

272 АВІАЦІЙНИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 621.396.: 351.814

DOI: 10.31498/2225-6733.51.2025.344967

ОЦІНЮВАННЯ РИЗИКУ ЗІТКНЕНЬ ЛІТАКІВ ПІД ЧАС ПОЛЬОТУ НА МАРШРУТІ**Іващук О.Р.***аспірант, Державний університет «Київський Авіаційний Інститут», м. Київ, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5637-0332>, e-mail: 5162754@stud.kai.edu.ua;***Остроумов І.В.***д-р техн. наук, професор, Державний університет «Київський Авіаційний Інститут», м. Київ, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2510-9312>, e-mail: vany@kai.edu.ua*

В умовах великої завантаженості повітряного простору безпека сучасних авіап перевезень вимагає безперервного контролю у режимі, наближеному до реального часу. Важливою складовою безпеки повітряного руху є ризик зіткнення, що залежить від завантаженості повітряного простору, системи керування повітряним рухом та надійності обладнання. У статті виконано оцінювання ризику зіткнень літаків на етапі польоту за маршрутом у межах визначеного регіону повітряного простору. Запропонована методика ґрунтується на фрагментації повітряного простору на елементарні зони з використанням ієрархічної системи просторового індексування для визначення потенційних конфліктних точок та використанні моделей оцінки ризику, які підходять до пари літаків на основі напрямку польоту літаків. Відкриті дані про положення цивільних літаків, отримані за концепцією автоматичного залежного спостереження у широкомовному режимі, використано для оцінювання ризику зіткнення для конкретного повітряного простору. Оцінка ризику запропонована на основі комбінованої моделі повітряного руху за пересічними та паралельними курсами. Априорні дані по відхиленням літаків від заданих траєкторій руху отримані на основі статистичного аналізу траєкторій з минулих реалізацій маршрутів. Дані, які були зібрані в ході дослідження, наведені в таблицях. Розрахунки і збір даних виконуються з використанням програми, розробленої мовою програмування Python із залученням відповідних бібліотек, що забезпечують підключення до мережі передавачів автоматичного залежного спостереження, розрахунки ризиків за відповідною моделлю і візуалізацію даних. Запропонований підхід було верифіковано за допомогою відкритих даних про повітряний рух у межах повітряного простору Німеччини для певного часового відліку. Результати дослідження включають в себе як статистичну оцінку відхилення літаків, так і рекомендації щодо використання методики в зонах FRA і рекомендації щодо застосування результатів оцінки.

Ключові слова: аеронавігація, безпека цивільної авіації, керування повітряним рухом.

Постановка проблеми

Цивільна авіація розвивається стрімкими темпами про що свідчить статистика кількості пасажирів: 106 млн у 1960 році та 4,4 млрд у 2019 році [1]. Звісно виклики сучасності також мають суттєвий вплив на ці показники, під час Covid-19 у 2020 році пасажиропотік скоротився до 1,78 млрд, а прибутки від пасажирських перевезень зменшилися з 800 млрд до 350 млрд доларів США [2]. Не встигла авіаційна галузь відійти від наслідків пандемії, як настав новий виклик у вигляді геополітичної нестабільності в світі, яка призвела до обмеження доступу до значних ділянок повітряного простору, що спричинило масштабну перебудову маршрутів, в першу чергу це вплинуло на країни європейського союзу. Зміщення потоків повітряного руху призвело до збільшення навантаження на повітряний простір і змусило органи керування повітряним рухом адаптуватися до обмежень пропускної здатності, що, своєю чергою, спричинило зростання середніх затримок на маршруті до 2,13 хвилини на рейс у Європі у 2024 році [3]. Очікується, що тенденція зростання збережеться, що потребуватиме впровадження новітніх технологій навігації та спостереження, а також оновлення концепцій структури повітряного простору.

Сучасні системи управління безпекою дозволили забезпечити стабільне зростання світового авіаційного трафіку – з 32,2 млн до 37,7 млн рейсів, при цьому у 2023 році було зафіксовано лише одну катастрофу з летальними наслідками (72 загиблих) та 30 інцидентів без жертв [2]. Проте збільшення кількості користувачів повітряного простору створює додаткове навантаження на інфраструктуру безпеки, що може призвести до зниження її надійності та зростання ризиків у наданні авіаційних послуг [4].

За останні п'ять років кількість збройних конфліктів у світі подвоїлася [5]. Військові дії та політична нестабільність окремих країн часто призводять до обмеження доступного повітряного простору для транзитних польотів. У відповідь на сегрегацію повітряного простору авіакомпанії змушені планувати обхідні маршрути або використовувати верхні ешелони, що знижує ефективність перевезень і збільшує витрати. Яскравим прикладом є війна в Україні, яка призвела до повного закриття повітряного простору з лютого 2022 року та значного обмеження кількості польотів у низці країн [6]. Закриття повітряного простору змусило перенаправити повітряний трафік в обліт, щоб уникнути небезпечних зон, що, своєю чергою,

збільшило довжину маршрутів та тривалість польотів між більшістю європейських та азійських аеропортів [7, 8].

Обмеження використання окремих польотних зон призводить до перенавантаження сусідніх районів, що ускладнюється постійним зростанням обсягів повітряного руху при незмінному обсязі повітряного простору, що підвищує ризик зіткнень літаків у повітрі.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

У сучасних стратегічних планах розвитку авіації передбачено низку рішень для підвищення пропускної здатності повітряного простору. Одним із ключових нововведень є впровадження концепції FRA (Free Route Airspace), яка дозволяє оптимізувати планування маршрутів і зменшити навантаження на диспетчерські служби. Однак у випадках сегрегації повітряного простору ідентифікація конфліктних точок і побудова обхідних траєкторій значно ускладнюють застосування FRA.

Експлуатація літаків у перевантажених районах пов'язана з підвищеним ризиком зіткнень. Оцінювання ризиків зіткнень літаків у цивільній авіації виконується за допомогою певних моделей, що зазвичай орієнтовані на певний сценарій розвитку подій. Наприклад, для випадку руху літаків на паралельних маршрутах найкраще зарекомендувала себе модель Рейха [9], а для більшості конфліктних ситуацій на етапі польоту за маршрутом – модель Андерсона, що ґрунтується на використанні різниці курсу між двома літаками [10]. Також відомі модифіковані моделі для певних сценаріїв: Андерсона-Хсу, Гаса та Маркова. Важливу роль у зниженні ризиків відіграє точність роботи бортових систем навігації [11].

Оцінювання ризику зіткнення літаків може виконуватись з використанням моделі літаків у вигляді сфери певного діаметру [12-16]. Подібні моделі чудово підходять для аналізу конфліктних ситуацій у зонах аеропортів, коли літаки змінюють свою висоту і маневрують.

Також відомі моделі оцінювання ризику зіткнень на основі геометрії зближення літаків у просторі [17]. Ці моделі є важкими для обчислень у зв'язку зі складними математичними моделями руху, що використовуються у них.

Результати сучасних досліджень вказують на кількісну перевагу системи ієрархічної просторової адресації для аналізу геопросторових даних. Представлення повітряного простору у вигляді множини правильних шестикутників дозволяє значно пришвидшити обчислення та проводити аналіз даних за допомогою простих логічних операцій.

Мета статті

Основною метою статті є розробка методики оцінки ризику зіткнень літаків на етапі польоту за маршрутом у межах визначеного регіону повітряного

простору. Запропонована методика ґрунтується на фрагментації повітряного простору на елементарні зони з використанням ієрархічної системи просторового індексування для визначення потенційних конфліктних точок та використанні моделей оцінки ризику, які підходять до пари літаків на основі напрямку польоту літаків. Новизна цього дослідження полягає у використанні просторової системи індексації та застосуванні комбінованого підходу до оцінки ризику зіткнень у повітряному просторі.

Застосування запропонованої методики дозволить виявити можливі зони високого ризику та визначити фактори, що призводять до підвищеного ризику, що дозволить визначити рівень безпеки цивільної авіації в умовах перевантаженого використання повітряного простору. Методика може бути використана для будь-якого повітряного простору. Проте, оскільки в даному дослідженні використовуються дані саме з повітряного простору Німеччини, ризики, гексагони, у яких були виявлені конфліктні пари, та інші результати, безпосередньо пов'язані з використанням зібраних даних, будуть у першу чергу актуальними для органів управління повітряним простором Німеччини.

Матеріали та методи

Об'єкт дослідження – процеси функціонування та розвитку систем авіаційних перевезень в умовах обмеженого доступу до повітряного простору, зростання інтенсивності повітряного руху та впровадження новітніх технологій управління. Предмет дослідження – моделі оцінки ризиків та ефективності авіаційних маршрутів у контексті сегрегації повітряного простору, зміни траєкторій польотів, впливу геополітичних чинників і застосування концепції FRA.

Комбінована модель оцінки ризику зіткнень у повітрі використовується для FRA для підтримки управління повітряним рухом. Розроблений алгоритм оцінки ризику інтегровано в автоматичне програмне забезпечення для управління повітряним рухом на основі глобальної системи просторового індексування. Шестикутна комірка використовується для аналізу ризику зіткнення в повітрі для користувачів, розташованих всередині елементарної комірки повітряного простору. Бібліотека НЗ Python також використовується для представлення повітряного простору та візуалізації ризику зіткнення в повітрі.

Виклад основного матеріалу

Літак, що виконує політ за певним маршрутом, може переходити з одного повітряного простору в інший. Це пов'язано з тим, що повітряний простір визначається над сухопутною територією і територіальними водами певної держави, що належать певній країні. Кожна країна сама визначає структуру свого повітряного простору відповідно до своїх географічних умов та особливостей. Літаки цивільної комерційної авіації використовують тільки контрольований повітряний

простір для польоту для забезпечення безпеки авіаперевезень. Для керування повітряним рухом застосовуються системи спостереження, що сьогодні ґрунтуються на радіолокаційних та мультилатераційних сенсорах та даних Автоматичного залежного спостереження у широкомовному режимі (ADS-B). Дані координат місцеположення літаків містять похибки, що визначають мінімуми ешелонування. На сьогоднішній день в більшості країн використовуються певні специфікації зональної навігації (RNAV) [18]. Ці специфікації визначають довірчу зону для положення літака в межах 95%. У загальному випадку норми вертикального ешелонування становлять 300 м до FL 290 та 600 м вище. Горизонтальне ешелонування між користувачами повітряного простору становлять 5,6 км для термінальної диспетчерської зони і 9,2 км для контрольованого району.

Повітряний простір вертикально розділений на ешелони польоту, висота між двома ешелонами польоту становить 100 футів. У межах ешелону польоту літак повинен рухатися лише в одному заданому напрямку. Але на маршруті рух може здійснюватися в обох напрямках; це забезпечується поділом напрямку за рівнем. Літаки використовують мережу заздалегідь розроблених маршрутів польоту, яка зазначена в аеронавігаційній базі даних певної країни [19].

Сьогодні ADS-B є ключовим джерелом даних з борту літака, що включає координати місцеположення у просторі. На відміну від інших систем спостереження, координати місцеположення літаків вимірюються на борту за допомогою системи супутникової навігації, що передаються через відкритий канал цифрового зв'язку на 1090 МГц. У номінальних умовах координати ADS-B є точнішими за інші сенсори спостереження, використовувани при організації повітряного руху. Сьогодні чимало комерційних наземних мереж програмно-керованих приймачів забезпечують приймання та обробку даних, прийнятих через ADS-B.

Для оцінки рівня ризику зіткнення літаків у повітряному просторі використаємо дані спостереження, отримані за концепцією ADS-B.

Оцінку ризику зіткнення літаків пропонується виконувати за комбінованою моделлю. Отже, для кожної пари літаків за попередніми даними виконується розрахунок траєкторних даних, що включає істинний курс літаків. Отримані курси по кожній парі літаків подаються на тригер паралельності, що класифікує модель, що застосовуватиметься у подальшому для оцінки ризику. У випадку, якщо траєкторії літаків перетинаються, то застосовується наступна модель:

$$R = 2n \left(\frac{2V_r}{\pi\lambda_{xy}} + \frac{V_z}{2\lambda_z} \right) P_z(h_z) P_{ho}, \quad (1)$$

де n – кількість пар літаків; V_r – відносна швидкість між літаками; λ_{xy} – середній горизонтальний розмір літака; λ_z – вертикальний безпечний розмір літака; P_{ho} – ймовірність горизонтального перекриття для нескінченно довгих траєкторій; V_z – відносна вертикальна

швидкість; $P_z(h_z)$ – ймовірність вертикального перекриття.

Ймовірність горизонтального перекриття оцінюється наступним чином:

$$P_{ho} = \pi\lambda_{xy}^2 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f_2^A(\xi) f_2^C(\eta) P_{h1}(\xi, \eta | V_1, V_2) d\xi d\eta, \quad (2)$$

де V_1, V_2 – шляхові швидкості обох літаків, що використовуються для оцінки ризику; f_1^A та f_2^A – похибки положення вздовж траєкторій; f_1^C та f_2^C – похибки поперечної траєкторії двох літаків; θ – кут між траєкторіями літаків; t – час; ξ та η – просторові інтеграли; d_{10} та d_{20} – початкові відстані двох площин від точки перетину.

Ймовірність вертикального відхилення літака [20]:

$$P_z = \int_{-\lambda_z}^{\lambda_z} \int_{-\infty}^{+\infty} L(z_1) L(h_z + z_1 - z) dz_1 dz, \quad (3)$$

де $L(x)$ – функція щільності ймовірності Лапласа; λ_z – вертикальний розмір літака; h_z – вертикальна відстань.

Параметр масштабу цього розподілу становить 38 футів для висот нижче 290 FL (410 FL, якщо літак знаходиться в повітряному просторі, де застосовуються зменшені мінімуми вертикального ешелонування) та 76 футів вище.

Ризик зіткнення для літаків, що були ідентифіковані як такі, що рухаються на паралельних маршрутах, оцінюємо за допомогою моделі [9]:

$$R_r = 2P_y P_z P_{xy} \left(\frac{V_x}{2\lambda_x} + \frac{V_y}{2\lambda_y} + \frac{V_z}{2\lambda_z} \right), \quad (4)$$

де P_y – ймовірність бічного перекриття для літаків, що номінально знаходяться на одному шляху; P_z – ймовірність вертикального перекриття; P_{xy} – ймовірність поздовжнього перекриття для літаків, що номінально знаходяться на одному шляху; V_y – середня відносна бічна швидкість; V_z – середня відносна вертикальна швидкість; V_x – поздовжня швидкість підходу до літака; λ_x – середня довжина літака; λ_z – безпечний вертикальний розмір літака; λ_y – розмах крил літака.

Ймовірність поздовжнього перекриття можна оцінити наступним чином:

$$P_{xy} = \frac{2\lambda_x}{2TV_x \left(1 + \frac{1}{b}\right)^2 e^{\frac{s_{min}}{b}}}, \quad (5)$$

де T – середній період; s_{min} – дистанція між літаками; b – параметр масштабу.

Ймовірність відхилення літака від запланованого маршруту є важливим показником для оцінки безпеки польотів. Це відхилення спричинене невизначеністю, пов'язаною з помилками, які можна розділити на дві основні складові:

- помилки бортової системи позиціонування: це помилки, що виникають через недосконалість обладнання, наприклад, системи позиціонування;
- помилки пілотування: це відхилення, що є результатом дії помилок пілота або автопілота.

Для оцінки цих відхилень та їх впливу на безпеку польотів використовується статистичний аналіз. Однак цей підхід має значні обмеження. Статистична оцінка ймовірності може бути неточною, особливо коли кількість вимірювань обмежена. У таких випадках для

оцінки ймовірностей відхилення використовується окремим функція щільності ймовірності (PDF), яка дозволяє оцінити ймовірність перебування літака в межах певної довірчої зони, навіть за наявності невеликої кількості даних

У якості PDF використовується одновимірний узагальнений розподіл помилок через його гнучкість у зміні форми від подвійної експоненціальної ($s = 1$) до нормальної функції ($s = 0,5$) [21, 22]:

$$PDF(x) = \frac{1}{\Gamma(s+1)\sigma 2^{s+1}} \exp\left(-0.5 \left|\frac{x-\mu}{\sigma}\right|^{\frac{1}{s}}\right), \quad (6)$$

де s – параметр для контролю асиметрії; σ – середнє стандартне відхилення; $\Gamma(x)$ – гамма-функція Ейлера; μ – середнє значення.

Для горизонтальної площини ризик відхилення повітряного судна від максимально допустимих рівнів оцінюється за формулою (6) наступним чином:

$$P_h = \int_{-\infty}^b PDF(x) dx + \int_{-\infty}^{-b} PDF(x) dx, \quad (7)$$

де b – мінімальна ешелонування, дозволена в певному повітряному просторі.

Для зручності представимо формулу (7) як:

$$P_h = 1 - \int_{-b}^b PDF(x) dx. \quad (8)$$

Для зменшення кількості обчислень при виявленні потенційно-можливих пар літаків для оцінки ризиків зіткнень пропонується застосувати поділ повітряного простору на елементарні зони певного розміру відповідно до рівня точності навігаційного обладнання.

Для цього використано систему геопросторової адресації НЗ (СГА), що базується на рівномірному поділі площі на поверхні еліпсоїда на елементарні частинки шестикутної форми. Данні траєкторії користувачів повітряного простору перетворюються на індекси СГА, а комбіновану модель ризику зіткнень літаків у повітрі застосовуємо до індексів СГА. СГА значно збільшує швидкість обробки даних порівняно з географічними даними. СГА спрощує розрахунки для практичного впровадження та підтримує швидкий перерахунок динамічно змінних даних про повітряний рух [23, 24].

Для кожної шестикутної комірки визначається кількість літаків, що знаходяться в ній одночасно. Для кожної ідентифікованої пари літаків, що знаходяться в одній комірі, оцінюється ризик зіткнення. Результати оцінки ризику візуалізуються на картах OpenStreet за допомогою бібліотеки НЗ та зберігаються у файлах даних.

Цивільна авіація використовує цільовий рівень безпеки (TLS) для визначення мінімально необхідного рівня ризику для забезпечення безпеки польотів [25, 26]. TLS використовується як максимально прийнятний ризик, забезпечення якого гарантує безпеку повітряного руху. Відповідно до міжнародних нормативних документів у загальному випадку вважають, що $TLS = 2.5 \times 10^{-7}$ [26].

Результати та їх обговорення

Для практичної верифікації запропонованого підходу розроблено програмне забезпечення у середовищі Python. У якості даних спостереження використаємо дані ADS-B. Використана мережа OpenSky для отримання даних ADS-B у режимі реального часу [27]. Загалом існує кілька комерційно доступних мереж передачі даних, які забезпечують надійний доступ до наборів даних ADS-B. Найбільш популярними з них є Flightradar24, OpenSky та Flightaware [28]. Слід зазначити що зона дії наземної станції ADS-B обмежена максимальною дальністю радіозв'язку. Покриття OpenSky за даними мережі на серпень 2025 р. наведено на рис. 1 [27].



Рис. 1 – Покриття мережі наземних ADS-B станцій у Європі на серпень 2025 р.

У зв'язку з закритим повітряним простором України проведемо дослідження рівня ризику зіткнення літаків у повітряному просторі Німеччини.

Повітряний простір Німеччини включає три польотні регіони: EDWW, EDGG та EDMM. Розроблене програмне забезпечення збирає дані про користувачів повітряного простору у режимі реального часу, розташованих всередині заданої межі. У дослідженні використано два набори даних: з 7 по 18 січня 2025 року та з 18 по 24 червня 2025 року. Для збору даних програмне забезпечення використовує OpenSky Network API [21]. Дані збираються для меж прямокутної області, що визначається двома верхніми точками $47^{\circ}27'47.20''N$ $05^{\circ}86'50.0''E$ та $55^{\circ}05'65.30''N$ $15^{\circ}03'38.2''E$. Також використовуються цілі траєкторії літаків, ідентифікованих у прямокутній області на основі ідентифікованого унікального коду ICAO літака (функція `get_track_by_aircraft()` у API) для отримання статистичних даних траєкторій літаків.

Записаний набір даних містить 447 унікальних літаків 40 різних типів. Загальна тривалість усіх польотів становила понад 196 годин. Також вихідними даними для розрахунку ризиків є технічні характеристики літаків, що були зафіксовані у повітряному просторі. Моделі параметрів літаків для розрахунку було взято з

бази даних характеристик літаків BADA (EUROCONTROL). Приклад вхідних даних повітряного руху та геометричних характеристик літаків наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Приклад вхідних даних про повітряний рух

ICAO 24-bit address	Тип літального апарату	Максимальні горизонтальні розміри, [м]	Вертикальні розміри, [м]	Загальний зареєстрований час польоту
3c65cb	A20N	37.5	11.7	05:34:57
4baa63	A321	44.5	11.8	01:52:19
3c5ee2	A319	33.8	11.7	06:25:29
4066d0	B738	39.5	12.6	09:26:45
4bc886	A21N	44.5	11.7	04:18:13
4bb279	A21N	44.5	11.7	07:47:36
3c5b31	A333	63.6	16.7	05:52:0
3c48f0	A319	33.8	11.7	07:35:34
461f39	A319	33.8	11.7	02:55:38
4bb20d	A21N	44.5	11.7	05:16:37
3c4b29	B748	76.4	19.5	05:26:8
4cabde	CRJX	39.1	7.1	04:8:43
44ce75	A319	33.8	11.7	16:58:33
4079a9	B738	39.5	12.6	06:22:40
3d338e	RV12	8.15	2.54	01:22:20

Програмне забезпечення асоціює кожний літак з певною адресою гексагональної комірки системи НЗ. Точність поділу простору визначається розміром сторони правильного шестикутника. У дослідженні обрано шестикутники з довжиною сторони 3,7 км, що відповідає вимогам до горизонтального ешелонування, де мінімальна безпечна відстань між повітряними суднами має знаходитись у межах 5,6 км. Сторона правильного шестикутника дорівнює радіусу описаного кола, а діаметр комірки (подвоєний радіус) становить 7,4 км, що на 25% перевищує нормативну межу горизонтального розділення. Це дозволяє враховувати потенційні зони ризику з деяким запасом.

Після перетворення координат в індекси шестикутників виконуємо пошук літаків з однаковим адресом шестикутника. У результаті фільтрації повторень визначаються шестикутники, де одночасно перебуває більше одного літака. Частота таких випадків показано на OpenStreetMap (рис. 2).

На рис. 2 кольором позначено інтенсивність повітряного руху: зеленим показано зони без повітряного руху, сірим шестикутники у яких спостерігався хоча б один літак, червоним - ділянки, де одночасно перебували два або більше літаків.

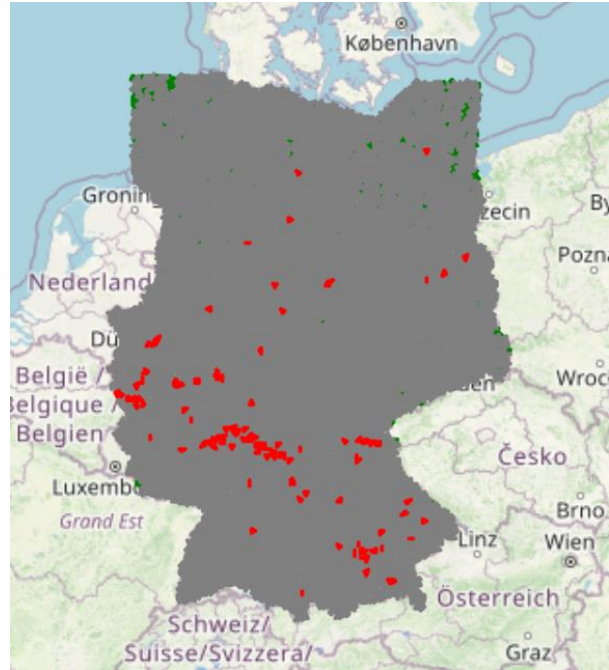


Рис. 2 – Кількість літаків у комірці

Наявність кількох літаків у межах одного шестикутника може свідчити про порушення вимог горизонтального ешелонування, особливо якщо вони перебували на однаковому рівні польоту.

Пари літаків, що перебували в однакових гексагональних осередках, були використані для оцінювання ризиків зіткнення згідно з моделями (1) та (4). Зокрема, модель (4) потребує оцінки ймовірності горизонтального перетину маршрутів, що інтерпретується як шанс виходу літака за межі запланованої траєкторії. Хоча номінально літаки на маршруті витримують центральну вісь, дія навігаційних похибок спричинює певні відхилення.

Для отримання апіорної інформації щодо відхилень літаків для кожного літака було проаналізовано історичні реалізації польотів для визначення горизонтальних відхилень від середньої лінії маршруту. В статистичному аналізі використано лише дані під час польоту по маршруту без етапів набору та зниження висоти.

У повітряному просторі Німеччини, де застосовується концепція FRA, транзитні польоти здійснюються прямими маршрутами між точками входу та виходу. При аналізі програмне забезпечення агрегувало траєкторії літаків за однаковими маршрутними сегментами та розрахувало середню траєкторію, яка слугує базою для оцінки відхилень.

На рис. 3 наведено результати аналізу відхилень літаків від запланованої траєкторії руху у вигляді гістограми відхилень. Також рис. 3 містить результати підгонки функції щільності ймовірності (PDF), що базується на одномірному узагальненому розподілі похибок (6).

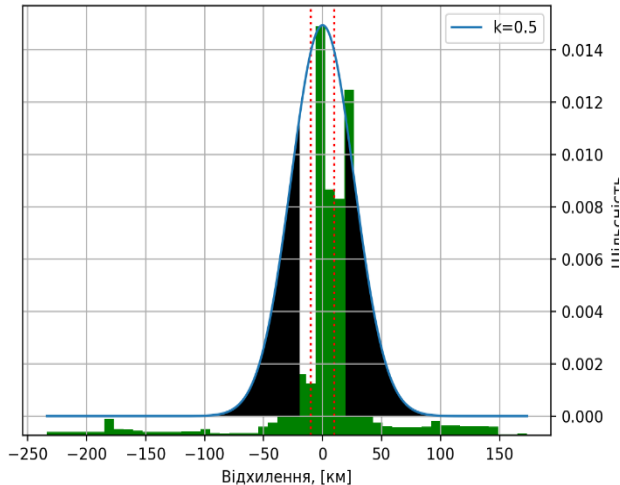


Рис. 3 – Результати статистичного аналізу відхилень користувачів повітряного простору від центру запланованої траєкторії руху

Допустима величина відхилень коливається у межах ± 10 км для етапу польоту за маршрутом, що відповідає ширині траси горизонтально. Для оцінки апіорної ймовірності відхилення літака від запланованого маршруту оцінено площу області нижче PDF від мінус

нескінченності до -10 км та від 10 км до плюс нескінченності. Результат оцінки дав апіорну ймовірність відхилень 68% для усього трафіку. Під час оцінки відхилень використано середню траєкторію як базову лінію для побудови PDF відхилень, що є методологічним спрощенням. Такий підхід не враховує асиметрію та системні зміщення, характерні для реального трафіку. Подальші дослідження планують включати побудову PDF на основі фактичних траєкторій, застосування адаптивних фільтрів та кластеризацію маршрутів для підвищення точності оцінки ризику.

Отже, для кожного шестикутника, у межах якого виявлено більше двох літаків, виконується оцінювання ризику зіткнення літаків для кожної пари окремо. При цьому спершу оцінюються кути істинних курсів та проводиться детектування моделі для оцінки. В табл. 2 наведено перші дев'ять ідентифікованих пар літаків на основі найвищого значення ризику. Також зазначені унікальні ідентифікатори літаків (ICAO код), адреса шестикутника та час.

Результати оцінки ризику зіткнення для пар літаків у табл. 2 наведено в табл. 3. Крім того, у табл. 3 зазначається модель, яка була використана для оцінки ризику, модель R вказує, що використовується рівняння (4), модель A – рівняння (1).

Таблиця 2

Ідентифіковані пари користувачів повітряного простору				
Пари	Літак 1	Літак 2	Адреса шестикутника	Час, UTC
1	4bb20d	4bb279	861fa1cb7ffffff	06.24 10:41:03
2	3d338e	44ce75	861fa3baffffff	06.19 21:23:35
3	4066d0	4bc886	861f8dcf7ffffff	06.24 10:58:51
4	4079a9	3c5b31	861fa840ffffff	06.20 19:25:16
5	4066d0	3c4b29	861fa116ffffff	06.24 10:33:57
6	3c48f0	461f39	861f10a17ffffff	01.09 21:12:02
7	4cabde	3c6594	861fa8da7ffffff	01.09 22:17:39
8	3c5ee2	3c6659	861fab37ffffff	01.10 22:14:23
9	4baa63	3c65cb	861e3675ffffff	01.08 21:54:27

Таблиця 3

Результати оцінки ризику зіткнення в повітрі для вибраних пар			
Пари	Ризик	Порівняння з TLS	Модель
1	5.291×10^{-22}	Нижче	R
2	9.858×10^{-22}	Нижче	R
3	4.497×10^{-19}	Нижче	R
4	1.455×10^{-07}	Вище	R
5	9.401×10^{-06}	Вище	R
6	2.38×10^{-10}	Нижче	A
7	2.46×10^{-10}	Нижче	A
8	3.81×10^{-10}	Нижче	A
9	6.77×10^{-10}	Нижче	A

Рішення щодо моделі було прийнято на основі наявності точки перетину попереду між двома траєкторіями. Близько 108 пар у доступному наборі даних було ідентифіковано на основі розташування обох літаків в унікальній шестикутній комірці.

Результати дослідження показують, що модель А була застосована у 32% конфліктних ситуацій. Також ідентифіковані пари літаків у шестикутній комірці мали достатній рівень вертикального ешелонування понад 300 метрів, що відповідає прийнятому мінімуму вертикального ешелонування.

Результати дослідження повітряного руху показують, що найвище значення ризику зіткнення в повітрі (9.401×10^{-6}) було виявлено для пари літаків 3c4b29 та 4066d0 на паралельних маршрутах у комірці шестикутника 861fa116ffffff (24 червня о 10:33:57 UTC). Найнижчий ризик зіткнення в повітрі для пари в межах шестикутної комірки 861faeae7ffffff становив 5.291×10^{-2} для пари 4bb20d-4bb279, що було виявлено 24 червня о 10:41:03 UTC.

Результати оцінки ризиків порівнюються зі значенням $TLS\ 2.5 \times 10^{-7}$ по моделям. Результати, отримані по моделі А, мають нижчі значення за встановлене значення TLS. Однак застосування моделі R ускладнене значними значеннями відхилення літака в горизонтальній площині (Py Pxу). Проте низькі значення Pz зробили загальний ризик зіткнення в повітрі значно нижчим, як наслідок тільки 22% мають значення вищі, ніж TLS. Загалом по двох моделях тільки 15% отриманих значень вище TLS, але враховуючи висоти польотів літаків ризик зіткнення зменшився значно та задовільнив вимоги TLS у всіх конфліктних випадках.

Висновки

Оцінка ризику зіткнення літаків є важливим елементом забезпечення безпеки повітряного руху. Результати оцінювання ризику зіткнень для повітряного простору Німеччини показали, що у 108 шестикутниках були ідентифіковані конфліктні ситуації без врахування висоти польоту. Ризик зіткнення для сценарію паралельних маршрутів показав значення, що на 22% перевищують значення TLS. Модель для сценаріїв руху літаків за маршрутами, що перетинаються, показала значення, що постійно нижчі за прийняте значення TLS. Результати статистичної оцінки відхилення літаків від центру визначного ешелону руху вказують на 32% значних відхилень за меж дозволеного інтервалу. Це вказує на значну варіантність маршрутів та потребу у більш тонкому моделюванні PDF.

За результатами дослідження можна рекомендувати використовувати результати СГА для задач оцінки безпеки повітряного руху та динамічної секторизації, а для регіонів із підвищеним ризиком застосовувати обмеження щільності повітряного руху. Також дієвим механізмом може бути запровадження адаптивних мінімумів горизонтального ешелонування залежно від точності даних позиціонування у ADS-B.

Для зон FRA можна визначити зони пріоритетного контролю (віртуальні коридори) навколо найбільш інтенсивних шестикутників і призначити в них підвищені вимоги до попередньої перевірки планів польоту, застосувати кластеризацію маршрутних сегментів за даними ADS-B для побудови більш пристосованих маршрутів, що дозволить знизити невизначеність маршрутів та звужить PDF для відхилень.

Додаток

СГА – система геопросторової адресації
FIR (район польотної інформації)
ADS-B (Automatic Dependent Surveillance-Broadcast)-автоматичне залежне спостереження - мовлення
PDF (probability density function) – функція щільності ймовірності
TLS (target level of safety) – цільовий рівень безпеки
FL (flight level) – ешелон польоту
RNAV (Area Navigation) – зональна навігація

Перелік використаних джерел

- [1] International Air Transport Association. World Air Transport Statistics 2020. Montreal: IATA, 2020. 64 p.
- [2] IATA: Annual Review 2023. IATA (2023). URL: <https://www.iata.org/content-tasets/c81222d96c9a4e0bb4ff6ced0126f0bb/annual-review-2023.pdf> (дата звернення: 25.05.2025).
- [3] EUROCONTROL: Performance Review Report (PRR) 2024. URL: <https://www.eurocontrol.int/publication/performance-review-report-prr-2024> (дата звернення: 25.05.2025).
- [4] Волковська Г. Г., Ситник Д. О. Управління ризиками в авіаційній безпеці. URL: <https://er.nau.edu.ua/server/api/core/bitstreams/29a654ae-946b-4719-b673-42ef2fbc9c95/content> (дата звернення: 25.05.2025).
- [5] ACLED Conflict Index, ACLED. URL: <https://acleddata.com/conflict-index> (дата звернення: 25.05.2025).
- [6] The Effect of Russia – Ukraine War on International Aviation Sectors / Prakasa S. U. W., Wijayanti A., Hariri A., Yustitianiingtyas L. *KnE Social Sciences*. 2022. Vol. 7, № 1. Pp. 572-581. DOI: <https://doi.org/10.18502/kss.v7i15.12132>.
- [7] Ennen D., Wozny F. Airspace closures following the war of aggression in Ukraine: Impact on Europe-Asia airfares. *Transportation Research Procedia*. 2024. Vol. 78. Pp. 103-110. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2024.02.014>.
- [8] Ostroumov I. V., Ivashchuk O., Kuzmenko N. S. Preliminary Estimation of war Impact in Ukraine on the Global Air Transportation. *Proceedings of the 12th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT)*, Spišská Kapitula, Slovakia, 26-28 September 2022. Pp. 281-284. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACIT54803.2022.9913092>.

- [9] ICAO: The Vertical Reich Collision Risk Model. URL: <https://www.icao.int/SAM/Documents/2003/APATM6/WP10-apatm6Item3-APXb.pdf> (дата звернення: 30.05.2025).
- [10] Aldis G., Barry S. Fast evaluation of the Anderson-Hsu collision risk for a crossing track scenario. *Proceedings of the ICAO SASP-WGH-27 Meeting*, Oklahoma City, USA, 17-19 November 2015.
- [11] Levy B. S., Som P., Greenhaw R. Analysis of flight technical error on straight, final approach segments. *Proceedings of the 59th Annual Meeting of The Institute of Navigation and CIGTF 22nd Guidance Test Symposium*, Albuquerque, USA, 23-25 June 2003. Pp. 456-467.
- [12] Data-driven mid-air collision risk modelling using extreme-value theory / Figuet B., Monstein R., Waltert M., Morio J. *Aerospace Science and Technology*. 2023. Vol. 142, part A. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ast.2023.108646>.
- [13] Su Y., Xu Y. A risk assessment method for mid-air collisions in urban air mobility operations. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*. 2024. Vol. 10, iss. 2. Pp. 1327-1341. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIV.2024.3426915>.
- [14] Campos L. M. B. C., Marques J. M. G. On Probabilistic Risk of Aircraft Collision along Air Corridors. *Aerospace*. 2021. Vol. 8(2). Article 31. DOI: <https://doi.org/10.3390/aerospace8020031>.
- [15] Mosa H., Saleh A., Al-Badarneh A. Performance comparison of spatial data indexing using distributed systems. *2025 International Conference on New Trends in Computing Sciences (ICTCS)*, Amman, Jordan, 16-18 April 2025. Pp. 327-333. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICTCS65341.2025.10989398>.
- [16] Neelakandan D. S., Al Ali H. Enhancing Trajectory-Based Operations for UAVs through Hexagonal Grid Indexing: A Step towards 4D Integration of UTM and ATM. *International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace*. 2023. Vol. 10, no. 2. Pp. 1-21. DOI: <https://doi.org/10.58940/2374-6793.1815>.
- [17] A Low-Altitude Flight Conflict Detection Algorithm Based on a Multilevel Grid Spatiotemporal Index / S. Miao et al. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2019. Vol. 8, no. 6. Article 289. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijgi8060289>.
- [18] ICAO. Procedures for Air Navigation Services — Air Traffic Management (PANS-ATM). Doc. 4444. Montréal: International Civil Aviation Organization, 2016. 476 p.
- [19] ICAO. Performance-Based Navigation (PBN) Manual. Doc. 9613. Montréal: International Civil Aviation Organization, 2008. 398 p.
- [20] ICAO. The Longitudinal Reich Collision Risk Model. SASP-WG/WHL/20-IP/10. Montréal: International Civil Aviation Organization, 2012.
- [21] Giller G. L. A Generalized Error Distribution. *SSRN Electronic Journal*. 2005. Pp. 1-7. DOI: <https://doi.org/10.2139/ssrn.2265027>.
- [22] Back W. E., Boles W. W., Fry G. T. Defining Triangular Probability Distributions from Historical Cost Data. *Journal of Construction Engineering and Management*. 2000. Vol. 126, no. 1. Pp. 29-37. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9364\(2000\)126:1\(29\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9364(2000)126:1(29)).
- [23] Hierarchical hexagonal spatial index. H3. URL: <https://h3geo.org/docs/comparisons/s2> (дата звернення: 21.09.2025).
- [24] A precision evaluation index system for remote sensing data sampling based on hexagonal discrete grids / Y. Ma et al. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2021. Vol. 10(3). Article 194. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijgi10030194>.
- [25] ICAO. Aircraft Operations. Volume II – Construction of Visual and Instrument Flight Procedures. 7th ed. Doc. 8168. Montréal: International Civil Aviation Organization, 2020.
- [26] ICAO. Manual on Implementation of a 300 m (1 000 ft) Vertical Separation Minimum Between FL 290 and FL 410 Inclusive. 2nd ed. Doc. 9574. Montréal: International Civil Aviation Organization, 2002.
- [27] The OpenSky Network. URL: <https://opensky-network.org> (дата звернення: 30.05.2025).
- [28] FlightAware and ADS-B. URL: <https://www.flightaware.com/adsb> (дата звернення: 21.09.2025).

RISK CALCULATION METHODOLOGY IN GERMAN AIRSPACE

Ivashchuk O.R.

postgraduate student, State university «Kyiv Aviation Institute», Kyiv, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5637-0332>, e-mail: 5162754@stud.kai.edu.ua;

Ostroumov I.V.

D.Sc. (Engineering), professor, State university «Kyiv Aviation Institute», Kyiv, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2510-9312>, e-mail: vany@kai.edu.ua

In conditions of high airspace congestion, the safety of modern air transportation requires continuous control in a mode close to real time. An important component of air traffic safety is the risk of collision, which depends on the airspace congestion, the air traffic control system and the reliability of the equipment. The article assesses the risk of aircraft collisions during en-route flight within a specific airspace region. The proposed methodology is based on the

fragmentation of airspace into elementary zones using a hierarchical spatial indexing system to identify potential conflict points and uses risk assessment models that are suitable for a pair of aircraft based on the direction of flight of the aircraft. Open data on the position of civil aircraft obtained using the concept of automatic dependent observation in the broadcast mode are used to assess the risk of collision for a specific airspace. The risk assessment is proposed based on a combined model of air traffic on intersecting and parallel courses. A priori data on aircraft deviations from the specified trajectories of movement were obtained based on statistical analysis of trajectories from past route implementations. The data collected during the study are given in tables. Calculations and data collection are performed using a program developed in the Python programming language with the involvement of appropriate libraries that are responsible for connecting to the network of automatic dependent observation transmitters, calculating risks using the appropriate model and visualizing data. The proposed approach was verified using open data on air traffic within German airspace for a certain time frame. The results of the study include both a statistical assessment of aircraft deviations and recommendations for using the methodology in FRA areas and recommendations for applying the assessment results.

Keywords: air navigation, civil aviation safety, air traffic control.

References

- [1] International Air Transport Association. *World Air Transport Statistics 2020*. Montreal, Canada: IATA, 2020.
- [2] IATA: Annual Review 2023. 2023. [Online]. Available: <https://www.iata.org/contentassets/c81222d96c9a4e0bb4ff6ced0126f0bb/annual-review-2023.pdf>. Accessed on: May 25, 2025.
- [3] EUROCONTROL: Performance Review Report (PRR) 2024. [Online]. Available: <https://www.euro-control.int/publication/performance-review-report-prr-2024>. Accessed on: May 25, 2025.
- [4] H.H. Volkovska, and D.O. Sytnyk, "Upravlinnia ryzykamy v aviatsiinii bezpetsi" ["Risk management in aviation security"]. [Online]. Available: <https://er.nau.edu.ua/server/api/core/bitstreams/29a654ae-946b-4719-b673-42ef2fbc9c95/content>. Accessed on: May 25, 2025. (Ukr.)
- [5] ACLED Conflict Index, ACLED. [Online]. Available: <https://acleddata.com/conflict-index>. Accessed on: May 25, 2025.
- [6] S.U.W. Prakasa, A. Wijayanti, A. Hariri, and L. Yustitiningtyas, "The Effect of Russia – Ukraine War on International Aviation Sectors," *KnE Social Sciences*, vol. 7, № 1, pp. 572-581, 2022. doi: 10.18502/kss.v7i15.12132.
- [7] D. Ennen, and F. Wozny, "Airspace closures following the war of aggression in Ukraine: Impact on Europe-Asia airfares," *Transportation Research Procedia*, vol. 78, pp. 103-110, 2024. doi: 10.1016/j.trpro.2024.02.014.
- [8] I.V. Ostroumov, O. Ivashchuk, and N.S. Kuzmenko, "Preliminary Estimation of war Impact in Ukraine on the Global Air Transportation," in *Proceedings of the 12th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT)*, Spišská Kapitula, Slovakia, Sept. 26-28, 2022, pp. 281-284. doi: 10.1109/ACIT54803.2022.9913092.
- [9] ICAO: The Vertical Reich Collision Risk Model. [Online]. Available: <https://www.icao.int/SAM/Documents/2003/APATM6/WP10-apatm6Item3-APXb.pdf>. Accessed on: May 30, 2025.
- [10] G. Aldis, and S. Barry, "Fast evaluation of the Anderson-Hsu collision risk for a crossing track scenario," in *Proceedings of the ICAO SASP-WGH-27 Meeting*, Oklahoma City, USA, Nov. 17-19, 2015.
- [11] B.S. Levy, P. Som, and R. Greenhaw, "Analysis of flight technical error on straight, final approach segments," in *Proceedings of the 59th Annual Meeting of The Institute of Navigation and CIGTF 22nd Guidance Test Symposium*, Albuquerque, USA, June 23-25, 2003, pp. 456-467.
- [12] B. Figuet, R. Monstein, M. Waltert, and J. Morio, "Data-driven mid-air collision risk modelling using extreme-value theory," *Aerospace Science and Technology*, vol. 142, part A, 2023. doi: 10.1016/j.ast.2023.108646.
- [13] Y. Su, and Y. Xu, "A risk assessment method for mid-air collisions in urban air mobility operations," *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, vol. 10, iss. 2, pp. 1327-1341, 2024. doi: 10.1109/TIV.2024.3426915.
- [14] L.M.B.C. Campos, and J.M.G. Marques, "On Probabilistic Risk of Aircraft Collision along Air Corridors," *Aerospace*, vol. 8(2), article 31, 2021. doi: 10.3390/aerospace8020031.
- [15] H. Mosa, A. Saleh, and A. Al-Badarneh, "Performance comparison of spatial data indexing using distributed systems," in *2025 International Conference on New Trends in Computing Sciences (ICTCS)*, Amman, Jordan, April 16-18, 2025, pp. 327-333. doi: 10.1109/ICTCS65341.2025.10989398.
- [16] D.S. Neelakandan, and H. Al Ali, "Enhancing Trajectory-Based Operations for UAVs through Hexagonal Grid Indexing: A Step towards 4D Integration of UTM and ATM," *International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace*, vol. 10, no. 2, pp. 1-21, 2023. doi: 10.58940/2374-6793.1815.
- [17] S. Miao et al., "A Low-Altitude Flight Conflict Detection Algorithm Based on a Multilevel Grid Spatiotemporal Index," *ISPRS International Journal of Geo-Information*, vol. 8, no. 6, article 289, 2019. doi: 10.3390/ijgi8060289.
- [18] ICAO. *Procedures for Air Navigation Services — Air Traffic Management (PANS-ATM)*. Doc.4444.

- Montréal, Canada: International Civil Aviation Organization, 2016.
- [19] ICAO. *Performance-Based Navigation (PBN) Manual*. Doc. 9613. Montréal, Canada: International Civil Aviation Organization, 2008.
- [20] ICAO. *The Longitudinal Reich Collision Risk Model*. SASP-WG/WHL/20-IP/10. Montréal, Canada: International Civil Aviation Organization, 2012.
- [21] G.L. Giller, A Generalized Error Distribution, *SSRN Electronic Journal*, pp. 1-7, 2005. doi: **10.2139/ssrn.2265027**.
- [22] W.E. Back, W.W. Boles, and G.T. Fry, "Defining Triangular Probability Distributions from Historical Cost Data," *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 126, no. 1, pp. 29-37, 2000. doi: **10.1061/(asce)0733-9364(2000)126:1(29)**.
- [23] Hierarchical hexagonal spatial index. H3. [Online]. Available: <https://h3geo.org/docs/comparisons/s2>. Accessed on: September 21, 2025.
- [24] Y. Ma et al., "A precision evaluation index system for remote sensing data sampling based on hexagonal discrete grids," *ISPRS International Journal of Geo-Information*, vol. 10(3), article 194, 2021. doi: **10.3390/ijgi10030194**.
- [25] ICAO. *Aircraft Operations. Volume II – Construction of Visual and Instrument Flight Procedures*, 7th ed. Doc. 8168. Montréal, Canada: International Civil Aviation Organization, 2020.
- [26] ICAO. *Manual on Implementation of a 300 m (1 000 ft) Vertical Separation Minimum Between FL 290 and FL 410 Inclusive*, 2nd ed. Doc. 9574. Montréal, Canada: International Civil Aviation Organization, 2002.
- [27] The OpenSky Network. [Online]. Available: <https://opensky-network.org>. Accessed on: May 30, 2025.
- [28] FlightAware and ADS-B. [Online]. Available: <https://www.flightaware.com/adsb>. Accessed on: September 21, 2025.
- Стаття надійшла 29.08.2025
Стаття прийнята 14.10.2025
Стаття опублікована 30.10.2025

Цитуйте цю статтю як: Іващук О. Р., Остроумов І. В. Оцінювання ризику зіткнень літаків під час польоту на маршруті. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 51. С. 291-300. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.51.2025.344967>.