використовується службами УВД та авіа операторами.

Платформа для моделювання SIMEX (Simulation and Experiment) надається для того, щоб оперативний персонал міг моделювати та оцінювати вплив застосування, модифікації або скасування заходів ATFCM до їх оперативного використання [25,26, 27].

Платформа моделювання використовується на різних етапах ATFCM:

- тактична діяльність (від простої оцінки короткострокових заходів ATFCM щодо операцій ETFMS перед застосуванням до оцінки найкращого підходу до вирішення несподіваних подій);
- до-тактичні заходи (підготовка плану регулювання ATFCM, починаючи з польотів з контрольного дня);
- спеціальні події та довгострокова діяльність (наприклад, реструктуризація повітряного простору, попередня перевірка даних ENV).

### **1.3.5. Методика обчислення потужності секторів**

SAPAN (EUROCONTROL Capacity Analyzer) – це методологія, розроблена Євроконтролем для обчислення потужностей секторів – на основі оцінки робочого навантаження – за допомогою швидкого моделювання часу. Кожне дослідження SAPAN виконується у тісній координації з оперативними контролерами в ACCsconcerned, щоб визначити робоче навантаження



змодельованих позицій диспетчерів для даної вибірки трафіку (рис.1.8). Потужність сектора досягається, коли робоче навантаження досягає порогу 70%.

Методологія CAPAN враховує настроюваний список завдань диспетчера та методологію моделювання робочого методу диспетчера, що робить його адаптованим до всіх систем УПР та робочих середовищ.

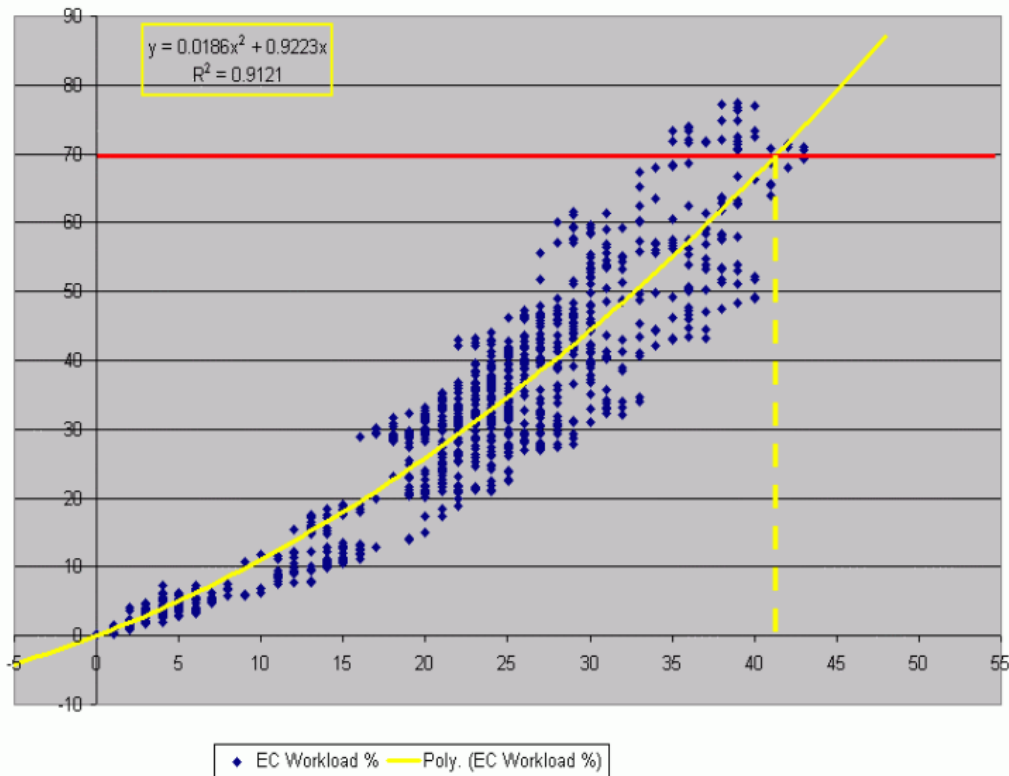


Рисунок 1.8 – Результати обчислення відхилень пропускної здатності сектора після зміни структури повітряного простору

Методологія CAPAN зазвичай використовується для визначення пропускної здатності сектора, що особливо корисно у разі змін у структурі повітряного простору, структурі маршруту або процедурах УПР. Запровадження значних змін в системі також можна проаналізувати за допомогою методології CAPAN, або до того, щоб підтвердити очікувані переваги, або після, щоб допомогти перевизначити потужність сектора за допомогою нової системи УПР.

Незважаючи на всесвітнє визнання CAPAN, зараз використовуються інші методики визначення пропускної здатності та швидкості повітряного руху. Один з них уже застосовувався в кількох прогнозах STATFOR (рис 1.9).

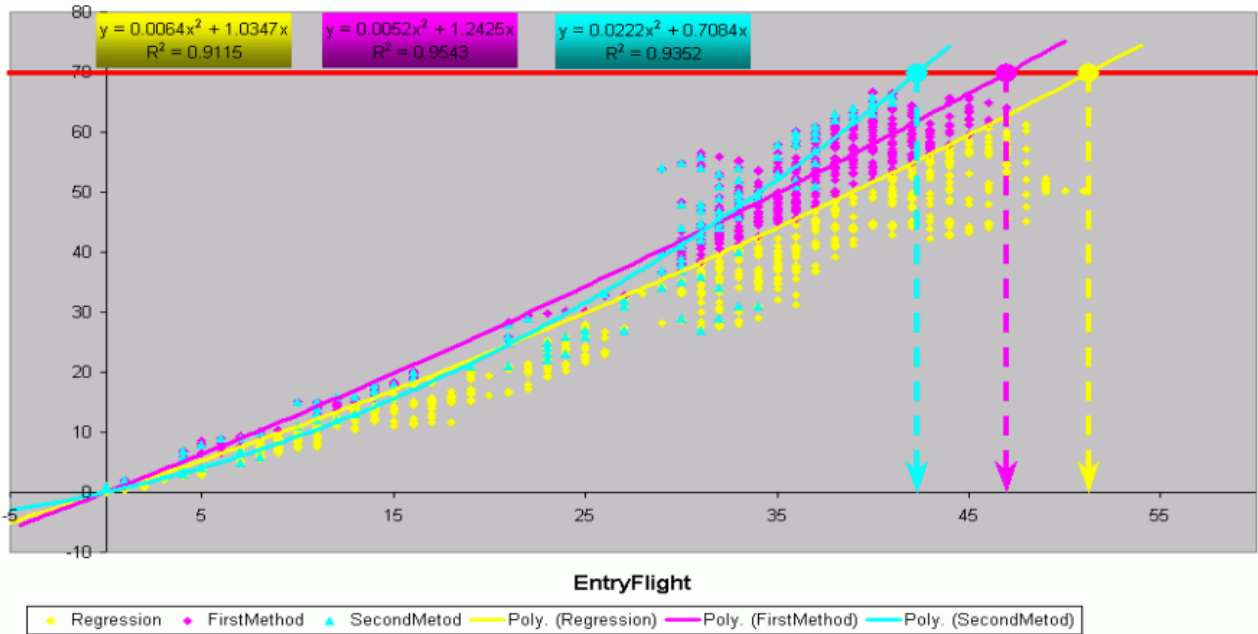


Рисунок 1.9 – Результати обчислення процесу зміни в системі УПР різними методами з урахуванням змінних

### 1.3.6. Застосування методів і засобів прогнозування пропускної спроможності в аеронавігаційній системі України

Бути державою в ЄВРОКОНТРОЛЮ – це привілей, який вимагає не лише присутності, а й переважної участі. У цьому напрямку Україна багато працює. Наприклад, наша країна успішно впровадила FUA (Flexible Use of Airspace) (рис. 1.10) концепція та спільні цивільно-військові процедури координації.

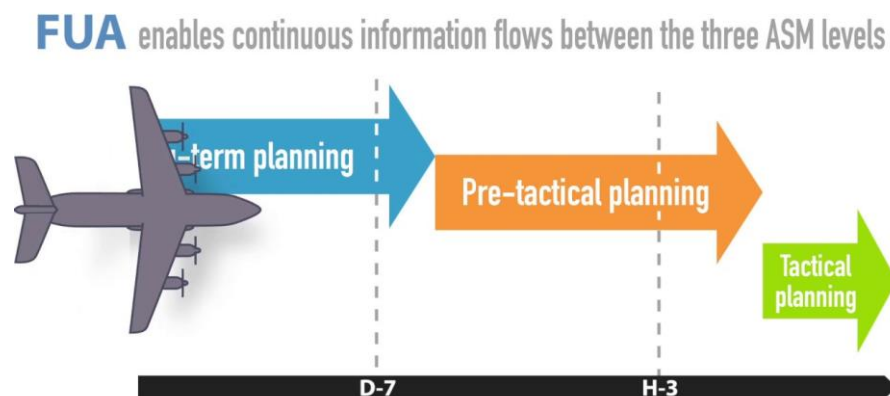


Рисунок 1.10 – Етапи впровадження та застосування FUA

Незважаючи на це, в реорганізації існуючої української аеронавігаційної системи ще багато можна зробити. Ось короткий огляд засобів і методів, які можна застосувати в Україні для прогнозування та забезпечення потужності.

Украерорух (Українське підприємство аеронавігаційного обслуговування) може ініціювати радника, відповідального за потоки повітряного руху та прогнозування пропускної спроможності, щоб вони виробляли чотири типи прогнозів, які згадувалися раніше.

На першому етапі буде підготовлено Початковий річний прогноз. Оскільки для його складу потрібно багато даних, то доцільно було б використовувати інструмент DDR, який може забезпечити попит на трафік та показники пропозиції, необхідні для прогнозування пасажирських рейсів. Крім того, DDR містить статистику польотів, яку можна використовувати для подальшого аналізу. NEST також може бути корисним, оскільки це потужний інструмент моделювання, який використовує набори даних з DDR та моделює різні сценарії польотів, допомагає оцінити розподіл трафіку, дефіцит пропускної спроможності, ефективність польоту тощо. Потім, щоб правильно оцінити пропускну спроможність, застосовується методологія CAPAN. Це може служити відмінним способом для остаточного розрахунку потужності після моделювання та збору даних.

На другому етапі може бути представлений місячний прогноз тенденцій. Для його створення рекомендується база даних PREDICT, що містить історичні дані про попит, багато оновлених змін маршруту та розкладів польотів. Потім цю інформацію можна використовувати як основу для моделювання в NEST, що корисно на цьому етапі прогнозування потужності.

Після підготовки цих двох прогнозів ще два будуть служити скоріше як доповнення, ніж як окремі прогнози. Прогноз обмежень аеропорту може бути заснований на сховищі даних NET. Цей точний інструмент містить інформацію про всі місцеві українські аеропорти, авіакомпанії та події, заплановані

заздалегідь. PIATA+, у свою чергу, може забезпечити необхідний аналіз переміщень аеродрому та можливої ефективності польоту в районі аеродрому.

Отриманий прогноз буде змінено прогнозом обльотів. Для цього можна використовувати NET. Він містить інформацію про транзитні рейси, деякі заплановані заходи та статистичні дані. Моделювання пропускної спроможності можна виконувати на NEST, який через свою повноту та універсальність рекомендований для використання на всіх етапах прогнозування польотів.

Таким чином, використання відомих інструментів і баз даних може спростити прогнозування потоків повітряного руху та пропускної спроможності, підвищити точність прогнозів ЄВРОКОНТРОЛЮ і не тільки максимально збільшити ефективність польотів в українському повітряному просторі, а й зробити роботу Украероруху значно простішою та надійною. Стратегію розвитку української системи аеронавігації наведено на рис. 1.11.

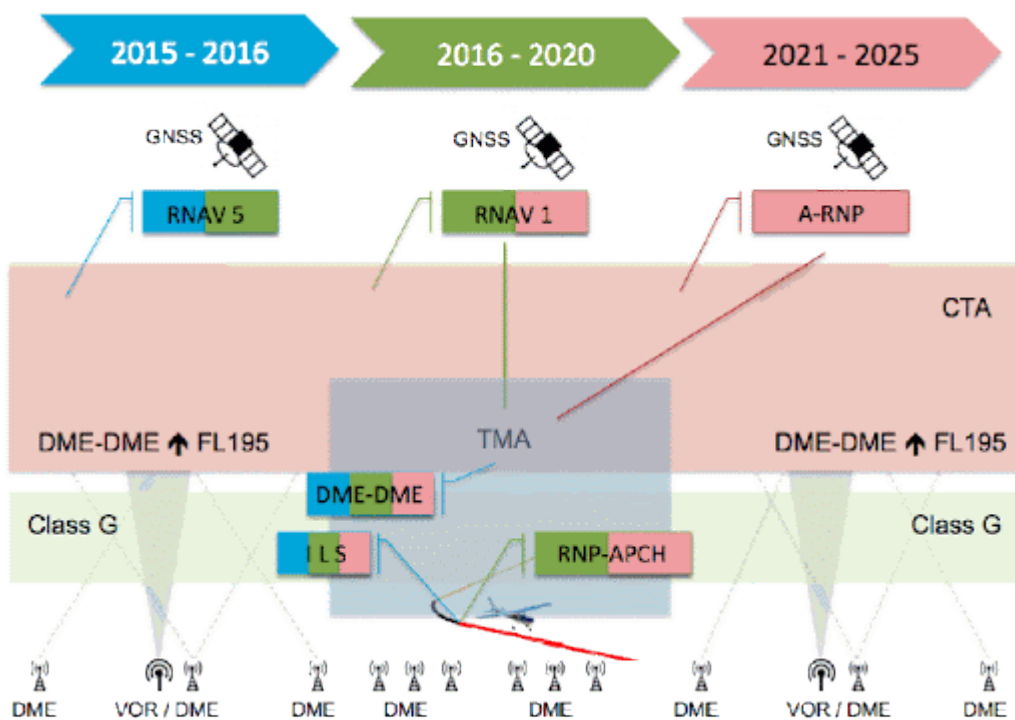


Рисунок 1.11 – Стратегія розвитку аеронавігації в Україні

## **ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1**

Базуючись на оброблених джерелах, в першому розділі поведено огляд загальних положень відносно причин та наслідків затримок літаків на різних етапах польоту. Також розглянуто структурні характеристики аеропортів, їх розвиток та тенденції виходу із стагнації (що в свою чергу має безпосередній вплив на пропускну здатність споруд та аеропортового комплексу в цілому). Наведено інструменти та методики покращення (оптимізації) управління та обслуговування повітряного руху. Проведено аналіз прямого впливу ефективності використання повітряного простору на пропускну здатність та затримки польотів. Надано пропозиції застосування методів і засобів прогнозування пропускну спроможності в аеронавігаційній системі України (для оптимізації УПР).

## РОЗДІЛ 2. ЗАЛЕЖНІ КООПЕРАТИВНІ СИСТЕМИ СПОСТЕРЕЖЕННЯ

Система автоматичного залежного спостереження в режимі радіомовлення (Automatic Dependent Surveillance - Broadcast (ADS-B)) - технологія, що впроваджується в даний час у США, Росії та інших країнах, що дозволяє пілотам у кабіні літака та диспетчерам на наземному пункті, оглядати трафік руху повітряних суден з більшою точністю, ніж було доступно раніше і отримувати потрібну аеронавігаційну інформацію. Причому огляд руху повітряних суден здійснюється без використання традиційних радарів. ADS-B також передає в реальному часі погодну інформацію пілотам. Ця інформація значно розширює обізнаність пілота про ситуацію навколишнього простору та підвищує безпеку польотів. Доступ до ADS-B інформації є безкоштовним та вільним для всіх користувачів мережі [28].

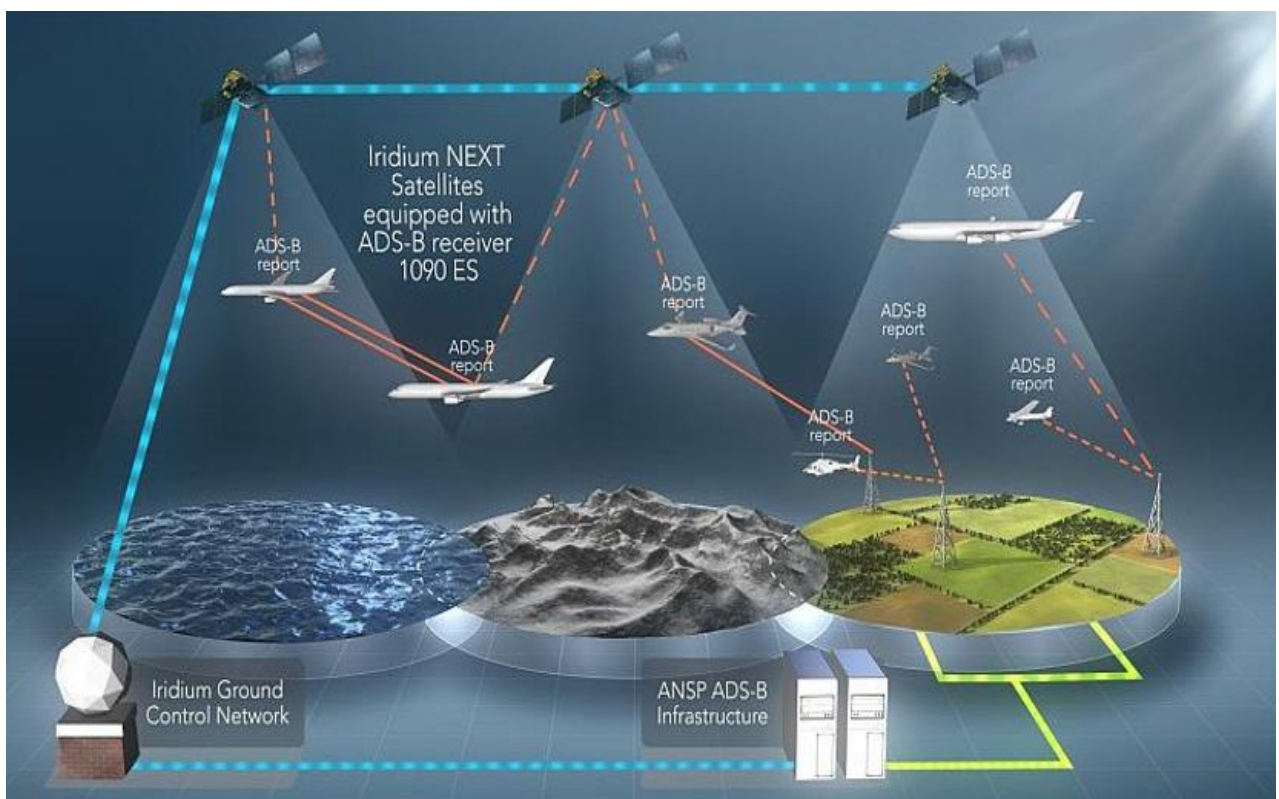


Рисунок 2.1 – Принцип побудови системи ADS-B

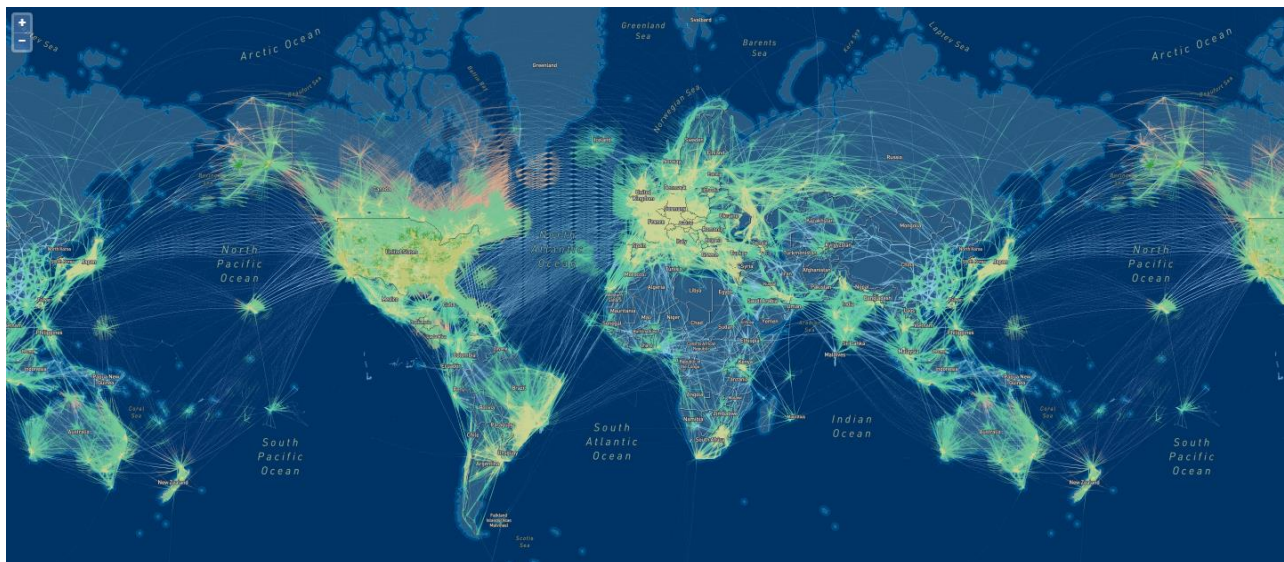


Рисунок 2.2 – Покриття ADS-B, MLAT, ADS-C

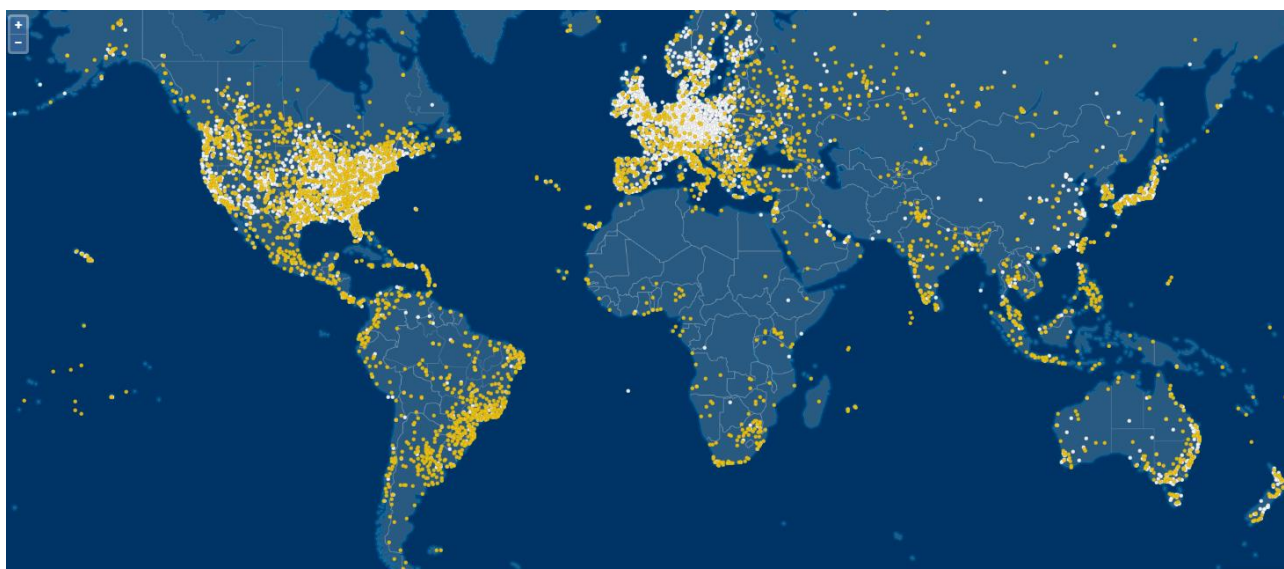


Рисунок 2.3 – Розташування наземних станцій

Система автоматичного залежного спостереження в режимі радіомовлення (ADS-B) та система мультилатерації (MLAT) є додатковими формами електронного спостереження, які можуть використовуватися з метою забезпечення обслуговування повітряного руху (ОВР) на маршруті та в районі аеродрому [29]. Якщо раніше єдиним засобом забезпечення електронного спостереження при обслуговуванні таких польотів був радіолокатор, то в даний час системи ADS-B і MLAT можуть впроваджуватися в тих районах, які або взагалі не обслуговувалися, або частково обслуговувалися радіолокатором. У

зв'язку зі своєю привабливістю з точки зору витрат очікується, що системи ADS-B і MLAT будуть все частіше використовуватися в тих районах, де використання радіолокатора економічно недоцільне, зокрема в тих, де немає великих потреб в організації повітряного руху (ОРВС). Конфігурацію структури та перевагу MLAT над звичайним радіолокатором наведено на рис. 2.4 та рис. 2.5.

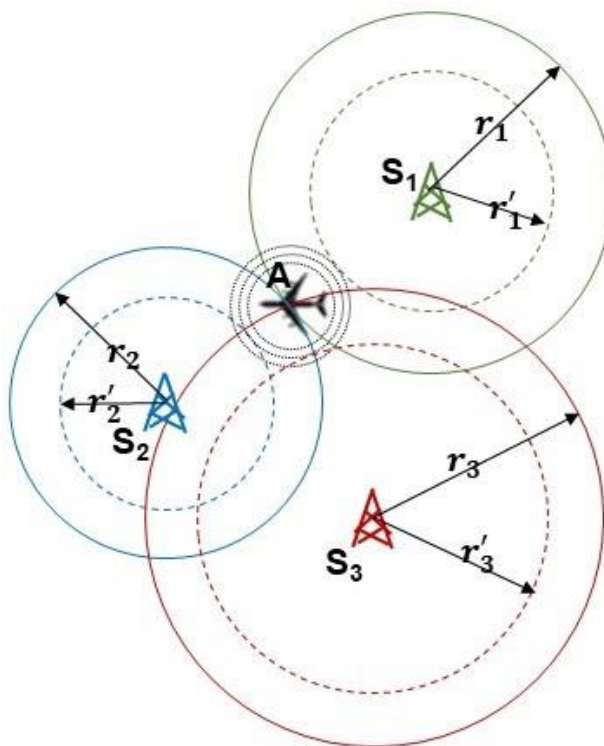


Рисунок 2.4 – Конфігурація структури (архітектура побудови) MLAT

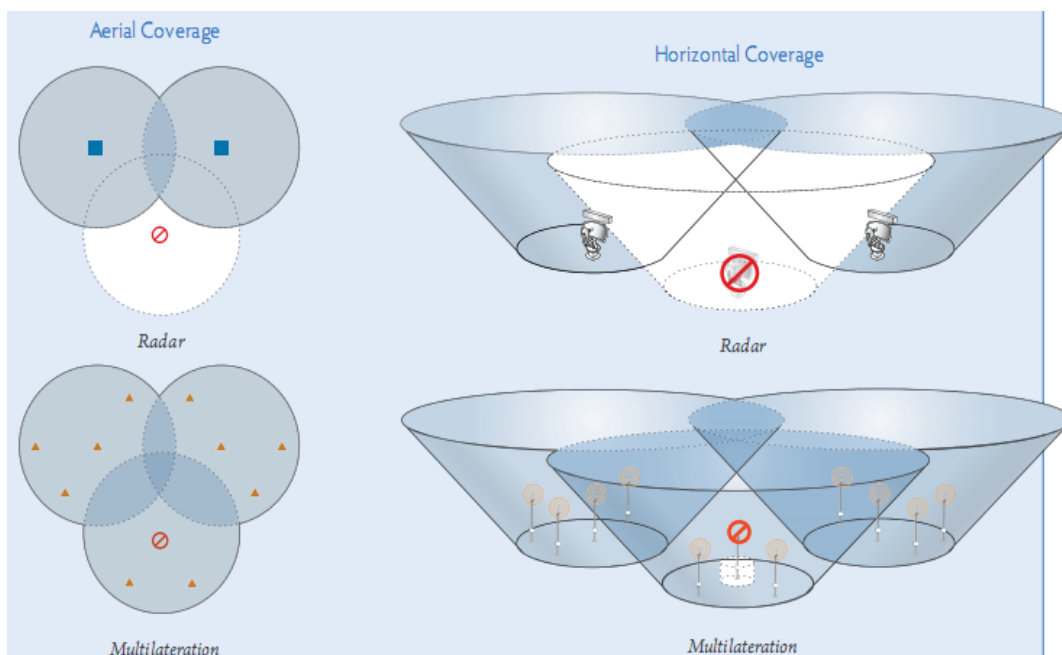


Рисунок 2.5 – Перевага використання мультилатерації перед радаром



Оскільки системи ADS-B і MLAT тісно пов'язані, використовувані та розвиваються в аеронавігаційному спостереженні в наші дні. Загалом необхідно заохочувати перехід на пасивне виявлення (наприклад, ADS-B та системи мультилатерації). Слід розробляти активні системи MLAT, які використовують мінімальні частоти та потужності запитів, щоб унеможливити їх негативний вплив на умови спостереження. Оснащення нових груп користувачів приймачами режиму S (легкі повітряні судна) або БПС (надлегкі реактивні повітряні судна) потребує ретельного вивчення та аналізу, оскільки це може вплинути на роботу існуючого наземного та бортового обладнання [29].

### **2.1. Алгоритми функціонування системи ADS-C**

У режимі ADS-C повітряне судно використовує бортові навігаційні системи для визначення свого розташування, швидкості та отримання інших даних. Наземна система ОПР укладає контракт з даним повітряним судном про надання такої інформації через регулярні інтервали або після певних подій. Інформація передається по лінії передачі даних у двоточковому зв'язку. Це означає, що доступ до такої інформації не можуть отримати інші сторони (тобто інші повітряні судна чи інші системи ОПВС). Експлуататор повітряного судна та постачальник обслуговування ОВС укладають окремі угоди з постачальником послуг лінії передачі даних про доставку повідомлень ADS-C.

Інформація, яка може передаватися в повідомленнях ADS-C, містить такі дані:

- нинішнє розташування (широта, довгота та абсолютна висота) плюс тимчасова позначка та FOM;
- передбачуваний маршрут до чергової та (чергова +1) точок колії;
- швидкість (наземна чи повітряна);
- метеорологічна інформація (швидкість вітру, напрям вітру та температура).

Бортові та наземні системи узгоджують умови, за яких повітряне судно представляє повідомлення (тобто періодичні повідомлення, повідомлення про

події, повідомлення про потреби та аварійні повідомлення). Повідомлення, отримані системою ОПР, обробляються для відстеження повітряного судна на індикаторах аналогічно тому, як це робиться з даними спостереження, отриманими від ВОРЛ. В даний час частота передачі донесень при польоті в океанічному повітряному просторі зазвичай становить від 15 до 25 хв. Однак диспетчери можуть у ручному режимі підвищити частоту передачі повідомлень при виконанні конкретних польотів. На рис. 2.6 показано архітектуру ADS-C.

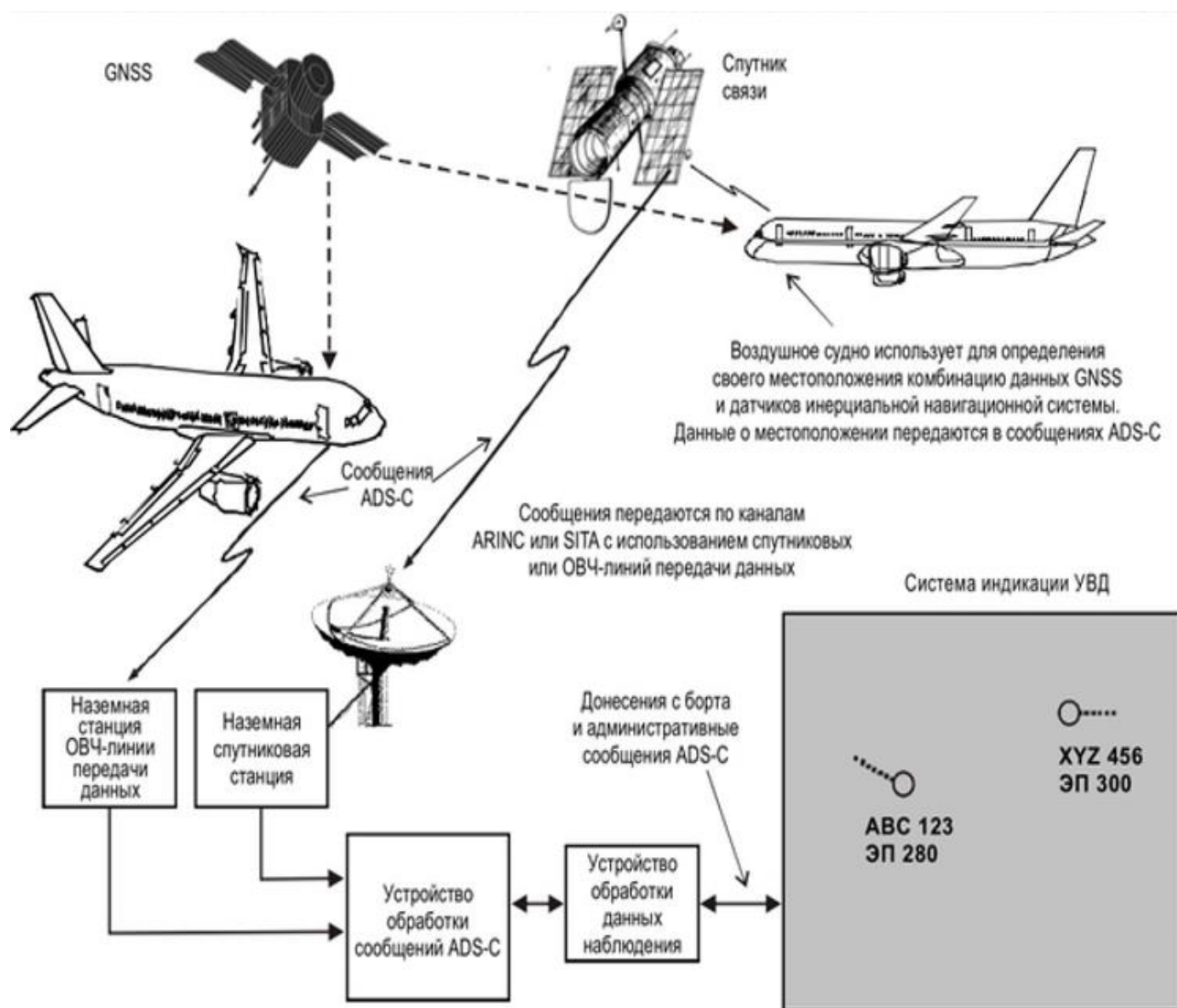


Рисунок 2.6 – Архітектура ADS-C.

### 2.1.1. Види застосування

ADS-C зазвичай використовується в океанічних та віддалених районах, де відсутні радіолокатори. Тому система орієнтована головним чином транспортні

повітряні судна великої дальності і може забезпечувати ешелонування ефективніше, ніж у ситуаціях, коли орган УВС покладається лише донесення пілотів. Система ADS-C зазвичай використовується разом із засобами CPDLC, що дозволяють здійснювати електронний обмін даними між органом УВС та льотним екіпажем як альтернативу мовного зв'язку [30,31].

В даний час система ADS-C використовується виключно для забезпечення процедурного ешелонування.

### **2.1.2. Функціональні можливості ADS-C**

Функціональні можливості ADS-C:

- забезпечення спостереження у районах, де практично недоцільно встановлювати радіолокатори або системи MLAT;
- практично забезпечується подання даних про намір повітряного судна (наприклад, про майбутні точки шляху), що важливо для виявлення потенційних конфліктних ситуацій;
- надання лінії передачі даних для зв'язку повітряного судна із землею, завдяки чому відповідні дані про повітряне судно надсилаються диспетчерам.

Недоліки ADS-C:

- система є системою залежного спостереження, тобто розрахована на те, що повітряне судно належним чином обладнане для правильної передачі даних;
- потрібне встановлення додаткової авіоніки (для передачі даних);
- робочі характеристики можуть обмежуватись граничними параметрами засобів зв'язку;
- передача кожного повідомлення може пов'язуватися з витратами, оскільки дані передаються постачальником послуг лінії передачі даних. Через війну частоту оновлення даних зазвичай намагаються зменшити скорочення витрат;
- система не підтримує функцію ASA, оскільки повідомлення прямо не доступні іншим повітряним суднам.

### 2.1.3. Звіти ADS-C

Система літака надсилає дані про конкретні літаки в різних групах звіту ADS-C. Кожна група містить різні типи даних. Звіт про подію ADS-C містить лише деякі групи, які є фіксованими. Періодичний звіт ADS-C може містити будь-яку з груп ADS-C, яку ATSU вказує у запиті на контракт. Групи звітів ADS-C складаються з:

- основна група;
- група ідентифікації рейсу;
- референтна група Землі;
- повітряна референтна група;
- група ідентифікації планера;
- метеорологічна група;
- прогнозована група маршрутів;
- виправлена група намірів, що прогнозується.

Проміжна група прогнозованих намірів ATSU може використовувати звіт ADS-C для різних цілей. До них належать:

- встановлення та моніторинг традиційних часових мінімумів поділу;
- встановлення та моніторинг стандартів поділу на основі відстані;
- позначення маршрутних точок як «переліт»;
- оновлення оцінок для точок шляху вниз по течії;
- моніторинг відповідності маршруту та рівня;
- оновлення та відображення символу позиції ADS-C та відповідної екстраполяції;
- створення (і очищення) повідомлень;
- генерування (та очищення) надзвичайних ситуацій ADS-C;
- оновлення метеорологічної інформації;
- оновлення іншої інформації в плані польоту, що зберігається в ATSU.

## 2.2. Алгоритми функціонування системи ADS-B

ADS-B являє собою радіомовну передачу з борту повітряного судна даних про його місцезнаходження (широту і довготу), абсолютну висоту, швидкість, розпізнавальний індекс та іншу інформацію, отриману від бортових систем. Кожне повідомлення про розташування ADS-B включає вказівку на якість даних, що дозволяє користувачам визначити, чи забезпечує якість інформації підтримку передбачуваної функції. Дані про місцезнаходження, швидкість повітряного судна та пов'язані з ними показники якості даних зазвичай отримують від бортової системи GNSS. Інерційні датчики, що існують, самостійно не забезпечують необхідних параметрів точності або цілісності даних, хоча ця проблема, можливо, буде вирішена в майбутніх системах. Тому повідомлення ADS-B про розташування на основі даних інерційної системи зазвичай передають із зазначенням, що параметри точності або цілісності невідомі. На деяких нових повітряних суднах використовуються комплексні установки GNSS та інерційні навігаційні системи для отримання даних про місцезнаходження, швидкість та вказівники якості даних, що передаються системою ADS-B. Очікується, що такі системи будуть більш ефективними, ніж системи, засновані виключно на GNSS, оскільки інерційні датчики і датчики GNSS мають взаємодоповнюючі характеристики, що компенсують слабкість кожної системи. Дані про абсолютну висоту зазвичай отримують від кодуючого пристрою барометричного висотоміра (яке також використовується як джерело даних для відповідей режиму C) [32,33,34].

Оскільки повідомлення ADS-B передаються в радіомовному режимі, їх може отримувати та обробляти будь-який відповідний приймач. Тому функція ADS-B підтримує як наземні, так і бортові види спостереження. Для авіаційного спостереження встановлюються наземні станції, призначені для отримання та обробки повідомлень ADS-B. При бортовому застосуванні повітряні судна, обладнані приймачами ADS-B, можуть обробляти повідомлення від інших

повітряних суден для визначення повітряної обстановки в рамках таких видів застосування, як CDTI. Розробляються інші, більш досконалі засоби ASA, які, як очікується, вплинуть на форми організації повітряного руху. На Рис. 2.7 наведена архітектура ADS-B.

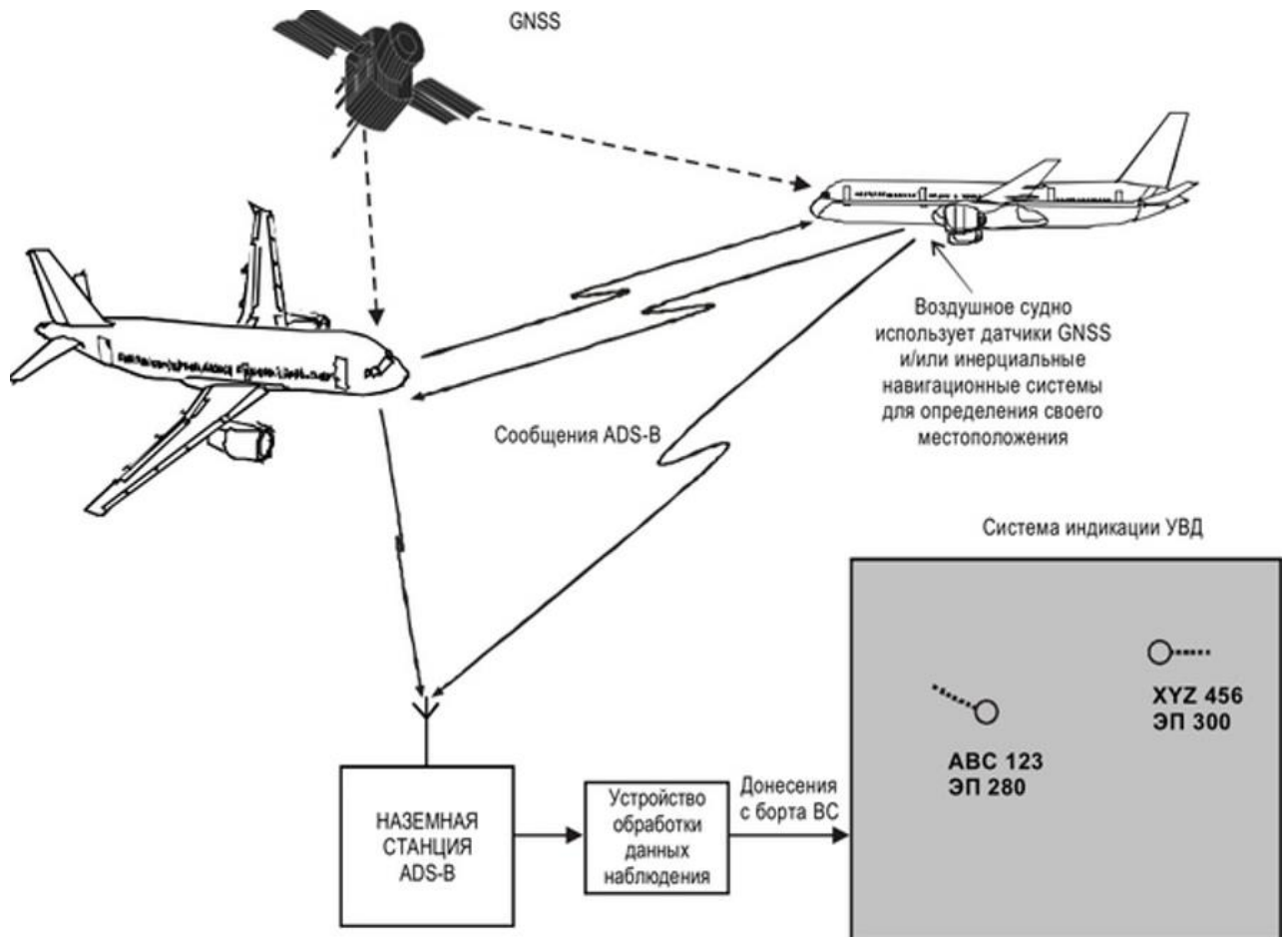


Рисунок 2.7 – архітектура ADS-B

### 2.2.1. Режим S, ES 1090 МГц (1090 ES)

Засоби 1090 ES розроблялися як складова частина системи режиму S. Стандартна довжина самогенерованого сигналу режиму S, що передається з метою виявлення, становить 56 біт (приклад зображено на Рис. 2.8). Сигнал 1090 МГц ES містить додатковий 56-бітовий блок даних з інформацією ADS-B. Тривалість кожного повідомлення ES становить 120 мкс (8 мкс преамбули та 12 мкс даних). Сигнали передаються на частоті 1090 МГц за швидкості передачі

даних 1 Мбіт/с. Інформація ADS-B передається у вигляді окремих повідомлень, кожне з яких містить відповідний набір даних (наприклад, місцезнаходження та барометрична висота повітряного судна, розташування на поверхні, швидкість, розпізнавальний індекс та тип повітряного судна, дані про аварійну обстановку). Дані про місцезнаходження та швидкість передаються двічі на секунду. Розпізнавальний індекс повітряного судна передається кожні 5 с. Надсилання повідомлень ES засобами ADS-B є функцією багатьох прийом-відповідачів режиму S, хоча цю технологію можуть також використовувати прийом-відповідачі, що не відносяться до режиму S [35].

### ADS-B mode S Packet

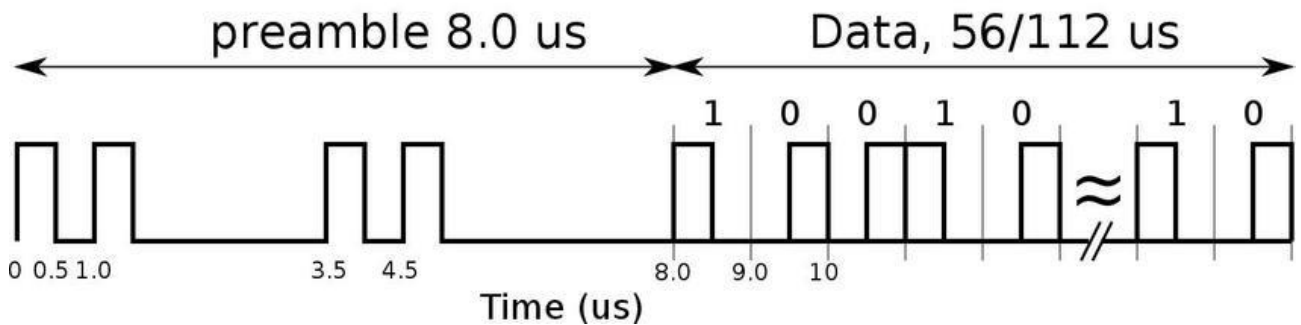


Рисунок 2.8 – Приклад пакету інформації режиму S

Існує міжнародна домовленість про те, що повідомлення ES режиму S будуть використовуватись повітряними суднами транспортної авіації у всьому світі для забезпечення функціональної взаємодії принаймні на початковому етапі впровадження.

#### 2.2.2. UAT

UAT являє собою лінію передачі авіаційних даних загального призначення для направлення лінії зв'язку вгору інформації на додаток до даних ADS-B. Засіб працює на частоті 978 МГц при швидкості передачі інформації 1 Мбіт/с, як і у повідомлень ES режиму S. Кожному приймачеві UAT відводиться тимчасове

вікно і канал MSO для передачі інформації. Канали можуть розподілятися в одному з двох сегментів: сегмент ADS-B та наземний сегмент. Канали в сегменті ADS-B розраховані на повідомлення тривалістю 250 мкс і розподіляються повітряним суднам передачі даних ADS-B. Канали в наземному сегменті резервуються передачі наземної системою в радіомовному режимі метеорологічної та польотної інформації (така послуга називається FIS). Тривалість передачі пакетів кожному з цих каналів становить 5,5 мс (22 MSO).

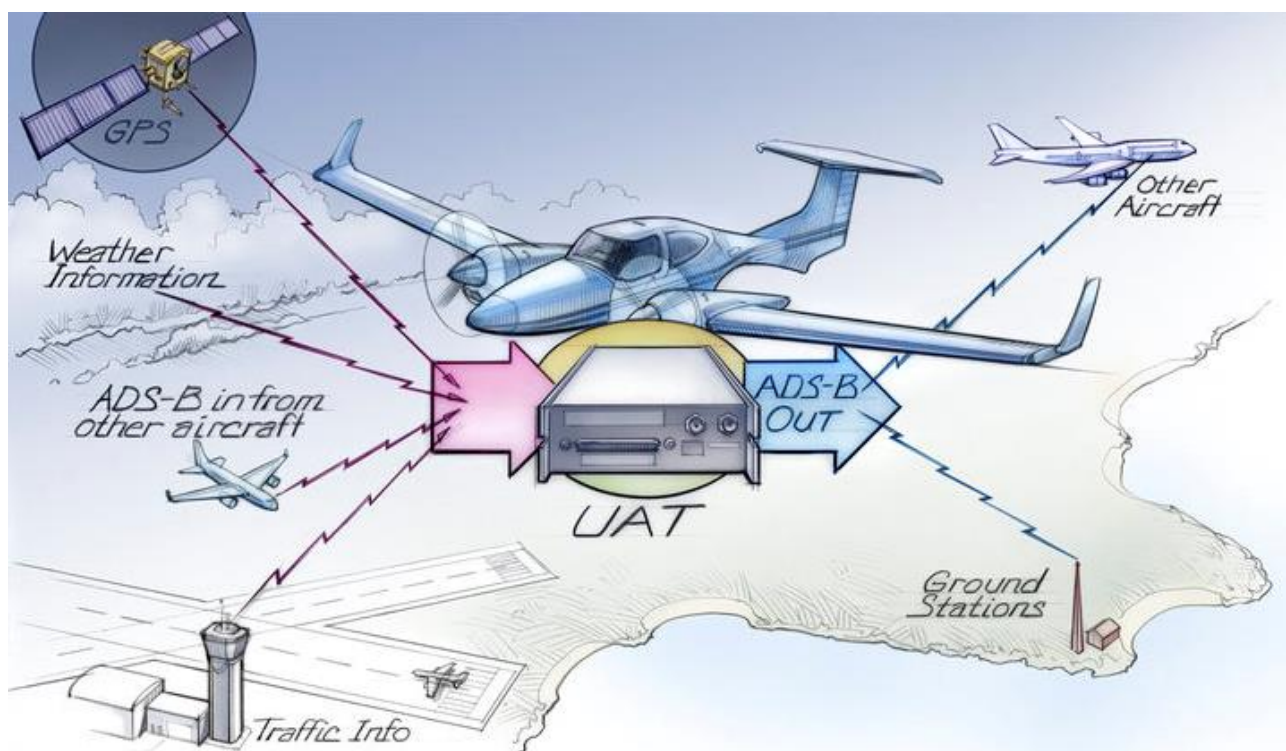


Рисунок 2.9 – Принцип роботи передавача UAT

### 2.2.3. ОВЧ-лінія цифрового зв'язку режиму 4 (VDL режиму 4)

Технологія VDL режиму 4 розроблялася як лінію передачі даних загального призначення для підтримки функцій CNS. На початковому етапі вона використовувалася тільки в таких видах спостереження, як ADS-C і ADS-B, однак пізніше, після скасування нормативних обмежень, засоби VDL режиму 4 стали використовувати як лінію передачі даних CNS. Система підтримує радіомовний та двоточковий зв'язок повітря-земля та повітря-повітря. VDL



режиму 4 являє собою вузькосмугову систему, що працює на декількох каналах шириною 25 кГц в ОВЧ-діапазоні (108-137 МГц). Доступ до цих каналів синхронізується щодо UTC і заснований на схемі TDMA, що само організується, що дозволяє всім об'єктам зв'язку вибрати вільні вікна для відправлення повідомлень. Є ряд протоколів підтримки різних режимів зв'язку [36].

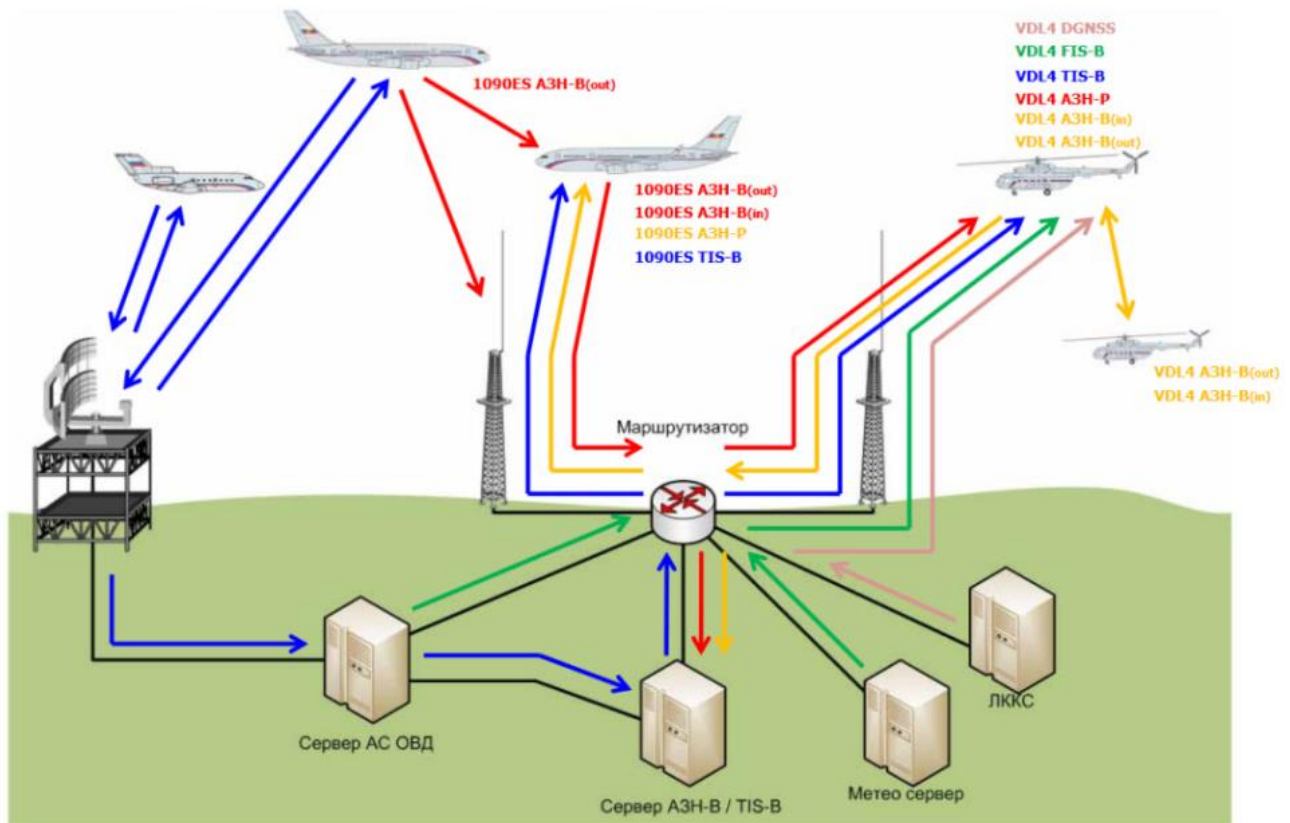


Рисунок 2.10 – Перспективна архітектура засобів спостереження з використанням VDL режиму 4

#### 2.2.4. Функціональні характеристики ADS-B

Функціональні характеристики системи ADS-B:

- наземна станція простіше, ніж станції в системах первинної радіолокації, вторинної радіолокації та мультилатерації. Витрати на придбання та встановлення однієї системи ADS-B є значно нижчими. У багатьох випадках кошти можуть встановлюватися на майданчиках, призначених для навігаційних засобів або ОВЧ-радіо засобів з існуючою інфраструктурою;

- кожне повідомлення про місцезнаходження містить вказівку про цілісність даних, що дозволяє користувачам визначити, яким чином можна використовувати цю інформацію;
- система підтримує як наземні, і бортові види спостереження.

### ***Недоліки системи ADS-B***

Система залежить від належного оснащення всіх повітряних суден. Це може бути серйозною проблемою, оскільки потрібна установка та сертифікація навігаційного засобу, здатного надавати інформацію про місцезнаходження та швидкість поряд із вказівкою на цілісність та точність такої інформації;

Існуючі установки при отриманні даних про місцезнаходження та швидкість покладаються виключно на GNSS. Тому можливі відмови у випадках, коли рівень характеристик або геометрія супутникового угруповання є недостатніми для підтримки того чи іншого виду застосування. Цей недолік має бути усунений у майбутніх системах, що дозволяють інтегрувати інформацію GNSS з даними інших навігаційних датчиків. Крім того, поява системи Галілео має покращити роботу GNSS;

Слід передбачити можливість перевірки точності даних про місцезнаходження, що передаються.

### ***Переваги***

Трафік. При використанні ADS-B пілот може переглядати висоту, курс, швидкість та відстань до літаків поблизу, якщо вони оснащені ADS-B Out. Крім звітів про розташування літаків з ADS-B Out, TIS-B (тільки для США) може надавати звіти про місцезнаходження літаків, не обладнаних ADS-B Out, якщо існує відповідне наземне обладнання та наземний радар. ADS-R повторно передає звіти про місцезнаходження ADS-B між частотними смугами UAT та 1090 МГц. Система підвищує пропускну спроможність повітряного простору рахунок точності становища літаків.

Безпека у польоті. ADS-B — цінна технологія підвищення ефективності роботи бортової системи запобігання зіткнень (ACAS). Включення ADS-B може забезпечити такі переваги, як:

- зменшує кількість активних запитів, потрібних ACAS, що дозволяє збільшити дальність польоту в повітряному просторі з високою щільністю;
- зниження аварійних ситуацій рахунок включення вектора стану ADS-B, наміри літака та іншої інформації;
- використання дисплея ACAS як CDTI, що забезпечує позитивну ідентифікацію трафіку;
- розширені можливості запобігання зіткненням нижче 1000 футів над рівнем землі та виявлення вторгнень на злітно-посадкову смугу.

Погода. Літаки, оснащені універсальним приймачем доступу (UAT) типу «ADS-B In», може приймати метеозведення і працювати як метеорологічний радар через службу мовлення польотної інформації (FIS-B, тільки для США). На відміну від деяких альтернативних послуг за прогнозами погоди у польоті, які пропонують на комерційній основі, США не стягуватиметься абонентська плата за використання послуг ADS-B. Власник повітряного судна оплачує лише обладнання та установку, а Федеральна авіаційна адміністрація США (FAA) оплачує адміністрування та надання всіх послуг, пов'язаних із технологією.

Політна інформація. Служба мовлення польотної інформації (FIS-B) також передає політну інформацію, що читає, таку як тимчасові обмеження на польоти (TFRs) і NOTAMs, на повітряні судна, оснащені UAT (Тільки для США).

Витрати. Наземні станції типу ADS-B значно дешевші в установці та експлуатації порівняно з первинними та вторинними радіолокаційними системами, що використовуються УВС для управління повітряними суднами.

Екологічність. Технологія ADS-B забезпечує більш точний звіт про стан літака. Це дозволяє диспетчерам направляти повітряні судна у переповнений повітряний простір із меншими змінами маршруту, раніше робити це було не так безпечно. Це зменшує кількість часу, який літак витрачає у польоті. Дослідження

показують, що це вже благотворно впливає на навколишнє середовище за рахунок скорочення забруднення та споживання палива.

### ***Недоліки (загроза безпеці)***

Літак тільки з ретранслятором або без можливості його встановлення не відобразатиметься в системі ADS-B. Пілоти, які надто розраховують на систему, можуть зіткнутися з проблемами.

У 2012 році після дослідження безпеки було виявлено, що ADS-B не має захисту від втручання за допомогою підроблених повідомлень ADS-B, тому що вони не зашифровані і не автентифіковані. Федеральне управління цивільної авіації США відповіло на цю критику, заявивши, що вони знали про проблеми та ризики, але не можуть розкрити спосіб вирішення, оскільки це секретна інформація. Можливим рішенням є мультилатерація для перевірки того, що заявлена позиція близька до позиції, з якою було передано повідомлення. Тут час прийому повідомлень порівнюється з відстанню від антени до літака.

Відсутність будь-якої автентифікації у межах стандарту робить обов'язковим перевірку будь-яких отриманих даних з допомогою основного радара. Оскільки вміст повідомлень ADS-B не зашифрований, його може прочитати будь-хто [37].

## ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

У другому розділі було розглянуто такі багатофункціональні системи як:

- ADS-B
- ADS-C
- MLAT

Наведено характеристики та методи застосування, функціональні особливості та режими роботи. Разом з тим проведено аналіз недоліків та переваг використання кожної системи в певних випадках (за певних умов). Також проведено оцінку впливу кожної системи та її особливостей на пропускну здатність повітряного простору, що в свою чергу впливає на якість обслуговування польотів та їх затримки.

## РОЗДІЛ 3. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ-ОСНОВА ПРОГРАМИ

### 3.1. Поліноміальна модель руху літака

#### Поліноміальна регресія

Поліноміальна регресія - це загальний підхід, подібний до регресії лінійної кривої, де поліноміальна функція  $f$  повинна бути знайдена, щоб найкраще визначити набір точок вимірюваних даних. Тут коефіцієнти функції  $f$  підлягають задачі оптимальності мінімальної суми квадратів залишків  $f$  відповідно до вимірювань (варіативність підбору, GoF). Формулювання оптимальних коефіцієнтів як лінійної задачі найменших квадратів бере свій початок ще в минулому (Лежандр (1805) і Гаус (1809)); перше застосування можна знайти Жергонном у 1815 році). Було продемонстровано, що в середньому залишки такого оптимального полінома звертаються в нуль, а їх відхилення дорівнює зведенню до мінімуму. Крім того, поліноміальні функції визначаються основними математичними операціями додавання і множення і таким чином забезпечують за своєю природою плавність нескінченного диференціювання. Останній поліном моделі повноогибаючих аеродинамічних коефіцієнтів ГТМ представлені в [59,60].

#### Багатоваріантні сплайни

Сплайни — це часткові послідовності поліноміальних функцій, де кожен поліном активний лише в відповідній частині. Ці сплайни вибираються до підгонки, та не підлягають пригонці значень.

Підфункції поліномів обчислюються таким чином, що на межах вибраних розбитків загальна сплайн-функція є гладкою до певного ступеня безперервності. Таким чином, сплайн-функції показують характеристики обох пошукових таблиць та поліноми, як зазначають Віссер та ін.

Фактично сплайн-функції [...] об'єднують можливості глобального нелінійного моделювання таблиць пошуку з аналітичною, неперервною природою поліномів.

У той час, як для сплайн-функції з однією змінною межі дорівнюють по точковим з'єднанням, розбиття багатоваріантних сплайнів можуть бути більш складними. Крім простих прямокутників (прямокутних багатогранників), трикутні перегородки нещодавно запропоновані в [61]. Однак високій точності сплайнів з точки зору їх залишків протистоять їх обчислювальні витрати для подальшого аналітичного дослідження. Багатоваріантні сплайни були використані, серед іншого, у [62,63] для моделювання аеродинаміки з повним описом усіх варіацій.

### Методологія побудови поліноміальних моделей

У векторному позначенні оптимальні коефіцієнти для частково-поліноміальних підходів виражаються у вигляді лінійних найменших квадратів.

Введемо поліноміальне позначення векторами одночленів і коефіцієнтів, таким чином зменшимо добротність відповідності функції останнього. З'єднання буде задано скалярним полем  $\phi(\cdot)$  у змінних моделях і скалярна межа  $x_0$  (тут ми використовуємо  $\phi$  лінійною матричною нерівністю, а  $x_0$  буде визначатися підгонкою). Тоді отримана модель має єдине з'єднання з безперервністю значення, тобто модель не є диференційованою на з'єднанні. Для моделей з кількома змінними та виходами, такими як аеродинамічні коефіцієнти, бажано надати додаткові обмеження на прилягання. Додаємо ці бажані властивості часткової підгонки як матриці обмежень.

Лінійна задача найменших квадратів (LSQ) подається як задача оптимізації

$$\text{lsq}(C, d, A, 0) = \arg \min_{q \in \Omega_A} \|Cq - d\|_2^2$$

з  $q \in \mathbb{R}^p$ ,  $C \in \mathbb{R}^{k \times r}$ ,  $d \in \mathbb{R}^k$ , і  $\Omega_A = \{q \mid Aq = 0\}$  для матриці обмежень.

### Поліноми

Одночлен степеня  $n$  - це одиничний добуток степенів, де показники додаються до загального степеня  $n$ , без будь-якого скалярного коефіцієнта. Позначимо мономіал від  $x = (x_1, \dots, x_m)$  у степенях  $n = (n_1, \dots, n_m)$  як:

$$x^n = x_1^{n_1} \dots x_m^{n_m}$$

де  $x^n$  має загальний ступінь  $n = \|n\|_1 = n_1 + \dots + n_m$ .

$P_n(x)$  — вектор одночленів  $x^v$  у змінних  $x = (x_1, \dots, x_m)$  зі степенями  $v \in N^m$  і загальні ступені  $\|v\|_1 \leq n$ ; а кількість елементів у  $P_n(x)$  позначається через  $r[n]$ , тобто  $P_n \in R[x]^{r[n]}$ .

За цим позначенням поліном  $f$  виражається як скалярний добуток його мономів і коефіцієнтів,

$$f(x) = \langle P_n(x), q \rangle$$

з вектором коефіцієнтів  $q \in R^{r[n]}$

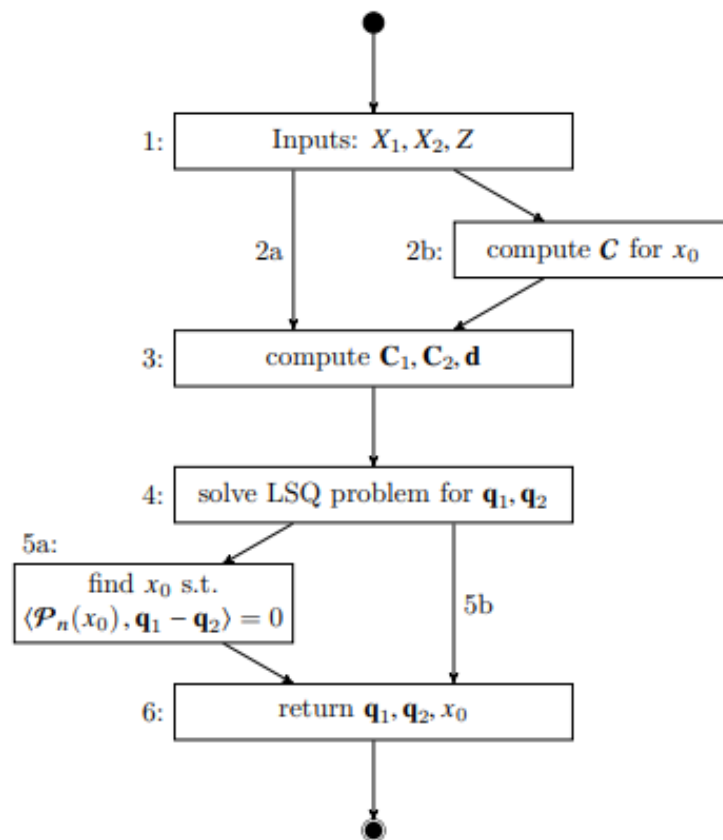


Рисунок 3.1 – Блок-схема для частково-поліноміального метод



## Часткова модель руху літака

Моделювання аеродинамічних коефіцієнтів GTM частково навколо кута атаки призводить до рівняння руху шести ступенів свободи:

$$f: (X, U) \rightarrow X = \begin{cases} f^{\text{pre}}(X, U) & \text{if } a \leq a_0; \\ f^{\text{post}}(X, U) & \text{else;} \end{cases}$$

де  $X$  та  $U$  позначають вектори стану та вхідні дані, тоді маємо:

$$X = [V \ a \ \beta \ \mu \ \gamma \ \chi \ p \ n \ q \ r \ \Phi \ \theta \ \Psi]^T$$

і  $U = [\xi \ \eta \ \zeta \ F]^T$ . Тут кути аеродинаміки ( $\alpha$ ,  $\beta$ ), повітряного шляху ( $\mu$ ,  $\gamma$ ,  $\chi$ ) і положення ( $\Phi$ ,  $\Theta$ ,  $\Psi$ ) визначаються осьовими системами ISO 1151-1 (рис. 3.2, рис 3.3): система осей тіла ( $x_f, y_f, z_f$ ) узгоджена з фюзеляжем літака; система осей повітряного шляху ( $x_a, y_a, z_a$ ) визначається вектором швидкості; та нормальна система закріпленої на землі осей ( $x_g, y_g, z_g$ ). Повітряна швидкість  $V$  – це абсолютна швидкість літака відносно повітря з показниками тіла ( $p, q, r$ ) (визначаються навколо осей тіла; як зазвичай, керуючими входами є елерон, руль вильоту, і прогини керма  $\xi, \eta, \zeta$  відповідно і тяга  $F$ ).

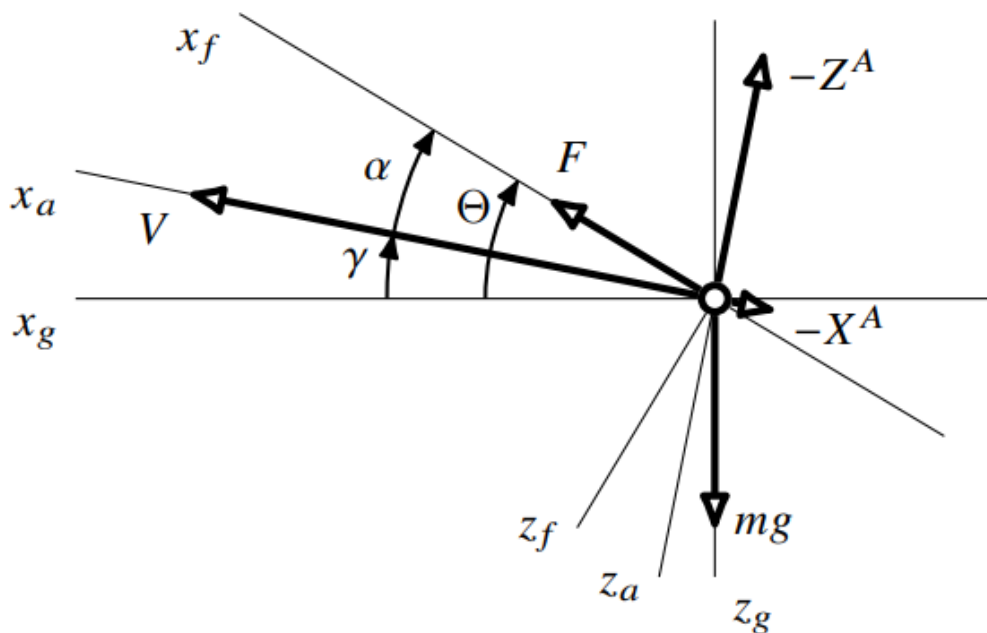


Рисунок 3.2 – Системи осей з кутами та векторами. Поздовжні осі ( $\beta = \mu = 0$ )

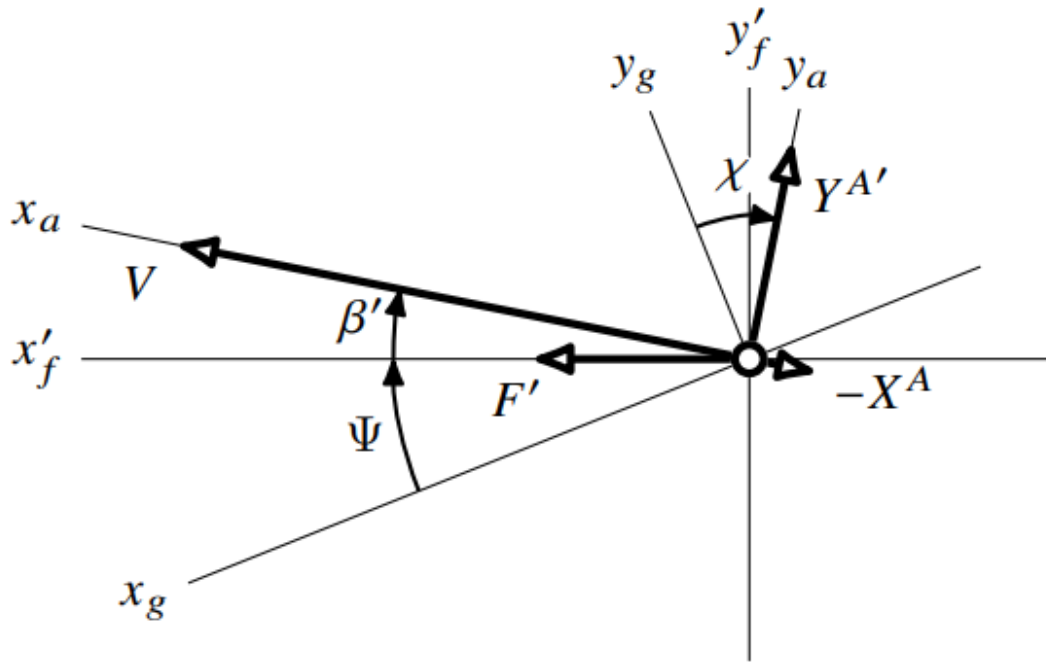


Рисунок 3.3 – Системи осей з кутами та векторами. Горизонтальні осі ( $\gamma = 0$ )

### Рівняння руху літака

Нелінійна система рівнянь руху для моделі літака з шістьма ступенями свободи GTM була запропонована в [64]. Так, зміни швидкості повітря  $V$ , бічного ковзання  $\beta$ , нахилу  $\gamma$  та азимуту  $\chi$  – залежить від підйому, опору, тяги та бічної сили (задається коефіцієнтами аеродинамічної сили  $C_X, C_Y, C_Z$  та вхідної тяги  $F$ ). Зміни кутових швидкостей тіла ( $p', q', r'$ ) визначаються коефіцієнтами аеродинамічного моменту  $C_1, C_m, C_n$ ; а зміни положення  $\Phi, \Theta, \Psi$  є функціями кутових швидкостей тіла.

Хоча розширення стосуються всіх видів часткових моделей (рівняння руху), у тому числі сплайнів, розмір задачі зростає із збільшенням кількості випадків. Зокрема для програмування суми квадратів, обчислювально нездійсненний.

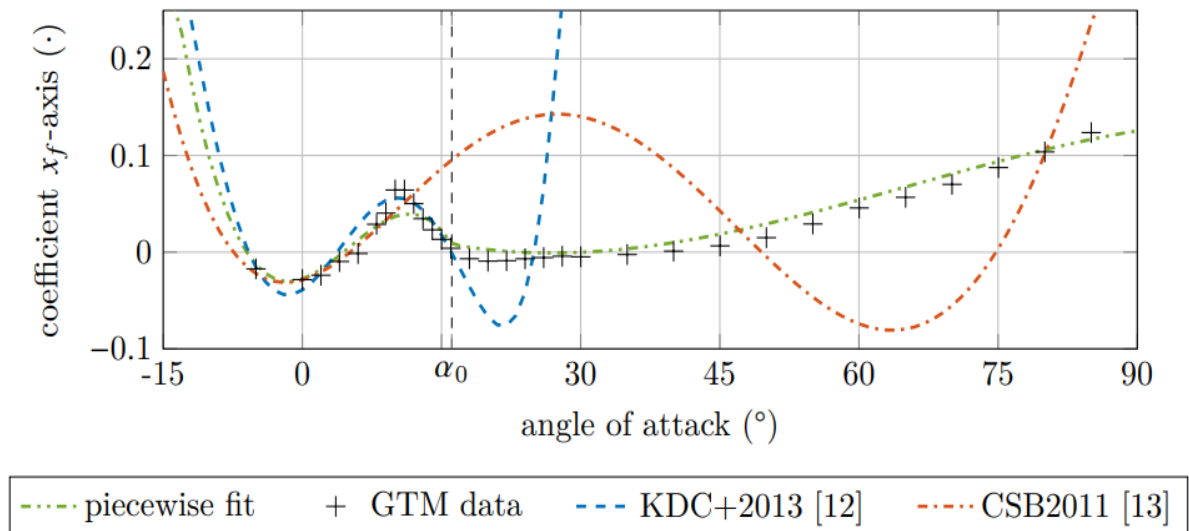


Рисунок 3.4 – Порівняння полінома 3-го порядку та часткових ідентифікацій.

### Аналіз часткових моделей

Функціональний аналіз аеродинамічних моделей з повним обігом, наприклад, умови продовження дифферента та оцінка зон тяжіння, дає уявлення про динамічні та статичні властивості системи в її розширеному діапазоні експлуатації.

Теорія продовження і біфуркації розглядає рівноваги динамічної системи:

$$\dot{X} = f(X, U, \mu),$$

де  $\mu$  позначає параметри продовження, які можуть включати змінні стану та керуючі входи. Також інші властивості  $f$ , такі як параметри системи або зовнішні впливи. За зміною параметрів  $\mu$  ми можемо аналізувати еволюцію, зокрема створення, зникнення та зміна стабільності гілок рівноваги  $(X^*, U^*, \mu^*)$ , тобто  $f(X^*, U^*, \mu^*) = 0$ , як функція  $\mu^*$ . Панелі інструментів, як Continuation Core і Набори інструментів (COCO) пропонують обчислення продовження та роздвоєння безперервних функцій. GTM.

Рівняння руху знаходяться в стані диферентації тоді і тільки тоді, коли повітряна швидкість та повітряний шлях постійні, тобто  $V' = \gamma' = 0$ ; бічна сила звертається в нуль,  $\beta' = 0$ ; показники тіла(літака) залишаються незмінними; а

кути крену та тангажу є постійний. Курс є постійним для горизонтального польоту ( $\Psi = \dot{\chi} = 0$ ). Тепер вибираємо параметри продовження поза повітряною швидкістю  $V$ , нахил  $\gamma$ , кут крену  $\mu$ , кут атаки  $\alpha$ , бокове ковзання  $\beta$ , нормовані швидкості  $\hat{p}, \hat{q}, \hat{r}$ , прогини поверхні  $\zeta, \eta, \xi$  і тяга  $F$ , залишаючи решту величин як вільні змінні. Звідси маємо систему рівнянь руху:

$$f(X, U, \mu) = \begin{cases} f^{\text{pre}}(X, U, \mu) & \text{if } a \leq a_0; \\ f^{\text{post}}(X, U, \mu) & \text{else;} \end{cases}$$

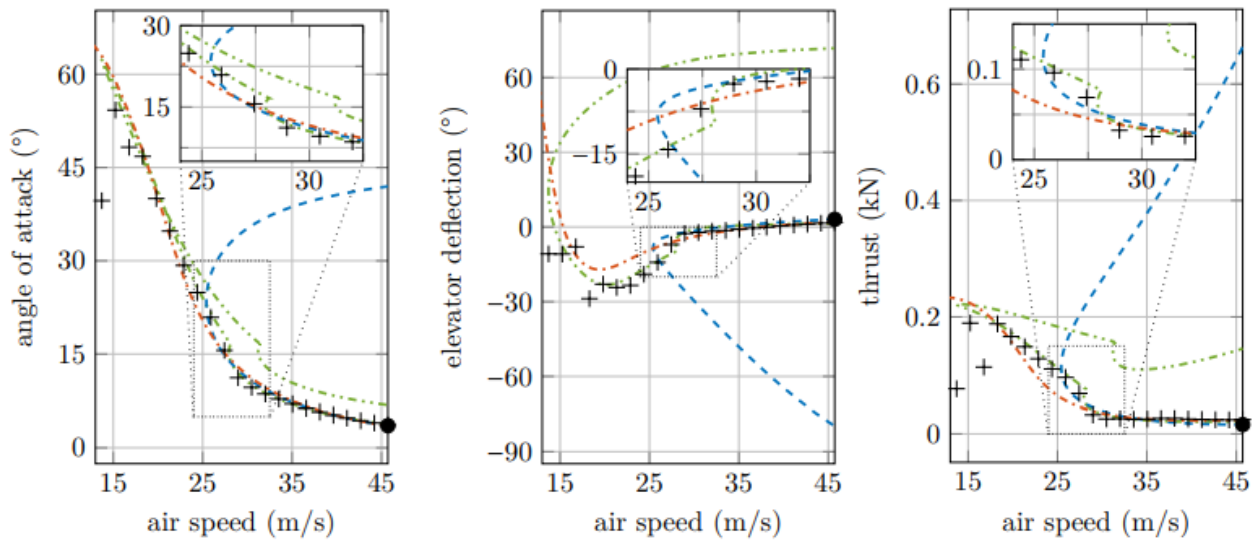


Рисунок .3.5 – Продовження поздовжньої динаміки GTM для поліноміального та часткового визначення моделі аеродинамічних коефіцієнтів та рівняння руху.

## ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

У розділі пропонується частково-поліноміальна підгонка аеродинамічних коефіцієнтів з одним з'єднанням, що представляє собою зміну динаміки аналізу даних при різних змінах рівняння руху. Цей підхід дає модель майже таку ж просту, як і поліноми, але зі збільшеною потужністю обчислення та сплайнами для врахування складних характеристик. З'єднання часткової моделі виправдано фізичними властивостями повітряної системи та також відповідностями. Без необхідності робити апіорний вибір що стосується підгонки, ми зберігаємо всі можливості поліноміальної підгонки. Також наведено приклад Generic Transport моделі (ми порівняли часткову модель аеродинамічних коефіцієнтів з наявними поліноміальними моделями в літературі, що підтверджує точність як часткових коефіцієнтів та сплайнів, так і умов диферування при вимірюванні вихідних даних GTM.

## **РОЗДІЛ 4. РОЗРАХУНКОВА МОДЕЛЬ ЧАСУ ЗАТРИМКИ ПРИБУТТЯ ЛІТАКА В АЕРОПОРТ ПРИЗНАЧЕННЯ**

Затримка повітряного руху є поширеною проблемою сучасної транспортної системи. Постійно зростаючий попит на систему повітряного руху та функціонування в умовах, що швидко змінюються, робить оцінку затримок ключовим елементом безпеки авіації. В роботі ми пропонуємо легкий статистичний метод прогнозування затримки при посадці літака в аеропорту призначення. Запропонований метод ґрунтується на обробці статистичних даних попередніх польотів для визначення середньої траєкторії літака на перед польотному етапі та постійного порівняння середньої траєкторії з поточним місцем розташування літака з метою визначення часу приземлення в аеропорту призначення. Просте розв'язання задачі мінімізації на етапі польоту на маршруті потребує низької обчислювальної потужності та гарантує необхідний діапазон довіри для результатів. Запропонований метод навчений на статистичних даних для маршрутів сполучення Бориспіль/Харків з метою прогнозування затримки літака.

### **4.1. Прогноз затримки за моделлю літака**

Один із можливих підходів до оцінки затримки ґрунтується на моделюванні польоту літака. Траєкторію руху літака можна передбачити за допомогою динамічної, кінематичної або простої поліноміальної моделі. Деякі моделі можуть враховувати динамічні характеристики літака, умови навколишнього середовища (підмодель повітряного потоку, швидкість вітру та кути), а також керуючу взаємодію в контурі. Але в задачах моделювання повітряного руху дуже часто використовується поліноміальна модель. Ці моделі розглядають рух літака як переміщення точки центру тяжіння із заданою постійною швидкістю або прискоренням у певному напрямку. Поліноміальна модель не включає характеристики літака, тому її можна легко застосувати при моделюванні потоку

повітряного руху. Моделювання зазвичай виконується у попередньо визначеній глобальній локальній декартовій системі координат [38,39].

У разі польоту з постійною швидкістю рух літака можна представити у вигляді поліноміальної моделі першого порядку:

$$X_i = X_{i-1} + Tt, \quad (4.1)$$

$$X_i = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix}, X_{i-1} = \begin{bmatrix} x_{i-1} \\ y_{i-1} \\ z_{i-1} \end{bmatrix}, T = \begin{bmatrix} V \cos(\gamma) \cos(\alpha) \\ V \cos(\gamma) \sin(\alpha) \\ V \cos(\gamma) \end{bmatrix}$$

де  $X_i$ ,  $X_{i-1}$  – матриці поточного та попереднього розташування літака;  $T$  — матриця спрямованих швидкостей;  $V$  – швидкість літака;  $\alpha$  - курс літака;  $\gamma$  – кут нахилу;  $t$  – час між ітераціями.

Послідовна операція застосовується при моделюванні руху літака за формулою (3.1) з розрахунком розташування на кожному кроці ітерації. Змодельована траєкторія літака — це набір точок на кожному кроці ітерації. Модель (3.1) розглядає рух літака в умовах вільного простору. Підвищення продуктивності моделі (3.1) можна здійснити шляхом введення умов навколишнього середовища у вигляді швидкості та напрямку вітру. У цьому випадку математичні співвідношення в трикутнику швидкостей використовуються для розрахунку земної швидкості:

$$V_{\text{ground}} = V_{\text{TAS}} \cos(\alpha - \beta) + U \cos(\beta - \phi), \quad (4.2)$$

де  $V_{\text{TAS}}$  – справжня повітряна швидкість;  $\beta$  - кут нахилу колії;  $U$  – швидкість вітру;  $\phi$  - напрямок вітру [40,41,42,58].

Для моделювання повітряного руху з формулою (3.2) потрібно точно знати швидкість і напрям вітру на кожному кроці ітерації. Дані про навколишнє середовище можуть бути отримані з авіаційної метеорологічної служби для кожної точки ітерації в поточний часовий проміжок. На жаль, стан навколишнього середовища не є постійним протягом усього польоту, тому коливання погодних даних вносить екологічну помилку.

Попередньо заплановану траєкторію літака, отриману з очищених даних плану польоту, даних про погоду та фактичного розташування літака, можна

використовувати для оцінки довжини траєкторії та часу приземлення в прогнозі аеропорту призначення. Затримка – це різниця між запланованим і прогнозованим часом приземлення в аеропорту призначення. На жаль, коливання погоди в часі та невизначеність вирівнювання польоту під час польоту є основними недоліками моделі (4.1) та (4.2).

## 4.2. Статистичний метод

Час прибуття літака в аеропорт призначення можна оцінити за допомогою статистичної обробки даних. Численні історичні дані польоту використовуються для аналізу статистичних даних траєкторії. Статистичні дані використовують дію різних факторів для оцінки затримок, включаючи погоду та сторону авіакомпанії. Легкий статистичний метод прогнозування затримок (LSMDP) ґрунтується на «петлевому» порівнянні поточних координат літака з результатами обробки статистичних даних наявних даних попередніх історичних польотів на тій же траєкторії польоту. Структурна схема LSMDP показана на рис. 4.1 [42,43,57].

Перед польотна частина LSMDP включає збір історичних польотних даних попередньої реалізації польоту. Вхідні дані можуть бути отримані з бази даних вторинного оглядового радару або отримані та декодовані з цифрових повідомлень, переданих авіаційним транспондером у режимі 1090ES. Дані, що передаються в автоматичному залежному навігаційному передачі (ADS-B), включають вимірювання координат літака за допомогою глобальної навігаційної супутникової системи (GNSS) або результат позиціонування навігаційними засобами, у разі несправності GNSS. Ці дані включають координати, представлені в широті, довготі та висоті (висота у формі еліпсоїда WGS84), зібрані під час не синхронізації вимірювань. Кожен на борту транспондер ADS-B має свої унікальні налаштування передачі даних, також кілька цифрових повідомлень можуть бути втрачені в цифровому каналі зв'язку через переривання лінії радіопередачі або перешкоди іншому обладнанню.



Для спрощення обчислень ми перетворюємо координати літака з представлення широти, довготи, висоти (LLA) для глобальної декартової системи відліку з центром Землі (ECEF). Орієнтирна точка ECEF розташована в центрі тяжіння Землі.

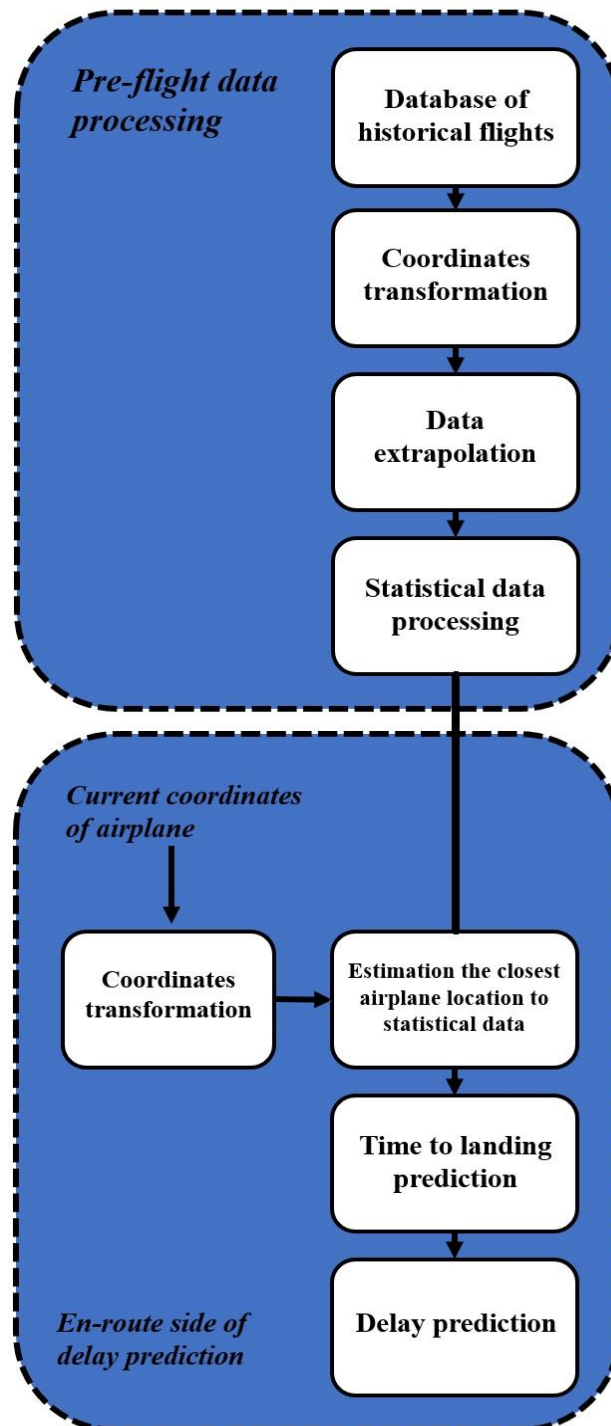


Рисунок 4.1 – Робота LSMDP

Доступні дані спостереження з різних рейсів можна синхронізувати за допомогою лінійної регресії. У нашому дослідженні ми використовуємо модель лінійної регресії з кубічними сплайнами другого порядку безперервності:

$$S(t) = \sum_{j=1}^{N+3} B_{j,m}(t)C_j, 0 \leq t \leq T, \quad (4.3)$$

де  $C_j$  – вектор контрольних точок;  $B_{j,m}(t)$  – основні функції В-сплайна;  $T$  – час польоту. [42,43,44]

В якості базисної функції В-сплайна ми використовуємо функцію Кокса-Де Бура. Ця функція визначає  $j$ -у базову функцію В-сплайна певного порядку. Для порядку  $m=1$  функція матиме вигляд:

$$B_{j,1}(t) = \begin{cases} 1, & \tau_j \leq t \leq \tau_{j+1} \\ 0, & \tau_j > t > \tau_{j+1} \end{cases}, \quad (4.3)$$

для  $m \geq 2$  :

$$B_{j,m}(t) = \frac{t - \tau_j}{\tau_{j+m-1} - \tau_j} B_{j,m-1}(t) + \frac{\tau_{j+m} - t}{\tau_{j+m} - \tau_{j+1}} B_{j+1,m-1}(t)$$

де  $\tau$  — множина вузлів.

Вузли  $\tau$  можна обчислити рівно відстань, центральним або хордовим методом. Завдяки методу рівновіддаленості вузли можна розрахувати так:

$$\tau_i = a + (i-1) \frac{b-a}{N-1}$$

де  $a$  і  $b$  — середина та кінцева точки;  $N$  — загальна кількість доступних точок даних.

Рівняння (4.3) можна представити у наступному вигляді:

$$S = B \cdot C, \quad (4.4)$$

$$S = \begin{bmatrix} x_{11} & y_{12} & z_{13} & t_1 \\ x_{21} & y_{22} & z_{23} & t_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{n1} & y_{n2} & z_{n3} & t_n \end{bmatrix}; \quad C = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & t_1 \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & t_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ c_{n1} & c_{n2} & c_{n3} & t_n \end{bmatrix};$$

$$B = \begin{bmatrix} B_{1,m}(t_1) & B_{2,m}(t_1) & B_{3,m}(t_1) & \cdots & B_{n,m}(t_1) \\ B_{1,m}(t_2) & B_{2,m}(t_2) & B_{3,m}(t_2) & \cdots & B_{n,m}(t_2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ B_{1,m}(t_n) & B_{2,m}(t_n) & B_{3,m}(t_n) & \cdots & B_{n,m}(t_n) \end{bmatrix},$$

де  $S$  — матриця сплайнів;  $B$  — матриця базисних функцій;  $C$  — матриця контрольних точок.

Матрицю контрольних точок можна отримати з розв'язку (4.4) методом найменшого квадрата:

$$C = (B^T B)^{-1} B^T S. \quad (4.5)$$

Тоді отримана за (4.5) матриця контрольних точок  $C$  використовується в (4.4) для інтерполяції даних для необхідного часового ряду.

Інтерпольовані дані до унікальних часових рядів для різних польотів використовуються в інструменті статистичної оцінки для оцінки середнього та стандартного відхилення. Середні значення формують середню траєкторію, стандартні відхилення утворюють довірчу смугу і можуть бути візуалізовані як трубка, яка обмежує розташування літака в радіусі  $2\sigma$  для 95% або в  $3\sigma$  для 99% разів [45,46,56].

Час приземлення в аеропорту призначення можна розрахувати для кожної точки середньої траєкторії літака.

Під час маршруту LSMDP виміряні координати літака перетворюються в ECEF і порівнюються із середньою траєкторією, оціненою раніше.

Індекс часу поточного місцезнаходження літака, пов'язаний з історичними траєкторіями, можна оцінити наступним чином:

$$i = \min \left( (x_{acft} - x_{mj})^2 + (y_{acft} - y_{mj})^2 + (z_{acft} - z_{mj})^2 \right) \quad (4.6)$$

де  $x_{acft}$ ,  $y_{acft}$ ,  $z_{acft}$  – розташування літака в ECEF;  $x_{mj}$ ,  $y_{mj}$ ,  $z_{mj}$  — матриці середньої траєкторії.

Нарешті, час затримки можна оцінити шляхом легкого порівняння часу з приземленням, отриманим за прогнозований час індекс поточного розташування літака та запланований час приземлення [47,48,49].

На жаль, представлений метод прогнозування часу затримки приземлення в аеропорту призначення може бути використаний тільки для рейсів з відповідним розміром навчальної вибірки і не може бути застосований для першого маршруту або з розміром чистої бази даних.

### 4.3. Чисельна демонстрація

Як приклад, для чисельної демонстрації запропонованого LSMDB ми використовуємо дані рейсу маршруту AUI25 МАУ «Міжнародні Авіалінії України» з Києва (Міжнародний аеропорт «Бориспіль», KBP) до Харкова (Міжнародний аеропорт «Харків», HRK). Ми розглядаємо 81 історичний рейс з 2 жовтня 2019 року по 1 січня 2020 року. Політ виконується літаками сімейства Embraer ERJ-190 (30 разів) та Boeing 737 (51 раз). Довжина польоту в середньому становить 221 миль, а середній час польоту становить 34 хвилини.

Ми використовуємо програмно-визначене радіо для отримання звітів про місцезнаходження транспондера літака у форматі ADS-B. Декодовані дані про місцезнаходження досліджуваного польоту зберігаються в локальній базі даних у форматі LLA. Координати літака в місцевій декартовій системі координат NEU з опорною точкою розташування аеропорту KBR представлені на рис. 4.2. Подвійна смуга довіри  $\sigma$  представлена пунктирними лініями (на рис. 4.2) для середньої траєкторії. Статистичний аналіз середньої швидкості літака представлений на (рис. 4.3) [50,51].

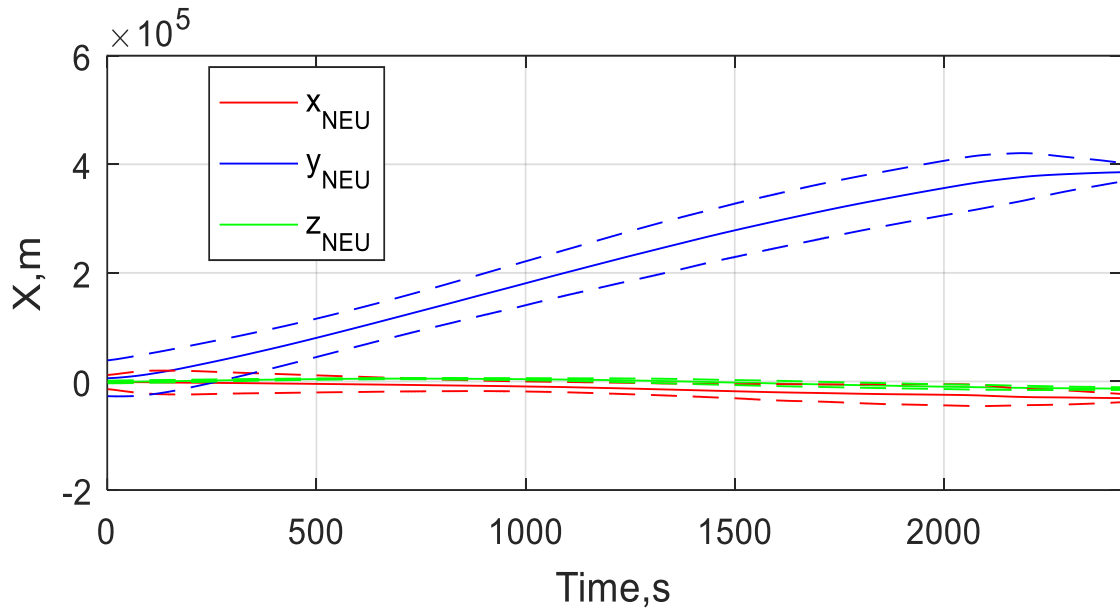


Рисунок 4.2 – Середні розташування маршруту AUI25 в системі відліку NEU

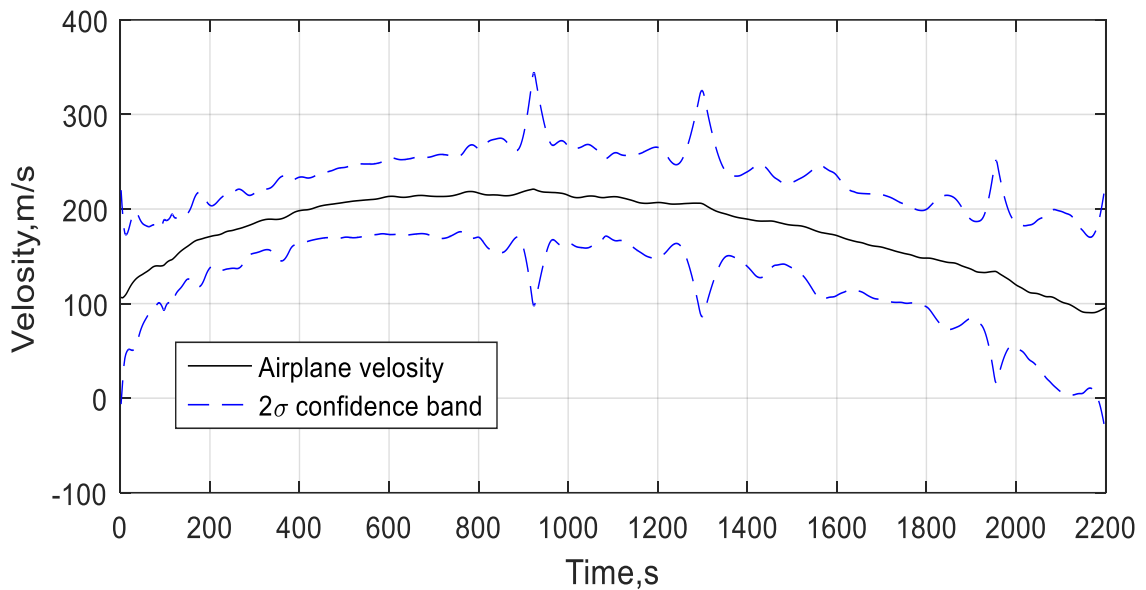


Рисунок 4.3 – Швидкість літака

Статистика відхилень від середньої траєкторії в трьох вимірах представлена на рис. 4.4. Нормована частота відхилень літака за напрямками в системі відліку NEU шириною 1000 м використовує помилку навігаційної системи та технічні помилки польоту. Результати статистичного аналізу відхилень літака вказують на середнє значення  $2,3 \times 10^{-12}$  м та 1,2 км середньоквадратичного відхилення.

Також ми використовуємо подвійний одновимірний узагальнений розподіл помилок (DUGED) як функцію щільності ймовірності відхилень літака:

$$\rho(x) = \alpha \frac{1}{2a_1 b_1 \Gamma(b_1)} \exp\left(-\left|\frac{x-\mu_1}{a_1}\right|^{b_1-1}\right) + (\alpha - 1) \frac{1}{2a_2 b_2 \Gamma(b_2)} \exp\left(-\left|\frac{x-\mu_2}{a_2}\right|^{b_2-1}\right), \quad (4.7)$$

де  $\alpha$  - ймовірність грубої навігаційної помилки;  $a_1$  і  $a_2$  – масштабні коефіцієнти;  $b_1$  і  $b_2$  – коефіцієнти форми;  $\mu_1$  і  $\mu_2$  – середні значення;  $\Gamma(x)$  — гамма-функція Елієра [52,53].

Результати підгонки навчальної вибірки до DUGED методом найменших квадратів представлені на рис. 4.4 і дають такі параметри:

$$\alpha = 0,55; \mu_1 = -0,03; \mu_2 = 0,007; a_1 = a_2 = 7492; b_1 = b_2 = 0,75.$$

Середньоквадратична помилка прогнозування часу затримки, що оцінюється за вибіркою навчання, представлена на рис.4.5.

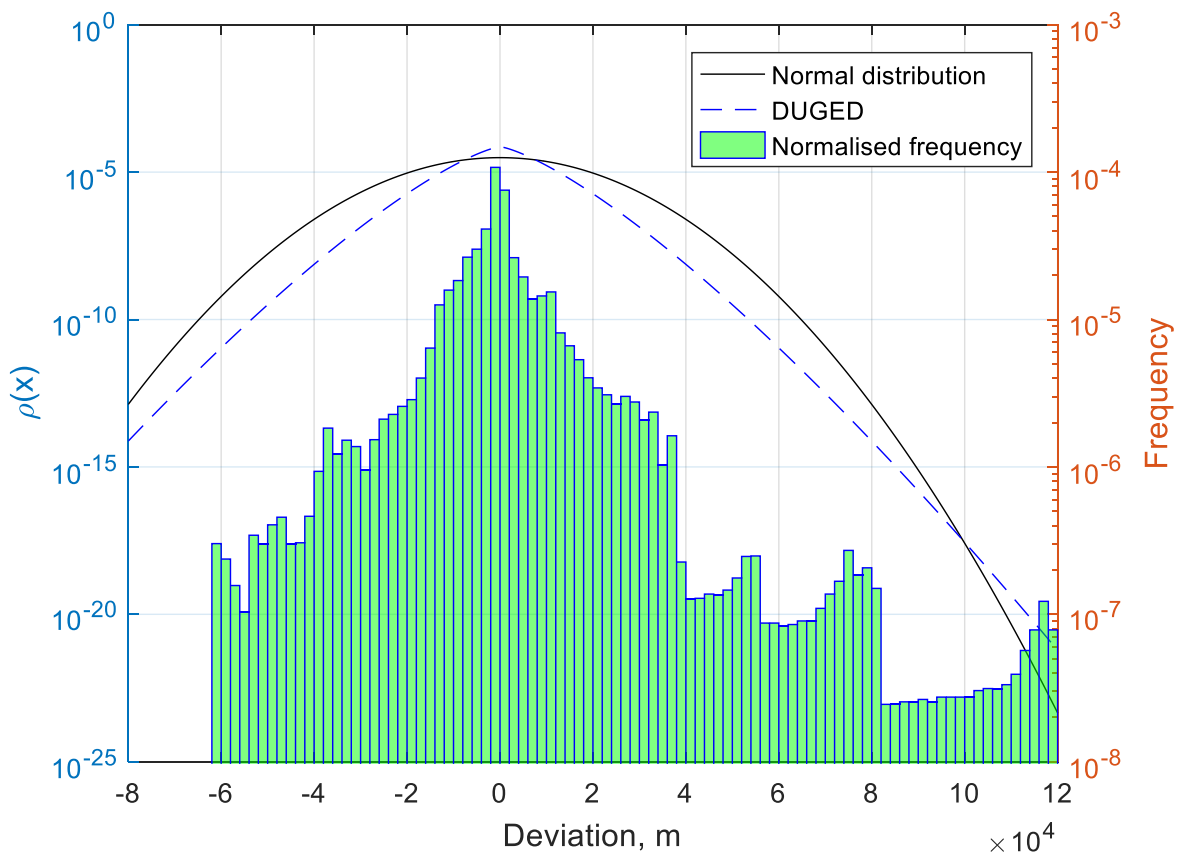


Рисунок 4.4 – Гістограма відхилень траєкторії

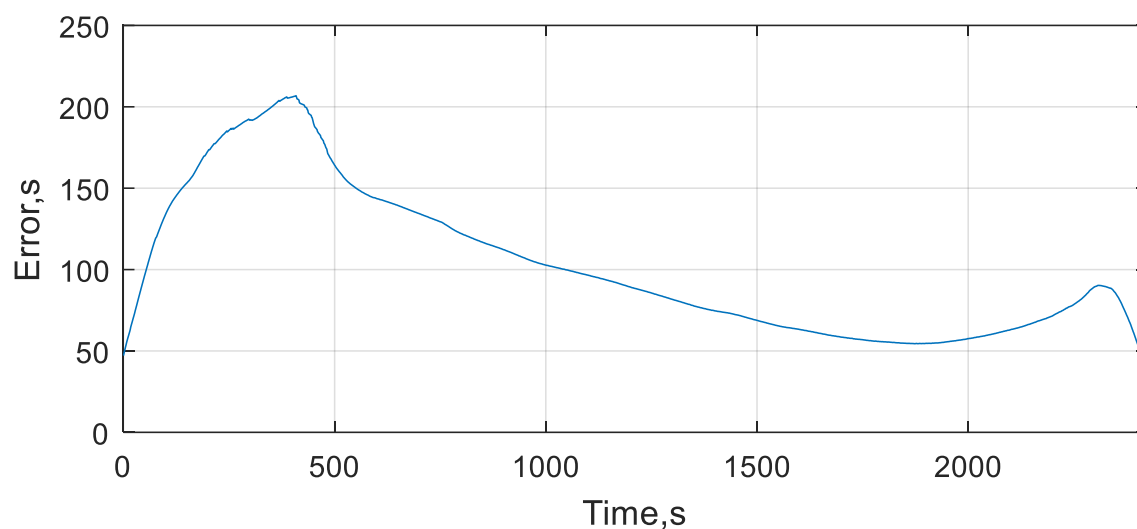


Рисунок 4.5 – Середня квадратична помилка передбачення затримки

На початковій частині польоту помилка прогнозування є відносною і може досягати 3 хвилин, але під час статистики польоту помилка постійно зменшується після приземлення в аеропорту призначення [54,55].

## ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4

У четвертому розділі запропоновано статистичний метод для оцінки часу затримки прибуття літака в аеропорт на основі місцезнаходження літака та середніх параметрів траєкторії, оцінюється за навчальною вибіркою з виконання попередніх маршрутів польотів.

Запропонований метод використовується для оцінки затримок у сполученнях рейсів між аеропортами Бориспіль та Харків. Оцінювач LSM був навчений з 81 зразком даних ADS-B для “AUI25”. Отримані результати показують низьку продуктивність на початку польоту та тенденцію до збільшення до кінця маршруту через скорочення часу прогнозування.

Також статистичний аналіз наявних даних використовується для оцінки параметрів траєкторії та дослідження поведінки відхилення літака від заздалегідь запланованої траєкторії. Отримані параметри функції щільності ймовірності можуть бути використані в багатьох моделях оцінки ризику для аналізу безпеки.

Статистичний аналіз затримок допомагає покращити оптимізацію взаємодії між авіаційними службами, персоналом, використанням допоміжних систем та багатьма іншими факторами, щоб мінімізувати вплив на загальну затримку. LSM, як модуль прогнозування затримки кожного маршруту, може бути реалізований в моделі оцінки загальної затримки в аеропорту.

LSM підтримує оцінку затримки в режимі реального часу з даними про місцезнаходження літака в якості вхідних даних. Проста формула для обчислення індексу часу (6) показує кращу продуктивність у часі обчислень у порівнянні з підходами на основі моделі літака. Маючи можливість розрахувати час затримки ще в польоті, ми вже можемо вжити необхідних дій (прискорити, змінити маршрут (якщо можливо), вибрати вікно в розкладі прибуття на пізній рейс), щоб мінімізувати негативний вплив затримок. Відповідно, якщо під час розрахунку виявиться, що літак прибуде в аеропорт раніше необхідного часу, ми також можемо виконати певний ряд дій, які дозволять літаку прибути вчасно і не порушувати розклад аеропорту (зниження швидкості, забезпечення рейсу вікном



у розкладі прибуття (за можливості)). Ця перевага цього методу також стане в нагоді в контурі управління повітряним рухом, оскільки допоможе значно зменшити необхідність відправляти запізнілих або раніше прибулих користувачів на повторні кола (зменшити навантаження на зону заходу, також заощадити паливо та викиди), шукайте вікно для посадки, створюючи тим самим чергу на таксі та на зліт.

## ВИСНОВКИ ДО ДИПЛОМНОЇ РОБОТИ

Базуючись на оброблених джерелах, в першому розділі поведено огляд загальних положень відносно причин та наслідків затримок літаків на різних етапах польоту. Також розглянуто структурні характеристики аеропортів, їх розвиток та тенденції виходу із стагнації (що в свою чергу має безпосередній вплив на пропускну здатність споруд та аеропортового комплексу в цілому). Наведено інструменти та методики покращення (оптимізації) управління та обслуговування повітряного руху. Проведено аналіз прямого впливу ефективності використання повітряного простору на пропускну здатність та затримки польотів. Надано пропозиції застосування методів і засобів прогнозування пропускну здатності в аеронавігаційній системі України (для оптимізації УПР).

У другому розділі було розглянуто такі багатофункціональні системи як:

- ADS-B;
- ADS-C;
- MLAT.

Наведено характеристики та методи застосування, функціональні особливості та режими роботи. Разом з тим проведено аналіз недоліків та переваг використання кожної системи в певних випадках (за певних умов). Також проведено оцінку впливу кожної системи та її особливостей на пропускну здатність повітряного простору, що в свою чергу впливає на якість обслуговування польотів та їх затримки.

У третьому розділі пропонується частково-поліноміальна підгонка аеродинамічних коефіцієнтів з одним з'єднанням, що представляє собою зміну динаміки аналізу даних при різних змінах рівняння руху. Цей підхід дає модель майже таку ж просту, як і поліноми, але зі збільшеною потужністю обчислення та сплайнами для врахування складних характеристик. З'єднання часткової моделі виправдано фізичними властивостями повітряної системи та також відповідностями. Без необхідності робити апріорний вибір що стосується підгонки, ми зберігаємо всі можливості поліноміальної підгонки. Також наведено

приклад Generic Transport моделі (ми порівняли часткову модель аеродинамічних коефіцієнтів з наявними поліноміальними моделями в літературі, що підтверджує точність як часткових коефіцієнтів та сплайнів, так і умов диферування при вимірюванні вихідних даних GTM).

У четвертому розділі запропоновано статистичний метод для оцінки часу затримки прибуття літака в аеропорт на основі місцезнаходження літака та середніх параметрів траєкторії, оцінюється за навчальною вибіркою з виконання попередніх маршрутів польотів.

Запропонований метод використовується для оцінки затримок у сполученнях рейсів між аеропортами Бориспіль та Харків. Оцінювач LSM був навчений з 81 зразком даних ADS-B для "AUI25". Отримані результати показують низьку продуктивність на початку польоту та тенденцію до збільшення до кінця маршруту через скорочення часу прогнозування.

Також статистичний аналіз наявних даних використовується для оцінки параметрів траєкторії та дослідження поведінки відхилення літака від заздалегідь запланованої траєкторії. Отримані параметри функції щільності ймовірності можуть бути використані в багатьох моделях оцінки ризику для аналізу безпеки.

Статистичний аналіз затримок допомагає покращити оптимізацію взаємодії між авіаційними службами, персоналом, використанням допоміжних систем та багатьма іншими факторами, щоб мінімізувати вплив на загальну затримку. LSM, як модуль прогнозування затримки кожного маршруту, може бути реалізований в моделі оцінки загальної затримки в аеропорту.

LSM підтримує оцінку затримки в режимі реального часу з даними про місцезнаходження літака в якості вхідних даних. Проста формула для обчислення індексу часу (6) показує кращу продуктивність у часі обчислень у порівнянні з підходами на основі моделі літака. Маючи можливість розрахувати час затримки ще в польоті, ми вже можемо вжити необхідних дій (прискорити, змінити маршрут (якщо можливо), вибрати вікно в розкладі прибуття на пізній рейс), щоб мінімізувати негативний вплив затримок. Відповідно, якщо під час розрахунку

виявиться, що літак прибуде в аеропорт раніше необхідного часу, ми також можемо виконати певний ряд дій, які дозволять літаку прибути вчасно і не порушувати розклад аеропорту (зниження швидкості, забезпечення рейсу вікном у розкладі прибуття (за можливості)). Ця перевага цього методу також стане в нагоді в контурі управління повітряним рухом, оскільки допоможе значно зменшити необхідність відправляти запізнілих або раніше прибулих користувачів на повторні кола (зменшити навантаження на зону заходу, також заощадити паливо та викиди), шукайте вікно для посадки, створюючи тим самим чергу на таксі та на зліт.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Адизес, И. Управление жизненным циклом корпорации / И. Адизес ; пер. с англ. ; под научн. ред. А. Г. Сеферяна. – СПб. : Питер, 2007. – 384 с.
2. Ашфорд, Н. Функционирование аэропорта / Н. Ашфорд, Х. П. М. Стентон, К. А. Мур; Пер. С англ. В. И. Ноздрина. – М.: Транспорт, 1991. – 372с.
3. Блохин, В. И. Основы проектирования аэропортов / В. И. Блохин. – М.: Транспорт 1985. – 208 с.
4. Бондаренко, В. Перспектива создания аэропорта-хаба в Московском авиационном узле /В. Бондаренко, В. Котин // Аэропорты. – № 4. – 2004. – С. 12-16.
5. Запорожець, В. В. Аеропорт: організація, технологія, безпека / В. В. Запорожець, М. П. Шматко.— К. : Дніпро, 2002. — 168 с.
6. Милая, А. В. Управление инфраструктурой аэропортовмалой интенсивности полётов: автореферат дисс, канд. экон. наук / А. В.Милая. – Владивосток, 2012. – 24 с.
7. Мильнер, Б. З. Теория организации: учебник / Б. З. Мильнер. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : ИНФРА-М, 2000. – 480 с.
8. Полянская Н. Е. Доходы международных аэропортов/ Н. Е. Полянская, Ю. А. Паламарчук, Н. А. Полянская // Економіка: проблеми теорії та практики: Зб. наук. пр. Випуск 246; в 5 т. Т. 2. – Дніпропетровськ : ДНУ, 2008. – С. 445–455. ISSN 1993-0259. ISSN 2219-4649. Економічний аналіз. 2013 рік. Том 14. № 2.
9. Полянская, Н. Е. Организация коммерческой работы на воздушном транспорте /Н. Е. Полянская. – К.: НАУ, 2004.
10. Пригожин, А. И. Современная социология организации / А. И. Пригожин. – М.: Интерпракс, 1995. – 295 с.
11. Распопов, В. М. Управление изменениями / В. М. Распопов. – М. : Магистр, 2009. – 333 с.
12. Спасский, Ф.Я. Планировка летной зоны аэропорта [Текст] / Ф. Я. Спасский // ВАУ ГА. – Л.: Нева, 1967.

13. Широкова, Г. В. Жизненный цикл организации: концепции и российская практика /Г. В. Широкова. – 2-е изд. – СПб.: Высшая школа менеджмента; Издат. дом С.-Петербур. гос. ун-та, 2008.
14. European Network Operations Plan .2016-2019/20Edition:1.1 June 2016, EUROCONTROL.
15. ATFCM Operations Manual. Edition 20.1. November2016, EUROCONTROL.
16. High Level Network Operational Framework2019.Edition 2.0. January 2016. – Network Management Board, EUROCONTROL.
17. European Route Network Improvement Plan 2016-2019/20 Part 2 European ATS Route Network. Edition 1.0. June 2016, EUROCONTROL NMD/NOM/OPL.
18. [Электронный ресурс]. – Доступ до электронного ресурсу : <http://www.eurocontrol.int/articles/atfcm-modelling-tools>.
19. [Электронный ресурс]. – Доступ до электронного ресурсу: <https://www.eurocontrol.int/articles/air-traffic-flow-and-capacity-management>.
20. ATFCM Users Manual. Edition:20.1.1. November2016, EUROCONTROL.
21. EUROCONTROL Seven-Year Forecast September2016. Flight Movements and Service Units 2016-2022. Octo-ber 2016, STATFOR Team.
22. [Электронный ресурс]. – Доступ: <http://www.eurocontrol.int/ddr>.
23. [Электронный ресурс]. – Доступ: <http://www.eurocontrol.int/services/nest-modelling-tool>.
24. A Guide to the Network Manager Operations Cen-tre.January 2015, EUROCONTROL.
25. Frank Dowling .Sector Capacity assessment forDublin ACC. February 1998.
26. Challenges of growth 2013. Task 7: European AirTraffic in 2050. June 2013, EUROCONTROL.

27. Challenges of growth 2013.Task 4: European AirTraffic in 2035. June 2013, EUROCONTROL.
28. Alex Smith. ADS-X extended ADS-B surveillance. Rannoch Corporation, 2006.
29. Система Автоматического Зависимого Наблюдения в Режиме Радиовещания (ADS-B) для ведения наблюдения ВОЗДУХ – ЗЕМЛЯ [Электронный ресурс]. – Доступ: [http://adsbradar.ru/AN-Conf\\_11-WP/127](http://adsbradar.ru/AN-Conf_11-WP/127).
30. Cir 326. Оценка наблюдения с использованием систем ADS-B и мультилатерации в целях обеспечения обслуживания воздушного движения и рекомендации по их внедрению. – ИКАО, 2013.
31. ADS-B. [Электронный ресурс]. – Доступ: <http://era.aero/technology/ads-b-2/>.
32. ADS-X. [Электронный ресурс]. – Доступ: <http://era.aero/technology/ads-x/>.
33. Automatic Dependent Surveillance – Broadcast ( ADS-B ) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://era.aero/solutions/air-traffic-management/ads-b/>.
34. ADS-B Технология (TIS-B, FIS-B) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://adsbradar.ru/ads-b\\_fis-b\\_tis-b\\_technology](http://adsbradar.ru/ads-b_fis-b_tis-b_technology).
35. ADS-X – интеграция MLAT и ADS-B систем [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://adsbradar.ru/ads-b-mlat-ads-x>.
36. Automatic Dependent Surveillance – Rebroadcast (ADS-R) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://adsbradar.ru/automatic-dependent-surveillance-rebroadcast-ads-r>.
37. ALAS [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://adsbradar.ru/alas-ads-b-extension-with-globalstar-sat>.
38. CODA digest. All-Causes Delay and Cancellations to Air Transport in Europe, Eurocontrol, 2018.
39. O. Solomentsev and M. Zaliskyi, “Correlated failures analysis in navigation system,” Methods and Systems of Navigation and Motion Control: MSNMC 2018, 5th International Conference of IEEE, October 2018, pp. 123-126.

40. T. Shmelova, Y. Sikirda, C. Scarponi, and A. Chialastri, "Deterministic and stochastic models of decision making in air navigation socio-technical system," CEUR Workshop Proceedings, 2018, pp. 1–8.
41. J. Lovera, I. Hwang, and M. Rotea, "New algorithms for aircraft intent inference and trajectory prediction," *Journal of guidance, control, and dynamics*, vol. 30, pp. 370-382, 2007.
42. M. Jackson, Y. Zhao, and R. Slattery, "Sensitivity of trajectory prediction in air traffic management," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 22, pp. 219-228, 1999.
43. J. Jose and H. Balakrishnan, "Characterization and prediction of air traffic delays," *Transportation research. Part C: Emerging technologies*, vol. 44, pp. 231-241, 2014.
44. J. Vicente, J. Perez–Sanchez, and E. Gomez–Deniz, "Modelling the asymmetric probabilistic delay of aircraft arrival," *Journal of Air Transport Management*, vol. 62, pp. 90-98, 2017.
45. E. Mueller and C. Gano, "Analysis of aircraft arrival and departure delay characteristics," *AIAA's Aircraft Technology, Integration, and Operations (ATIO) Technical Forum*. pp. 1-14, 2002.
46. B. Sridhar and C. Neil, "Short-term national airspace system delay prediction using weather impacted traffic index," *Journal of guidance, control, and dynamics*, vol. 32.2 pp. 657-662, 2009.
47. D. Smith and S. Lance, "Decision support tool for predicting aircraft arrival rates from weather forecasts," *Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference, IEEE, Bethesda, MD, 2008*, pp. 1-12.
48. F. Rehm, "Prediction of aircraft delay at Frankfurt airport as a function of weather," *German Aerospace Center, Germany, 2004*.
49. *Minimum Operational Performance Standards for 1090MHz Automatic Dependent - Broadcast (ADS-B)*, RTCA, DO-260/ED-102, Washington DC, USA, 2008.



50. N.S. Kuzmenko, and I.V. Ostroumov, "Performance Analysis of Positioning System by Navigational Aids in Three Dimensional Space," *System Analysis & Intelligent Computing: SAIC 2018 1st International Conference of IEEE*, October 2018, pp. 101-104.

51. N.S. Kuzmenko, I.V. Ostroumov, and K. Marais, "An Accuracy and Availability Estimation of Aircraft Positioning by Navigational Aids," *Methods and Systems of Navigation and Motion Control: MSNMC 2018 5th International Conference of IEEE*, October 2018, pp. 36-40.

52. I.V. Ostroumov, V.P. Kharchenko, and N.S. Kuzmenko, "An airspace analysis according to area navigation requirements," in *Aviation*, vol. 23, issue 2, 2019, pp. 36-42.

53. D. Pales, V. Valikova, J. Antl, and F. Toth, "Approximation of vehicle trajectory with b-spline curve," *Acta Technologica Agriculturae*, vol.19(1), pp.1-5.

54. V.P. Kharchenko, N.S. Kuzmenko, A.G. Kukush, and I.V. Ostroumov, "Multi-parametric data recovery for unmanned aerial vehicle navigation system," *Methods and Systems of Navigation and Motion Control: MSNMC 2016 4th International Conference of IEEE*, October 2016, pp. 295-299.

55. G. Giller, *A Generalized Error Distribution*, 2013.

56. Review of the General Concept of Separation Panel (RGCSP). Sixth Meeting, ICAO, Doc. 9536, Montreal, 1988, 270p.

57. R. Mori, "Identifying the ratio of aircraft applying SLOP by statistical modeling of lateral deviation," *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences*, vol. 54(183), 2011. pp.30-36.

58. T. Duan, S.J. Finch, K.Q. Ye, G.A. Chase, and N.R. Mendell, "Using mixture models to characterize disease-related traits," *BMC Genetics*, vol. 6, 2005.

59. Kwatny, H. G., Dongmo, J.-E. T., Chang, B.-C., Bajpai, G., Yasar, M., and Belcastro, C., "Nonlinear Analysis of Aircraft Loss of Control," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 36, No. 1, 2013, pp. 149–162.[doi:10.2514/1.56948](https://doi.org/10.2514/1.56948).

60. Chakraborty, A., Seiler, P., and Balas, G. J., “Nonlinear region of attraction analysis for flight control verification and validation,” *Control Engineering Practice*, Vol. 19, No. 4, 2011, pp. 335–345. doi:10.1016/j.conengprac.2010.12.001.
61. de Visser, C. C., Chu, Q. P., and Mulder, J. A., “A new approach to linear regression with multivariate splines,” *Automatica*, Vol. 45, No. 12, 2009, pp. 2903–2909. doi:10.1016/j.automatica.2009.09.017.
62. de Visser, C. C., Mulder, J. A., and Chu, Q. P., “A Multidimensional Spline-Based Global Nonlinear Aerodynamic Model for the Cessna Citation II,” *AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference*, Toronto, CA, 2010. doi:10.2514/6.2010-7950.
63. Tol, H. J., de Visser, C. C., Sun, L. G., van Kampen, E., and Chu, Q. P., “Multivariate Spline-Based Adaptive Control of High-Performance Aircraft with Aerodynamic Uncertainties,” *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 39, No. 4, 2016, pp. 781–800.
64. Cunis, T., Burlion, L., and Condomines, J.-P., “Piecewise Polynomial Model of the Aerodynamic Coefficients of the Generic Transport Model and its Equations of Motion,” *Tech. rep.*, ONERA – The French Aerospace Lab; French Civil Aviation School, Toulouse, FR, 2018. doi:10.2514/1.G001079.

## ДОДАТОК А

### Фрагмент вихідного коду комп'ютерної програми «Розрахунок часу затримки прибуття літака у аеропорт призначення»

(виконаний у комп'ютерному середовищі програмування MATLAB)

```

%Soft for statistical data processing and Air traffic delay estimation for input route
%Matlab 2016a
%v1.2 04.10. 2021

clear all

clc

close all

folder='data/';
folder1='data_output/';
if ~exist(folder1, 'dir')
    mkdir(folder1);
end

files =dir(fullfile(folder, '*.mat'));
n=2100;
route=files(1).name(1:5);
for i=1:size(files,1)
    load(strcat(folder, files(i).name));
    alt_s(i)=alt(1);
    clear alt lat lon speed taxitime time time2 time4
end

[~,start_i]=min(alt_s);
seq=1:size(files,1);
seq(start_i)=[];
seq=[start_i, seq];

% reference point for NED
La=50.336241813112260;

```

```

Lo=30.904661287939316;
h0=1996.44;
wgs84 = wgs84Ellipsoid('meters');
for i=1:size(files,1)
    if i>1
        clear alt lat lon speed taxitime time time2 time4
    end
load(strcat(folder, files(seq(i)).name));
clear alt_m p time_s p1
alt_m=alt*0.3048;
alt_s(i)=alt_m(1);
p = lla2ecef([lat', lon', alt_m'], 'WGS84');
time_s=linspace(1, time(end), n);
if i==1
    lat1=lat; lon1=lon;
    time_s1=time_s;
elseif i>1
    dll=sqrt(power(lat1(1)-lat(1),2)+power(lon1(1)-lon(1),2));
    [~,shift] = min(dll);
    time=time-time_s1(shift);
end
p1(:,1) = interp1(time,p(:,1),time_s,'spline');
p1(:,2) = interp1(time,p(:,2),time_s,'spline');
p1(:,3) = interp1(time,p(:,3),time_s,'spline');
alt_int(i,:) = interp1(time,alt_m,time_s,'spline');
path(:,i)=sqrt(power(p1(1:2:end,1)-p1(2:2:end,1),2)+power(p1(1:2:end,2)-
p1(2:2:end,2),2)+power(p1(1:2:end,3)-p1(2:2:end,3),2));
velocity(i,:)=path(:,i)./(time_s(2:2:end)-time_s(1:2:end));
time_g(i,:)=(time_s(2:2:end)+time_s(1:2:end-1))/2;

```

```

acceleration(i,:)=(velocity(i,2:2:end)-velocity(i,1:2:end))./(time_g(i,2:2:end)-
time_g(i,1:2:end));
% lat/lon data
latitude(i,:) = interp1(time,lat,time_s,'spline');
longitude(i,:) = interp1(time,lon,time_s,'spline');
% data visualisation
figure()
plot(time_s,alt_int(i,:)); title('Barometric
altitude');xlabel('Time,s');ylabel('H_{Baro},m'); grid on; xlim([0, time_g(end)]);
figure()
plot(time_g(i,:),path(:,i)); title('Path');xlabel('Time,s');ylabel('Path,m'); grid on;
xlim([0, time_g(end)]);
figure()
plot(time_g(i,:),velocity(i,:)); title('Speed');xlabel('Time,s');ylabel('Velocity,m/s'); grid
on; xlim([0, time_g(end)]);
figure()
plot((time_g(i,2:2:end)+time_g(i,1:2:end))/2,acceleration(i,:));
title('Acceleration');xlabel('Time,s');ylabel('Acceleration,m/s^2'); grid on; xlim([0,
time_g(end)]);
X(:,1),X(:,2),X(:,3)]= ecef2ned(p1(:,1),p1(:,2),p1(:,3),La,Lo,h0,wgs84,'degrees');
x(:,i)=X(:,1);
y(:,i)=X(:,2);
z(:,i)=-X(:,3);
end
xm(1,:)=mean(x');
xm(2,:)=mean(y');
xm(3,:)=mean(z');
xs(1,:)=std(x');
xs(2,:)=std(y');
xs(3,:)=std(z');

```

```

path_mean=mean(path');
path_std=std(path');
for i=1:size(files,1)
h(:,i)=path(:,i)-path_mean';
hx(:,i)=x(:,i)-xm(1,:); hy(:,i)=y(:,i)-xm(2,:); hz(:,i)=z(:,i)-xm(3,:);
end
H=[hx, hy, hz];
%% data visualization
figure('Color','white','Name',strcat('Barometric_altitude_', route))
plot(time_s,max(alt_int), time_s,min(alt_int), time_s,mean(alt_int)); title('Barometric
altitude');xlabel('Time,s');ylabel('H_{Baro},m'); grid on; xlim([0, time_g(end)]);
savefig(strcat(folder1,route,'_Barometric_altitude.fig'));
figure('Color','white','Name',strcat('Path_', route))
plot(time_g(1,:),max(path'),time_g(1,:),min(path'), time_g(1,:), path_mean);
title('Path');xlabel('Time,s');ylabel('Path,m'); grid on; xlim([0, time_g(end)]);
savefig(strcat(folder1,route,'_Path.fig'));
figure('Color','white','Name',strcat('Meam Path_', route))
plot(time_g(1,:),path_mean+2*path_std,time_g(1,:),path_mean-2*path_std,
time_g(1,:), path_mean); title('Meam Path and 2\sigma
levels');xlabel('Time,s');ylabel('Path,m'); grid on; xlim([0, time_g(end)]);
savefig(strcat(folder1,route,'_Mean_path.fig'));
figure('Color','white','Name',strcat('Speed_', route))
plot(time_g(1,:),max(velocity), time_g(1,:),min(velocity), time_g(1,:),mean(velocity));
title('Speed');xlabel('Time,s');ylabel('Velocity,m/s'); grid on; xlim([0, time_g(end)]);
savefig(strcat(folder1,route,'_Speed.fig'));
figure('Color','white','Name',strcat('Speed_', route))
plot(time_g(1,:),mean(velocity), '-k',time_g(1,:),mean(velocity)-2*std(velocity),'--b',
time_g(1,:),mean(velocity)+2*std(velocity),'--b');legend('Airplane velocity', '2\sigma
confidence band'); xlabel('Time,s');ylabel('Velocity,m/s'); grid on; xlim([0,
time_g(end)]); %title('Speed');

```

```

savefig(strcat(folder1,route,'_Speeds.fig'));
figure('Color','white','Name',strcat('Acceleration_', route))
time_ac=(time_g(1,2:2:end)+time_g(1,1:2:end))/2;
plot(time_ac,max(acceleration),time_ac,min(acceleration),time_ac,mean(acceleration))
; title('Acceleration');xlabel('Time,s');ylabel('Acceleration,m/s^2'); grid on; xlim([0,
time_g(end)]);
savefig(strcat(folder1,route,'_Acceleration.fig'));
figure('Color','white','Name',strcat('Histogram_', route))
hist(reshape(h,[1,size(h,1)*size(h,2)]),50); grid on;
savefig(strcat(folder1,route,'_Histogram.fig'));
lat_m=mean(latitude);
lat_s=std(latitude);
lat_b=[lat_m-2*lat_s, flip(lat_m+2*lat_s), lat_m(1)-2*lat_s(1)];
lon_m=mean(longitude);
lon_s=std(longitude);
lon_b=[lon_m-2*lon_s, flip(lon_m+2*lon_s), lon_m(1)-2*lon_s(1)];
figure('Color','white','Name',strcat('Trajectory_route_', route));
title(strcat('Trajectory route ', route, ' (2\sigma)'));
latlim = [min(lat_m-3*lat_s) max(lat_m+3*lat_s)];
lonlim = [min(lon_m-3*lon_s) max(lon_m+3*lon_s)];
usamap(latlim, lonlim);
geoshow(lat_m, lon_m, 'Color', 'black', 'DisplayType', 'line');
geoshow(lat_b, lon_b, 'Color', 'red', 'DisplayType', 'line');
savefig(strcat(folder1,route,'_Trajectory.fig'));
%% NEU
figure('Color','white','Name',strcat('deviations_', route))
plot(time_s,xm(1,:),'-r',time_s,xm(2,:),'-b',time_s,xm(3,:),'-
g',time_s,xm(1,:)+2*xs(1,:),'--r',time_s,xm(1,):-2*xs(1,:),'--
r',time_s,xm(2,:)+2*xs(2,:),'--b',time_s,xm(2,):-2*xs(2,:),'--
b',time_s,xm(3,:)+2*xs(3,:),'--g',time_s,xm(3,):-2*xs(3,:),'--g');

```

```

xlabel('Time,s');ylabel('X,m'); grid on; xlim([0, time_g(end)]);
legend('x_{NEU}','y_{NEU}','z_{NEU}'); %title('Mean trajectory');
savefig(strcat(folder1,route,'_Deviations.fig'));
%% UGED
datah1=reshape(hx,[1,size(hx,1)*size(hx,2)]);
ugedpdf=@(xx, m, alpha, beta) exp(-(abs(xx-
m)/alpha).^(1/beta))./(2*alpha*beta*gamma(beta));
%% Double UGED
pdf2 = @(xx,p, m1,m2,a1,a2,b1,b2) p*ugedpdf(xx, m1, a1, b1) + (1-p)*ugedpdf(xx,
m2, a2, b2) ;
z2=mle(datah1,'pdf',pdf2,'OptimFun',
'fmincon','start',[1,mean(datah1),mean(datah1),std(datah1),std(datah1), 0.5,
1],'LowerBound', [0.1,-Inf,-Inf,1,1,0.5,0.5], 'UpperBound', [1,Inf,Inf,Inf,Inf,1,1]);
figure('Color','white','Name','Frequency distribution');
clear h1
yyaxis right
datah=reshape(H,[1,size(H,1)*size(H,2)]);
histogram(datah, 'Normalization','pdf','DisplayStyle','bar','EdgeColor',
'blue','FaceColor','green','FaceAlpha',0.5,'BinWidth',2000); grid on;
set(gca,'YScale','log');
%title('Frequency distribution');
ylabel('Frequency');
yyaxis left
xa=xlim();
x1=xa(1):1:xa(2);
y1=normpdf(x1,mean(datah), std(datah));
y2=pdf2(x1, z2(1),z2(2),z2(3),z2(4),z2(5),z2(6),z2(7));
semilogy(x1,y1, '-k', x1,y2, '--b'); legend('Normal
distribution','DUGED','Normalised frequency');xlabel('Deviation, m');ylabel('\rho(x)');
%% delay detection

```



```

% find closest location
frame=100;
acft_lat=latitude(1, frame)
acft_lon=longitude(1, frame)
d=sqrt(power(lat_m-acft_lat,2)+power(lon_m-acft_lon,2));
[~,iteration] = min(d);
TimeOfFlight=time_s(iteration);
TimeToLanding=time_s(end)-TimeOfFlight;
error=abs((time_s(end)-time_s(frame))- TimeToLanding);
disp('Time to Landing')
disp(datestr(seconds(TimeToLanding),'HH:MM:SS'))
disp('Time to Landing error estimtion')
disp(datestr(seconds(error),'HH:MM:SS'))
disp('Time of Flight')
disp(datestr(seconds( TimeOfFlight),'HH:MM:SS'))
%% Error graph
for i=1:size(latitude,2) % 2000
    for j=1:size(latitude,1)
        clear d iteration
        d=sqrt(power(lat_m-latitude(j, i),2)+power(lon_m-longitude(j, i),2));
        [~,iteration] = min(d);
        Error(i,j)=abs(time_s(i)- time_s(iteration));
    end
end
end
figure('Color','white','Name',strcat('Error_of_time_delay_estimation_', route))
plot( time_s(1,end)-time_s(1,:),mean(Error)); title(strcat('Error of time delay
estimation ', route));xlabel('Time,s');ylabel('Error,s'); grid on; xlim([0, time_g(end)]);
savefig(strcat(folder1,route,'_Error_of_time_delay_estimation.fig'));

```

## ДОДАТОК Б

POLIT.Challenges of science today. 1-3 April 2020

---

### AIR TRAFFIC DELAYS PREDICTION MODEL

**Tarasevych S.M**<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *National Aviation University, Kyiv*

*Supervisor – Ostroumov I.V., Ph.D.*

Modern aviation in the line of rapid improvement and development are faced with more and more new questions. However, some old problems related to optimization, cheapening, comfort, maintenance, and many other aspects also occur and require a quality solution, for the reasons that emerge from the names of these problems. In our research, we calculate the delay time of arrival of the aircraft at the airport (or how much earlier the aircraft will arrive from the set time in the flight plan) while at the time of calculating the time parameter at any point on the selected route flight. That, in turn, will improve the optimization of the interaction of aviation services, personnel, the use of auxiliary systems and many other factors [1, 2, 3]. Such an opportunity for improvement will be especially valuable for large airports with a very dense stream of flights. An important factor for them is “on time”, because any delay, an oversight in the calculations of that time leads first of all to losses (due to downtime, the discomfort of passengers, breaking down the schedule of arrivals and departures of aircraft, etc.). Having the ability to calculate the delay time while still in flight, we can already take the necessary actions (speeding up, changing the route (if possible), selecting a window in the arrival schedule for a late flight) in order to minimize the negative impact of delays. Accordingly, if during the calculation it turns out that the plane will arrive at the airport before the required time, we can also perform a certain series of actions that will allow the aircraft to arrive on time and not violate the airport schedule (reducing speed, providing the flight with a window in the arrival schedule (if possible)) This function of this method will be useful for dispatchers, as it will help to significantly reduce the need to send a late or previously arrived vessel to repeat circles, waiting for their turn to land (we also save fuel). The main advantages of this method are simplicity of modeling, the possibility of application for any type of flight, the ability to include information provided by these methods in the on-board computer (flight plan) to visualize the information for pilots. The disadvantages include the need to refine the algorithm for taking into account weather conditions (especially wind). The need for the correct inclusion in the algorithm for calculating flight histories conducted with deviations from the flight plan for various reasons (which increases the overall error of the method).

#### References:

1. Ostroumov I.V. Error of positioning by DME/DME and VOR/DME pairs. Systems of control, navigation and communication. 2018. № 47(1). P. 12-16 DOI: 10.26906/SUNZ.2018.1.012 .
2. Ostroumov I.V. Estimation of Distance Measurement Equipment accuracy. Aerospace technology. 2018. № 146(2). P. 71-75 DOI: 10.32620/aktt.2018.2.10 (in Ukrainian language).
3. Ostroumov I.V. Analysis of prospective area navigation systems. Systems of control, navigation and communication. 2018. № 52(6). P. 14-19 DOI: 10.26906/SUNZ.2018.6.014 (in Ukrainian language).

## ДОДАТОК В

# A light statistical method of air traffic delays prediction

Stanislav Tarasevych  
*Air Navigation Systems Department*  
*National Aviation University*  
 Kyiv, Ukraine  
 tarasevychstanislav@gmail.com

Ivan Ostroumov  
*Air Navigation Systems Department*  
*National Aviation University*  
 Kyiv, Ukraine  
 ostroumovv@ukr.net

**Abstract**— An air traffic delay is a common problem of a modern transport system. Continuously increasing demand of air traffic system and operation in a rapidly changing environment makes delay estimation is a key element in aviation safety. In the paper, we propose a light statistical method of airplane landing delay prediction at the destination airport. Proposed method grounds on statistical data processing of previous flights to identify mean trajectory of an airplane at the pre-flight stage and continuously comparison of mean trajectory with current airplane location in order to identify a time to land in the destination airport. A simple solution of minimization problem at the en-route phase of flight needs low computation power and guarantees the required confidence band for results. Proposed method has been trained on statistical data for Boryspil / Kharkiv connection routes in order to airplane delay prediction.

**Keywords**—aircraft, delay, prediction, position, statistics, probability density function, light statistical method

## I. INTRODUCTION

Aircraft delays play a significant problem in modern air traffic system. Continuously increasing number of airspace users dramatically increases capacity of airport facilities and routes network. Flight delays are a result of valuable cost to air traffic management authority and additional charges to the airline that assimilates in the ticket price.

Delays may be used as a numerical characteristic of air transport system efficiency. For example, in Eurocontrol airspace, average delay time on arrivals is 12.4 minutes for 2019 [1].

The main causes for delays may be grouping by source[2]:

- Airline. Includes delays occurred by passenger and baggage caring side; cargo loading; aircraft and ramp handling; technical problems and aircraft equipment settings [3]; damage of aircraft; flight operations and crew.
- Airport. Contains delays caused by airport facilities; restrictions at destination and departure airports.
- En-route. Air traffic flow management (ATFM) due to Air Traffic Control (ATC) en-route demand; ATC staff [4] and ATFM equipment.
- Governmental includes delays from security and immigration reasons.
- Weather.
- Miscellaneous
- Reactionary is a result of the late arrival of aircraft, passengers, cargo, or crew.

The most delayed airports in 2018 were London Stansted (EGSS), with average delay per arrival in 22.9 min and Barcelona (LEBL) – 22.4 min [2].

There are different scenarios of air traffic delay prediction. Some of them ground on aircraft kinematic model usage for trajectory prediction by measured speed, angular orientation, pre-planned trajectory [5] and some environmental conditions, such as weather conditions [6]. Other approaches utilize statistical analysis of available series of data for categorizations and delay prediction. In this case, a regression analysis, decision trees approach [7], neural network, probabilistic forecasting [8] or fuzzy sets theory can be used.

Also, an air traffic delay prediction can characterize an operational performance of particular air space volume, airport, routes, or entire air traffic system [9].

Weather forecast data for intendant airports can improve prediction performance, due to the high impact of weather in delay formation [10-12].

Performance of an air traffic prediction algorithm supports the efficiency of air traffic management.

In our research, we would like to focus on using a linear regression function for statistical data processing and creation a light in computation power method for airplane delay prediction based on current airplane location and known predefined trajectory.

## II. DELAY PREDICTION BASED ON THE AIRCRAFT MODEL

One of the possible approaches for delay estimation is grounded on aircraft flight simulation. The trajectory of aircraft movement can be predicted with the help of a dynamic, kinematic, or simple polynomial model. Some models may take into account dynamic characteristics of aircraft, environmental conditions (airflow submodel, wind speed, and angles), and control interaction in the loop. But in the tasks of air traffic simulation, a polynomial model is used very often. These models consider aircraft movement as a movement of the point of center gravity with predefined constant velocity or acceleration applied in a specific direction. The polynomial model does not include aircraft performance, therefore can be easily assimilated in air traffic flow simulation. Simulation usually performed in predefined global or local Cartesian coordinate system.

In case of flight with a constant speed an airplane motion can be represented as a polynomial model of the first order:

$$X_i = X_{i-1} + Tt \quad (1)$$

$$B_{j,m}(t) = \frac{t - \tau_j}{\tau_{j+m-1} - \tau_j} B_{j,m-1}(t) + \frac{\tau_{j+m} - t}{\tau_{j+m} - \tau_{j+1}} B_{j+1,m-1}(t),$$

where  $\tau$  is a set of nodes.

Nodes  $\tau$  can be calculated by equidistance, central or chord methods. Due to equidistance method nodes can be calculated by follows:

$$\tau_i = a + (i-1) \frac{b-a}{N-1},$$

where  $a$  and  $b$  are the firsts and final points;  $N$  is a total number of available data points.

An equation (3) can be represented in the next form:

$$S = B \cdot C, \quad (4)$$

$$S = \begin{bmatrix} x_{11} & y_{12} & z_{13} & t_1 \\ x_{21} & y_{22} & z_{23} & t_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{n1} & y_{n2} & z_{n3} & t_n \end{bmatrix}; \quad C = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & t_1 \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & t_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ c_{n1} & c_{n2} & c_{n3} & t_n \end{bmatrix};$$

$$B = \begin{bmatrix} B_{1,m}(t_1) & B_{2,m}(t_1) & B_{3,m}(t_1) & \dots & B_{n,m}(t_1) \\ B_{1,m}(t_2) & B_{2,m}(t_2) & B_{3,m}(t_2) & \dots & B_{n,m}(t_2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ B_{1,m}(t_n) & B_{2,m}(t_n) & B_{3,m}(t_n) & \dots & B_{n,m}(t_n) \end{bmatrix},$$

where  $S$  is a matrix of splines;  $B$  is a matrix of basis functions;  $C$  is a matrix of control points.

The matrix of control points can be obtained from the solution of (4) by the least-squared method:

$$C = (B^T B)^{-1} B^T S. \quad (5)$$

Then obtained by (5) matrix of control points  $C$  is used in (4) for data interpolation for the required time series.

Interpolated data to unique time series for different flights are used in statistical assessment tool for mean and standard deviation estimation. Mean values form a mean trajectory, standard deviations form a confidence band and can be visualized as a tube that limits an airplane location in the radius of  $2\sigma$  for 95% or in  $3\sigma$  for 99% of times.

Time to land in destination airport can be calculated for each point of airplane mean trajectory.

During the en-route side of LSMDP measured coordinates of an airplane are converted to ECEF and compared with mean trajectory, estimated previously.

The time index of current airplane location related to the historical trajectories can be estimated as follows:

$$i = \min((x_{acft} - x_{mj})^2 + (y_{acft} - y_{mj})^2 + (z_{acft} - z_{mj})^2), \quad (6)$$

where  $x_{acft}$ ,  $y_{acft}$ ,  $z_{acft}$  are airplane location in ECEF;  $x_m$ ,  $y_m$ ,  $z_m$  are matrixes of mean trajectory.

Finally, the delay time can be estimated by easy comparison of time to landing obtained for predicted time

index of current airplane location and scheduled landing time.

Unfortunately, a presented method for prediction of a delay time of landing in destination airport can be used only for flights with the appropriate size of learning sample and can not be applied for first-time route or with pure database size.

#### IV. NUMERICAL DEMONSTRATION

As an example, for numerical demonstration of proposed LSMDP, we use flight data of Ukraine International Airlines AUI25 destination from Kyiv (Boryspil International Airport, KBP) to Kharkiv (Kharkiv International Airport, HRK). We consider 81 historical flights from October 2, 2019, to January 1, 2020. The flight is carried out by aircraft of the Embraer ERJ-190 (30 times) and Boeing 737 (51 times) family. The flight path length is 221 miles mean, and the average flight time is 34 minutes.

We use software-defined radio to receive location reports of airplane transponder in ADS-B format. Decoded location data of investigated flight is stored in the local database in LLA format. Coordinates of an airplane in local Cartesian NEU coordinate system with the reference point of KBR airport location are represented in fig.2. The double  $\sigma$  confidence band is represented by dashed lines in fig.2 for mean trajectory. Statistical analysis of the mean velocity of an airplane is resented in fig.3.

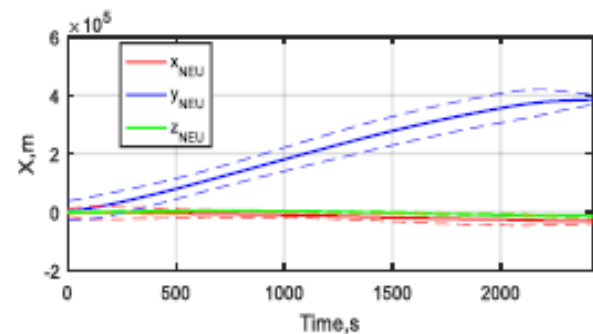


Fig.2. Mean locations of AUI25 route in NEU reference frame

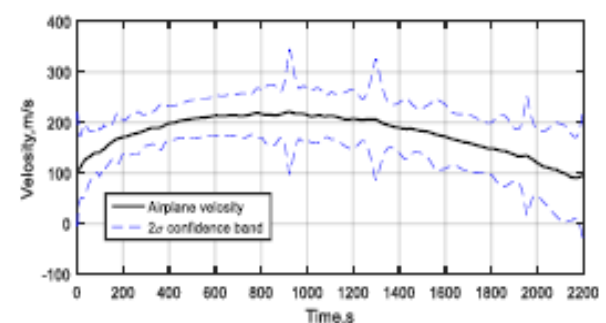


Fig.3. Velocity of airplane

Statistics of deviations from a mean trajectory in three dimensions are represented in fig.4. Normalized frequency of airplane deviations by directions in NEU reference frame a 1000 m bin width utilize navigation system error and flight technical errors. Results of statistical analysis of airplane deviations indicate a mean value in  $2.3 \times 10^{-12}$  m and 1.2 km of mean squared deviation.

Also, we use Double Univariate Generalized Error Distribution (DUGED) [19] as a probability density function of airplane deviations [20, 21, 22]:

$$\rho(x) = \alpha \frac{1}{2a_1 b_1 \Gamma(b_1)} \exp\left(-\left|\frac{x-\mu_1}{a_1}\right|^{b_1-1}\right) + (\alpha-1) \frac{1}{2a_2 b_2 \Gamma(b_2)} \exp\left(-\left|\frac{x-\mu_2}{a_2}\right|^{b_2-1}\right), \quad (7)$$

where  $\alpha$  is the probability of a gross navigational error;  $a_1$  and  $a_2$  are scale coefficients;  $b_1$  and  $b_2$  are shape coefficients;  $\mu_1$  and  $\mu_2$  are mean values;  $\Gamma(x)$  is an Euler-gamma function.

Results of fitting training sample to DUGED by least squared method [19] is represented in fig.4 and gives following parameters:

$$\alpha = 0.55; \mu_1 = -0.03; \mu_2 = 0.007; a_1 = a_2 = 7492; b_1 = b_2 = 0.75.$$

A mean squared error of delay time prediction is estimated from a learning sample is represented in fig.5.

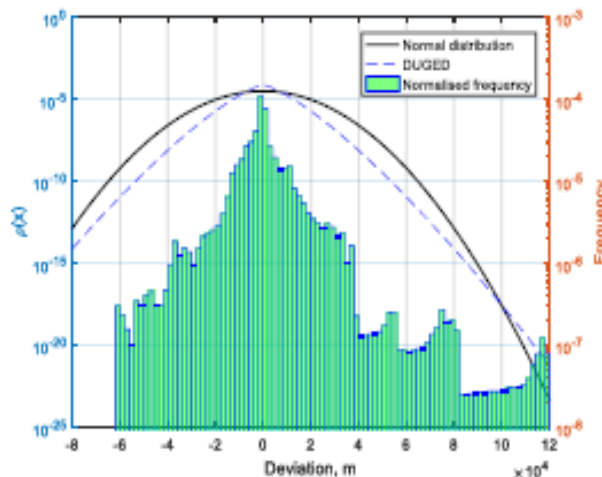


Fig.4. Histogram of trajectory deviations

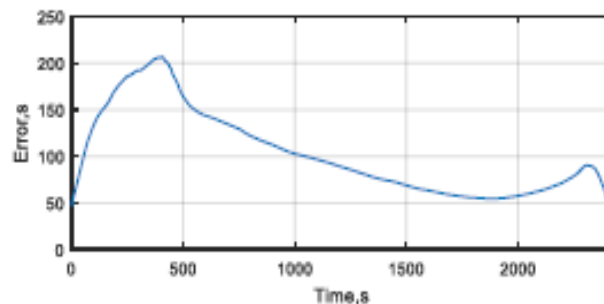


Fig.5. Mean squared error of delay prediction

At the initial part of flight prediction error is quiet valuable and may reach 3 minutes, but during the flight, an error reduced continuously upon landing at the destination airport.

## V. CONCLUSION

The Light statistical method is proposed for estimating the delay time of aircraft arrival at the airport based on airplane location and means parameters of trajectory,

estimated by training sample from previous flight routes realizations.

The proposed method is used for delay estimations in flight route connection between Boryspil and Kharkiv airports. LSM estimator has been trained with 81 samples of ADS-B data for "AUI25". Obtained results show poor performance at the beginning of flight and tendency for increasing up to the end of the route, due to reducing the time of prediction.

Also, statistical analysis of available data is used for trajectory parameters estimation and study behavior of airplane deviation from the pre-planned trajectory. Obtained parameters of probability density function can be used in multiple risk assessment models for safety analysis.

Statistical analysis of delays helps to improve optimization in the interaction between aviation services, personnel, use of auxiliary systems and many other factors to minimize the impact on the overall delay. LSM, as a module of each route delay prediction, can be implemented in the total airport delay estimation model.

LSM supports "real-time" delay estimation with airplane location data as input. A simple formula for time index calculation (6) shows better performance in computation time in comparison with approaches based on the aircraft model. Being able to calculate the delay time while still in flight, we can already take the necessary actions (speeding up, changing the route (if possible), selecting a window in the arrival schedule for a late flight) in order to minimize the negative impact of delays. Accordingly, if during the calculation it turns out that the plane will arrive at the airport before the required time, we can also perform a certain series of actions that will allow the aircraft to arrive on time and not violate the airport schedule (reducing speed, providing the flight with a window in the arrival schedule (if possible)). This advantage of this method will also be useful in air traffic control loop, since it will help significantly reduce the need to send a late or previously arrived users to repeated circles (reduce the load on the approach zone, also save fuel and emission), look for a window for landing, thereby creating a taxi and take-off queue.

## REFERENCES

- [1] (2020) The Eurocontrol website. [Online]. Available: <https://www.eurocontrol.int/our-data>
- [2] CODA digest. All-Causes Delay and Cancellations to Air Transport in Europe. Eurocontrol, 2018.
- [3] O. Solomentsev and M. Zaliskyi, "Correlated failures analysis in navigation system," *Methods and Systems of Navigation and Motion Control: MSNMC 2018, 5th International Conference of IEEE, October 2018*, pp. 123-126.
- [4] T. Shmelova, Y. Sikirda, C. Scarponi, and A. Chialastri, "Deterministic and stochastic models of decision making in air navigation socio-technical system," *CEUR Workshop Proceedings, 2018*, pp. 1-8.
- [5] J. Lovera, I. Hwang, and M. Rotea, "New algorithms for aircraft intent inference and trajectory prediction," *Journal of guidance, control, and dynamics*, vol. 30, pp. 370-382, 2007.
- [6] M. Jackson, Y. Zhao, and R. Slattery, "Sensitivity of trajectory prediction in air traffic management," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 22, pp. 219-228, 1999.
- [7] J. Jose and H. Balakrishnan, "Characterization and prediction of air traffic delays," *Transportation research. Part C: Emerging technologies*, vol. 44, pp. 231-241, 2014.
- [8] J. Vicente, J. Perez-Sanchez, and E. Gomez-Deniz, "Modelling the asymmetric probabilistic delay of aircraft arrival," *Journal of Air Transport Management*, vol. 62, pp. 90-98, 2017.

- [9] E. Mueller and C. Gano, "Analysis of aircraft arrival and departure delay characteristics," *ATAA's Aircraft Technology, Integration, and Operations (ATIO) Technical Forum*, pp. 1-14, 2002.
- [10] B. Sridhar and C. Neil, "Short-term national airspace system delay prediction using weather impacted traffic index," *Journal of guidance, control, and dynamics*, vol. 32.2 pp. 657-662, 2009.
- [11] D. Smith and S. Lance, "Decision support tool for predicting aircraft arrival rates from weather forecasts," *Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference*, IEEE, Bethesda, MD, 2008, pp. 1-12.
- [12] F. Rehm, "Prediction of aircraft delay at Frankfurt airport as a function of weather," *German Aerospace Center, Germany*, 2004.
- [13] Minimum Operational Performance Standards for 1090MHz Automatic Dependent - Broadcast (ADS-B), RTCA, DO-260/ED-102, Washington DC, USA, 2008.
- [14] N.S. Kuzmenko, and I.V. Ostroumov, "Performance Analysis of Positioning System by Navigational Aids in Three Dimensional Space," *System Analysis & Intelligent Computing: SAIC 2018 1st International Conference of IEEE*, October 2018, pp. 101-104.
- [15] N.S. Kuzmenko, I.V. Ostroumov, and K. Marais, "An Accuracy and Availability Estimation of Aircraft Positioning by Navigational Aids," *Methods and Systems of Navigation and Motion Control: MSNMC 2018 5th International Conference of IEEE*, October 2018, pp. 36-40.
- [16] I.V. Ostroumov, V.P. Kharchenko, and N.S. Kuzmenko, "An airspace analysis according to area navigation requirements," in *Aviation*, vol. 23, issue 2, 2019, pp. 36-42.
- [17] D. Pales, V. Valikova, J. Antl, and F. Toth, "Approximation of vehicle trajectory with b-spline curve," *Acta Technologica Agraria*, vol.19(1), pp.1-5.
- [18] V.P. Kharchenko, N.S. Kuzmenko, A.G. Kukush, and I.V. Ostroumov, "Multi-parametric data recovery for unmanned aerial vehicle navigation system," *Methods and Systems of Navigation and Motion Control: MSNMC 2016 4th International Conference of IEEE*, October 2016, pp. 295-299.
- [19] G. Giller, *A Generalized Error Distribution*, 2013.
- [20] Review of the General Concept of Separation Panel (RGOSP). Sixth Meeting, ICAO, Doc. 9536, Montreal, 1988, 270p.
- [21] R. Mori, "Identifying the ratio of aircraft applying SLOP by statistical modeling of lateral deviation," *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences*, vol. 54(183), 2011, pp.30-36.
- [22] T. Duan, S.J. Finch, K.Q. Ye, G.A. Chase, and N.R. Mendell, "Using mixture models to characterize disease-related traits," *BMC Genetics*, vol. 6, 2005.

## ДОДАТОК Г



**МІНІСТЕРСТВО РОЗВИТКУ ЕКОНОМІКИ, ТОРГІВЛІ  
ТА СІЛЬСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА УКРАЇНИ  
(Мінекономіки)**

вул. М. Грушевського, 12/2, м. Київ, 01008, Тел. (044) 200-47-53, факс (044)253-63-71  
E-mail: [mecconomy@me.gov.ua](mailto:mecconomy@me.gov.ua), <http://www.me.gov.ua>, код ЄДРПОУ 37508596

## РІШЕННЯ

## ПРО РЕЄСТРАЦІЮ АВТОРСЬКОГО ПРАВА НА ТВІР

Міністерство розвитку економіки, торгівлі та сільського господарства України  
розглянуло заяву

Тарасевич Станіслав Миколайович, вул. Короленка, 19, кв. 9, м. Полтава, 36011

(повне ім'я автора, адреса)

заявка від 30.03.2020 № 98543

про реєстрацію авторського права на твір і прийняло рішення зареєструвати авторське право на твір Комп'ютерна програма "Розрахунок часу затримки прибуття літака у аеропорт призначення" ("LSM"); Тарасевич Станіслав Миколайович, Остроумов Іван Вікторович

(вид, повна, скорочена (за наявності) назва твору, повне ім'я, псевдонім (за наявності) автора (ів))

Внесення відомостей до Державного реєстру свідоцтв про реєстрацію авторського права на твір та видача свідоцтва будуть здійснені за умови сплати збору за оформлення і видачу свідоцтва про реєстрацію авторського права на твір відповідно до п.3 постанови Кабінету Міністрів України від 27 грудня 2001 року № 1756 "Про державну реєстрацію авторського права і договорів, які стосуються права автора на твір".

Якщо протягом трьох місяців від дати одержання заявником рішення про реєстрацію авторського права на твір Управління державних реєстрацій Департаменту інтелектуальної власності Міністерства розвитку економіки, торгівлі та сільського господарства України не одержало документ про сплату збору за оформлення і видачу свідоцтва у розмірі та порядку, визначених законодавством, або копію документа, що підтверджує право на звільнення від сплати зазначеного збору, заявка вважається відхиленою і реєстрація авторського права та публікація відомостей про реєстрацію Управлінням державних реєстрацій Департаменту інтелектуальної власності Міністерства розвитку економіки, торгівлі та сільського господарства України не проводиться.

Заступник Міністра  
розвитку економіки, торгівлі  
та сільського господарства України



Д. О. Романович

