

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ  
ДЕРЖАВНЕ НЕКОМЕРЦІЙНЕ ПІДПРИЄМСТВО  
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «КИЇВСЬКИЙ АВІАЦІЙНИЙ ІНСТИТУТ»  
ФАКУЛЬТЕТ ПРАВА ТА МІЖНАРОДНИХ ВІДНОСИН  
КАФЕДРА МІЖНАРОДНИХ ВІДНОСИН ТА СТРАТЕГІЧНИХ СТУДІЙ

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ  
Завідувач випускової кафедри  
\_\_\_\_\_ Ніна РЖЕВСЬКА  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

ВИПУСКНИКА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА  
СПЕЦІАЛЬНОСТІ 291 «МІЖНАРОДНІ ВІДНОСИНИ,  
СУСПІЛЬНІ КОМУНІКАЦІЇ ТА РЕГІОНАЛЬНІ СТУДІЇ»  
ОСВІТНЬО-ПРОФЕСІЙНОЇ ПРОГРАМИ  
«МІЖНАРОДНА ІНФОРМАЦІЯ»

**Тема: «ШТУЧНИЙ ІНТЕЛЕКТ У ПРОГНОЗУВАННІ АВІАЦІЙНИХ  
КАТАСТРОФ: МІЖНАРОДНИЙ ДОСВІД ТА ВІТЧИЗНЯНА ПРАКТИКА»**

Виконавець: здобувач вищої освіти 2 курсу, групи М-291-24-1-МІ, Романюк  
Євгенія Романівна

Керівник: д.п.н., проф., завідувач кафедри міжнародних відносин та  
стратегічних студій Ржевська Ніна Федорівна

Нормоконтролер \_\_\_\_\_ Ніна РЖЕВСЬКА  
(підпис)

КИЇВ 2025

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП.....</b>	<b>3</b>
<b>РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ ДОСЛІДЖЕННЯ АВІАЦІЙНИХ КАТАСТРОФ ТА МОЖЛИВОСТЕЙ ЇХ ПРОГНОЗУВАННЯ.....</b>	<b>8</b>
1.1. Авіаційна безпека в міжнародному інформаційному просторі.....	8
1.2. Основні фактори виникнення авіаційних катастроф: технічні, людські, організаційні та природні.....	12
1.3. Роль штучного інтелекту в управлінні ризиками та підвищенні безпеки польотів.....	22
<b>РОЗДІЛ 2. ІНФОРМАЦІЙНО-АНАЛІТИЧНИЙ ПІДХІД ДО ПРОГНОЗУВАННЯ РИЗИКІВ АВІАЦІЙНИХ КАТАСТРОФ.....</b>	<b>28</b>
2.1. Концепція інформаційного моніторингу авіаційної безпеки.....	28
2.2. Аналітична модель прогнозування ризиків у системі авіаційної безпеки.....	36
2.3. Алгоритм оцінки рівня ризику катастрофи.....	44
<b>РОЗДІЛ 3. ПРОГРАМА АНАЛІЗУ АВІАЦІЙНИХ РИЗИКІВ ЯК ІНСТРУМЕНТ ІНФОРМАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ.....</b>	<b>47</b>
3.1. Концепція розробки програми у сфері міжнародної авіаційної інформації.....	47
3.2. Інформаційна візуалізація результатів прогнозу.....	62
3.3. Міжнародна співпраця та етичні аспекти застосування штучного інтелекту в авіації.....	67
<b>ВИСНОВКИ.....</b>	<b>72</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ЛІТЕРАТУРИ.....</b>	<b>75</b>

## ВСТУП

**Актуальність теми** зумовлена переходом авіаційної галузі до забезпечення безпеки. Актуальним серед безпекових умов залишається створення проактивної прогностичної моделі, що базується на аналізі великих масивів даних. Попри, ретроспективно низький рівень аварійності, поодинокі авіакатастрофи та серйозні інциденти залишаються.

У сучасних умовах інтенсивної цифровізації авіаційна галузь зіштовхується з кардинальними трансформаціями в підходах до забезпечення безпеки польотів. Зростання обсягів даних, отримуваних із бортових сенсорів, систем технічного моніторингу, супутникових джерел та глобальних інформаційних мереж, вимагає створення більш досконалих аналітичних механізмів їхньої обробки. Традиційні інструменти аналізу вже не здатні повністю охопити складність сучасних авіаційних процесів. У той час, штучний інтелект дає змогу провести глибоку, багаторівневу й швидку обробку даних, формуючи нові підходи до розуміння ризиків і небезпечних тенденцій.

Інтелектуальні системи управління, цифрові близнюки, автономні модулі підтримки рішень та аналітичні алгоритми стають основою сучасної інфраструктури безпеки в авіації. Це означає, що питання прогнозування авіаційних катастроф виходить за межі суто технічної площини та набуває міждисциплінарного значення, охоплюючи інформаційно-аналітичні, організаційні та міжнародні аспекти.

Крім того, в умовах глобалізованого авіаційного ринку, де міжнародні авіакомпанії й авіабудівні корпорації функціонують у тісному зв'язку з інформаційним простором, здатність оперативно прогнозувати можливі відхилення стає фактором стратегічної конкурентоспроможності. Штучний інтелект дає можливість не лише зменшити ймовірність катастроф, а й оптимізувати управлінські рішення, знизити фінансові ризики та забезпечити безперервність авіаційних операцій у глобальному масштабі.

Стрімкий розвиток сенсорних технологій, бортових реєстраторів,

цифрових платформ управління технічним станом повітряних суден та систем управління безпекою польотів (SMS) створює принципово нові можливості для використання штучного інтелекту у прогнозуванні відмов, виявленні аномалій у поведінці систем і попередженні авіаційних подій до їх виникнення. У сучасних умовах технологічного стрибка тема дослідження є як ніколи актуальною, оскільки розвиток ШІ та машинного навчання відкриває якісно новий рівень формування безпекових умов – від аналізу історичних даних до побудови «safety intelligence» і моделювання майбутніх ризиків.

Міжнародна наукова спільнота вже сформувала потужне підґрунтя для вивчення ролі ШІ в авіаційній безпеці. У Г. Деміра та С. Дулеби «Штучний інтелект в авіаційній безпеці: систематичний огляд та бібліометричний аналіз» [37] узагальнено напрями застосування ШІ у прогнозуванні ризикових зон, підтримці прийняття рішень та управлінні безпекою польотів. Дослідження М.Дас «Прогностичне технічне обслуговування в авіації з використанням методів машинного навчання» [38] демонструє, як алгоритми машинного навчання дозволяють переходити від планово-регламентного техобслуговування до прогнозного, зменшуючи ймовірність відмов ключових систем у польоті та підвищуючи загальний рівень безпеки. Важливий внесок здійснила й команда NASA під керівництвом С. ДеЛаша, автори звіту «Штучний інтелект і машинне навчання для своєчасної авіаційної безпеки» [39], де обґрунтовано можливість застосування ШІ для раннього виявлення ризикових тенденцій. Значущими для галузі є також праці С. Будалакоті, зокрема дослідження «Виявлення аномалій в авіаційних операційних даних за допомогою машинного навчання» [40], у яких показано, що інтелектуальні алгоритми здатні ідентифікувати небезпечні відхилення під час критичних фаз польоту. Міжнародні регуляторні організації, такі як КАО, EASA та FAA - у своїх документах («Вплив штучного інтелекту на авіаційний сектор», «Дорожня карта впровадження ШІ 2.0», «Стратегії відповідальної інтеграції алгоритмів») [41] фактично визнають технології ШІ одним із ключових елементів подальшого зниження рівня авіаційної аварійності та підвищення

безпеки польотів у глобальному масштабі.

Для України проблема інтеграції ШІ в систему прогнозування авіаційних катастроф є особливо важливою з огляду на необхідність адаптації національної системи управління безпекою польотів до стандартів ІКАО та регуляторних підходів ЄС. Державіаслужба України вже впровадила ризик-орієнтований підхід і системи збору та аналізу даних про безпеку польотів, що закладає підґрунтя для використання алгоритмів ШІ у виявленні небезпечних тенденцій. У вітчизняній науці питання аналізу авіаційних подій, побудови моделей управління безпекою та переходу від реактивного до превентивного підходу розглядаються, зокрема, в дисертаційному дослідженні О. Іванець, присвяченому використанню даних про авіаційні події для удосконалення системи управління безпекою польотів, а також у працях фахівців Національного авіаційного університету та технічних університетів щодо застосування алгоритмів ШІ в бортових та наземних системах авіаційної техніки.

Попри руйнівний вплив повномасштабної війни, варто підкреслити, що до 2022 року Україна була однією з провідних авіаційних держав, здатною створювати унікальні повітряні судна світового масштабу. Символом цієї потужності став легендарний Ан-225 «Мрія» — найбільший і найвантажопідйомніший літак у світі, який уособлював інженерну силу, інноваційність та статус України на глобальному авіаційному ринку. Сьогодні, незважаючи на втрати, українська держава й авіаційна спільнота зберігають амбіцію після перемоги відновити та модернізувати авіаційну промисловість, зробивши її ще більш технологічною, конкурентоспроможною та побудованою на сучасних цифрових рішеннях безпеки. Саме тому аналіз міжнародного досвіду застосування штучного інтелекту у прогнозуванні авіаційних катастроф є надзвичайно важливим, він формує наукове підґрунтя для майбутнього відродження і розвитку української авіаційної галузі.

**Мета роботи.** За результатами дослідження міжнародного досвіду та вітчизняної практики, показати місце та роль штучного інтелекту в

прогнозуванні авіаційних катастроф.

**Завдання дослідження:**

- встановити теоретичні засади дослідження авіаційної безпеки;
- окреслити міжнародно-правові основи авіаційної безпеки;
- оцінити вплив інформаційних викликів і цифрових технологій на забезпечення авіаційної безпеки;
- визначити основні фактори виникнення авіаційних катастроф;
- охарактеризувати роль штучного інтелекту у прогнозуванні авіаційних ризиків;
- сформувати інформаційно-аналітичну модель прогнозування ризиків;
- представити алгоритм оцінки рівня авіаційного ризику;
- запропонувати концептуальну базу цифрової програми для аналізу авіаційних ризиків;
- дослідити стратегії впровадження системи прогнозування ризиків у міжнародних авіаційних компаніях.

**Об'єктом дослідження** є прогнозування ризиків авіаційних катастроф.

**Предметом** – оцінка можливостей ШІ у прогнозуванні авіаційних катастроф.

**Методи дослідження:** порівняльний метод, метод експертного оцінювання та SWOT-аналіз.

**Практичне значення** роботи полягає у розробленні концепції інформаційно-аналітичної програми для прогнозування авіаційних ризиків, що може бути інтегрована в корпоративні системи управління безпекою таких міжнародних авіабудівних компаній, як Boeing та Airbus. Запропонована модель дозволяє підсилити ефективність існуючих платформ Flight Data Monitoring та Safety Management Systems за рахунок використання алгоритмів штучного інтелекту, що забезпечують своєчасне виявлення аномалій та підвищення точності прогнозування потенційно небезпечних ситуацій. Крім того, результати дослідження мають важливе значення для міжнародного авіаційного

співтовариства, оскільки формують теоретичні та методологічні підходи до уніфікації інформаційних потоків, забезпечення обміну даними між державами та корпораціями, а також сприяють розвитку глобальних стандартів інтеграції ІІІ у сферу авіаційної безпеки відповідно до вимог ІСАО, ЕАSА та ІАТА. Запропоновані аналітичні рішення можуть бути використані у процесі міжнародного співробітництва, спільних дослідницьких проектах, виробленні політик у галузі безпеки польотів та формуванні нових цифрових інструментів прогнозування ризиків у цивільній авіації.

**Апробація результатів дослідження:** стаття «Авіаційна безпека в міжнародному інформаційному просторі» (V Міжнародна наукова конференція «Глобальні виклики та інновації: шляхи розвитку сучасної науки»); стаття «Міжнародна співпраця та етичні аспекти застосування штучного інтелекту в авіації» (VIII Міжнародна наукова конференція «Міжгалузеві диспути: динаміка та розвиток сучасних наукових досліджень»).

**Структура роботи:** складається зі вступу, трьох розділів, висновків та списку використаних джерел.

# РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ ДОСЛІДЖЕННЯ АВІАЦІЙНИХ КАТАСТРОФ ТА МОЖЛИВОСТЕЙ ЇХ ПРОГНОЗУВАННЯ

## 1.1. Авіаційна безпека в міжнародному інформаційному просторі

У сучасному глобалізованому світі авіаційна безпека набуває багатовимірного характеру, поєднуючи технічні, правові, організаційні та інформаційні компоненти. Розвиток цифрових технологій, інтеграція штучного інтелекту у транспортну сферу та зростання обсягів даних про польоти змінюють традиційне розуміння безпеки польотів від локального контролю до інформаційно орієнтованої системи управління ризиками. Система міжнародно-правового забезпечення авіаційної безпеки сформувалася як результат тривалої еволюції міжнародного авіаційного права та глобального співробітництва держав у межах Міжнародної організації цивільної авіації (ІКАО). Основним документом, що заклав підвалини сучасної системи регулювання цивільної авіації, є Конвенція про міжнародну цивільну авіацію, прийнята у Чикаго 7 грудня 1944 року. Вона визначає базові принципи безпечного та впорядкованого розвитку міжнародної цивільної авіації, встановлює суверенітет держав над своїм повітряним простором і покладає на них зобов'язання забезпечувати належний рівень безпеки польотів у межах своєї юрисдикції [10]. Згідно зі статтею 44 Чиказької конвенції, однією з головних цілей ІКАО є сприяння безпеці міжнародних повітряних перевезень, а також розроблення єдиних технічних норм і стандартів для забезпечення належного рівня авіаційної безпеки. Ці стандарти реалізуються через Додатки (Annexes) до Конвенції, які мають обов'язковий характер для держав-учасниць. Особливе значення для сфери авіаційної безпеки мають два документи - Annex 17 і Annex 19.

Окрім стандартів ІКАО, важливе місце у формуванні міжнародно правових засад авіаційної безпеки посідають універсальні конвенції, спрямовані на протидію незаконним діям у сфері цивільної авіації. До таких належать: Конвенція про злочини та деякі інші акти, вчинені на борту

повітряного судна (Токіо, 1963 р.) [11], Конвенція про боротьбу з незаконним захопленням повітряних суден (Гаага, 1970 р.) [12], Конвенція про боротьбу з незаконними актами, спрямованими проти безпеки цивільної авіації (Монреаль, 1971 р.) [13], а також Протокол 1988 року до неї. Ці документи встановлюють міжнародно-правову відповідальність за акти тероризму, саботаж, насильство в аеропортах і пошкодження авіаційних засобів.

Міжнародний інформаційний простір сьогодні виступає ключовим середовищем для забезпечення авіаційної безпеки. Саме через нього здійснюється обмін оперативною інформацією між державами, авіаційними адміністраціями, аеропортами та міжнародними організаціями, зокрема ІКАО, EASA, IATA та Євроконтролем. Ефективність цього обміну визначає швидкість реагування на потенційні загрози, зокрема кіберінциденти, технічні збої чи погодні ризики.

Разом із тим, цифровізація авіаційної галузі створює нові виклики: зростає кількість кібератак, спроб несанкціонованого втручання у навігаційні системи, а також ризики маніпуляцій з інформаційними потоками. Тому питання захищеності даних і достовірності інформації стають невід'ємною складовою загальної системи авіаційної безпеки [1].

У цьому контексті авіаційна безпека розглядається не лише як набір технічних стандартів, а як інформаційно-комунікаційна мережа глобальної взаємодії, де кожен суб'єкт від держави до оператора польотів несе відповідальність за своєчасність, точність і прозорість переданих даних. Саме такий підхід формує основу для розуміння авіаційної безпеки в умовах міжнародного інформаційного простору та відкриває можливості для впровадження інтелектуальних систем прогнозування ризиків. [1]

Безпека польотів визначається як стан, за якого ризики, пов'язані з авіаційною діяльністю чи безпосередньою експлуатацією повітряних суден, знижені та контролюються до прийняттого рівня.

З метою забезпечення високих стандартів безпеки у цивільній авіації Кенійське управління цивільної авіації (КСАА) створило Офіс державної програми авіаційної безпеки (SSP Office). Його завдання полягає у розробці, впровадженні та постійному вдосконаленні стратегій і процедур, що

гарантують досягнення найвищих показників безпеки відповідно до національних і міжнародних норм [2].

В Україні фундаментальним нормативним актом, що встановлює правові засади авіаційної діяльності, є Повітряний кодекс України (Закон України від 19.05.2011 № 3393-VI) [3]. Повітряний кодекс визначає основні терміни, правовий статус суб'єктів авіації, порядок регулювання повітряного простору, а також механізми забезпечення безпеки польотів і захисту від актів незаконного втручання [4].

Кодекс містить спеціальні положення, що безпосередньо стосуються організації авіаційної безпеки. Так, стаття 85 «Організація забезпечення авіаційної безпеки» визначає обов'язки суб'єктів авіаційної діяльності, зокрема експлуатантів, авіаційних служб і операторів, проводити заходи безпеки на стоянках, базах і під час польотів, а також встановлює вимоги до дотримання режиму в контрольованих зонах [5]. Стаття 82 «Забезпечення безпеки польотів повітряних суден» покладає пряму відповідальність за дотримання норм безпеки на експлуатантів, аеропорти, служби повітряного руху та інші організації, які забезпечують авіаційну діяльність [6]. Стаття 71 «Організація авіаційної безпеки» розглядає безпеку як комплекс заходів, що охоплює людські й матеріальні ресурси, спрямовані на захист цивільної авіації від актів незаконного втручання [7].

Крім Повітряного кодексу, регулювання використання повітряного простору України здійснюється на основі Постанови Кабінету Міністрів України № 954 від 06.12.2017 р. «Про затвердження Положення про використання повітряного простору України», яка встановлює порядок його використання з урахуванням вимог національної безпеки, оборони та економічних інтересів держави. Також функціонують авіаційні правила та нормативні акти, затверджені Державною авіаційною службою України, що деталізують процедури сертифікації, державного контролю, технічного обслуговування й організаційних заходів безпеки у цивільній авіації [8].

У редакції Повітряного кодексу від 15 листопада 2024 року авіаційна безпека визначається як «захист цивільної авіації від актів незаконного втручання, який забезпечується комплексом заходів із залученням людських і

матеріальних ресурсів. Це визначення розширює міжнародне розуміння безпеки (aviation safety), доповнюючи його акцентом на захист від протиправних дій (aviation security) - не лише технічних чи організаційних ризиків, а й загроз терористичного чи інформаційного характеру. Законодавство України також передбачає обов'язкову перевірку осіб, що працюють у зонах обмеженого доступу аеропортів чи на стратегічних об'єктах, до отримання ними права доступу [3].

Національна нормативна база України узгоджена з міжнародними стандартами ІКАО, зокрема з положеннями Annex 19 – Safety Management (Управління безпекою), який визначає глобальні рамки для систем управління безпекою польотів (SMS та SSP) і підкреслює роль держав у впровадженні ризик-орієнтованого нагляду. Відповідно до вимог ІКАО, кожна держава-член повинна розробити Державну програму авіаційної безпеки (State Safety Programme - SSP) та забезпечити нагляд за впровадженням систем управління безпекою (Safety Management Systems - SMS) у діяльності операторів. [9] Згідно з Повітряним Кодексом України, Україна адаптувала ці положення через національні нормативно-правові акти, що визначають повноваження Державіаслужби та авіаційних операторів у сфері забезпечення безпеки польотів.

Отже, міжнародно-правові засади авіаційної безпеки базуються на універсальних договорах, стандартах ІКАО та регіональних ініціативах, що утворюють комплексну систему правового регулювання. Її ефективність забезпечується завдяки інформаційному обміну між державами, розвитку аналітичних механізмів управління ризиками та інтеграції національних програм безпеки до глобальної авіаційної мережі. Українська система авіаційної безпеки побудована на принципах міжнародного права та інтегрована у глобальні механізми управління ризиками, поєднуючи правові, організаційні й інформаційно-аналітичні інструменти для досягнення високих стандартів безпеки польотів.

## **1.2. Основні фактори виникнення авіаційних катастроф: технічні, людські, організаційні та природні**

Повітряний транспорт посідає провідне місце серед сучасних видів транспорту, особливо для перевезення пасажирів на значні відстані. Попри поширений страх перед перельотами, авіація вважається одним із найбезпечніших способів пересування у світі, що підтверджується низьким рівнем аварійності у порівнянні з автомобільним транспортом. Водночас, навіть за мінімальної імовірності виникнення авіаційної катастрофи, наслідки таких подій мають набагато серйозніший характер: кількість жертв і масштаб руйнувань зазвичай значно перевищують аналогічні показники в інших видах транспорту. Така специфіка обумовлює підвищену увагу міжнародної спільноти до питань авіаційної безпеки та управління ризиками у сфері цивільної авіації [14].

Авіаційні катастрофи можуть бути спричинені широким спектром факторів, тому визначення їхніх причин потребує глибокого аналізу та ретельного розслідування. Для встановлення обставин події використовується комплексна інформація: дані про траєкторію польоту, записи переговорів із диспетчерськими службами, а також параметри польоту, зафіксовані бортовими самописцями, які часто можна відновити навіть після аварії. Надзвичайно важливо здійснювати оперативний збір таких даних одразу після інциденту, оскільки частина інформації може зберігатися обмежений проміжок часу. З огляду на це, у міжнародній практиці до процесу збору доказів залучаються спеціалісти з авіаційного права та технічні експерти, які забезпечують комплексний підхід до аналізу причин авіаційних катастроф і визначення відповідальності учасників авіаційного процесу [15].

З середини ХХ століття рівень смертельних авіаційних катастроф у світі істотно знизився, що є результатом удосконалення технологій, посилення контролю за дотриманням стандартів безпеки та впровадження систем управління ризиками. За статистикою Міжнародної асоціації повітряного транспорту (IATA), у 2023 році показник аварійності становив лише 0,80 на мільйон польотів, що є найнижчим значенням за всю історію спостережень.

Попри те, що кожна авіакатастрофа має широкий суспільний резонанс, загальна тенденція свідчить: авіація залишається найбезпечнішим видом транспорту. Відповідно до даних Національної ради з безпеки США (NSC), імовірність загибелі людини в автотранспортній пригоді становить 1 до 93, тоді як ризик стати жертвою авіаційної катастрофи дорівнює лише 1 до 188 364. Таким чином, найбільшу небезпеку для пасажирів становить не сам політ, а шлях до аеропорту [16].

У щорічному звіті IATA за 2023 рік наголошується, що на кожні 1,26 мільйона рейсів припадає лише одна фатальна подія, що є свідченням високої ефективності міжнародних програм безпеки польотів. Проте навіть за такого рівня надійності аналіз кожного інциденту залишається надзвичайно важливим саме розуміння причин поодиноких катастроф дозволяє своєчасно виявляти недоліки системи, підвищувати рівень авіаційної безпеки та вдосконалювати глобальні нормативні механізми контролю [17].

Згідно з аналітичними дослідженнями компанії Boeing, проведеними за період 1959-2022 років, переважна більшість авіаційних катастроф пов'язана з людським фактором. Статистика свідчить, що до 80% усіх авіаційних подій із фатальними наслідками тією чи іншою мірою зумовлені помилками людини - як членів екіпажу, так і наземного персоналу.

У структурі причин катастроф, наведеної у звіті Boeing, домінує діяльність екіпажу, на яку припадає 56% випадків. Технічні несправності становлять 21%, несприятливі метеорологічні умови - 11%, саботаж або умисні дії - 9%, а інші чинники, включно з помилками наземних служб, - 3%.

Особливо уразливими з погляду безпеки залишаються початкова та кінцева фази польоту. Так, на етап зльоту та набору висоти припадає близько 20% фатальних інцидентів, тоді як підхід до посадки та сама посадка становлять майже половину - 47% усіх катастроф. Така закономірність пояснюється підвищеним навантаженням на екіпаж, складністю маневрів, мінімальним запасом часу для реагування на відмову систем або зовнішні чинники.

Отримані дані підтверджують, що, незважаючи на значний технологічний прогрес у сфері авіаційної безпеки, людський чинник

залишається ключовим елементом ризику, що вимагає вдосконалення систем підготовки персоналу, автоматизації процесів та використання штучного інтелекту для запобігання критичним ситуаціям у режимі реального часу. [18]

Технічні та технологічні чинники залишаються одними з ключових у структурі причин авіаційних інцидентів, оскільки навіть незначна несправність у складній системі повітряного судна може призвести до фатальних наслідків. Сучасний літак є багаторівневою технічною системою, у якій тисячі компонентів працюють у взаємозв'язку, тому відмова будь-якого з них здатна викликати ефект каскадного збою. За даними Federal Aviation Administration (FAA) та Boeing Statistical Summary of Commercial Jet Airplane Accidents, технічні та технологічні несправності становлять від 15 до 25 відсотків усіх зафіксованих випадків авіаційних подій, що свідчить про їхню постійну присутність у загальній структурі ризиків авіаційної галузі [19].

Серед основних причин технічного характеру домінують відмови двигунів і паливних систем, конструкційні дефекти, корозія або втомне руйнування матеріалів. Такі збої часто виникають через тривалу експлуатацію літаків, недотримання регламентів технічного обслуговування або приховані дефекти, виявлення яких у звичайних умовах є вкрай складним. Відомим прикладом є інцидент з літаком British Airways Flight 38 (2008), коли обидва двигуни втратили тягу під час заходу на посадку через обмерзання палива у теплообмінниках, що призвело до часткової втрати контролю над літаком. Подібні випадки демонструють, що навіть сучасні системи резервування не завжди здатні компенсувати сукупність технічних чинників, які діють одночасно [20].

Важливе місце серед технологічних причин посідають відмови у системах навігації, електроніки та автоматизованого керування польотом. Помилки у програмному забезпеченні, збій сенсорів або конфлікт між взаємопов'язаними підсистемами можуть створити хибну картину для екіпажу або спричинити некоректне реагування систем автопілота. Так, під час розслідування катастрофи Swissair Flight 111 (1998) було встановлено, що загоряння електричних проводів у зоні кабіни екіпажу призвело до відмови систем навігації та швидкого поширення пожежі, яку неможливо було

локалізувати. Цей випадок показав, наскільки небезпечними можуть бути навіть локальні технологічні порушення у складній електронній архітектурі літака.

Крім того, значну роль у виникненні технічних відмов відіграють людські помилки під час технічного обслуговування - неправильний монтаж елементів, недотримання технічних допусків або використання несертифікованих деталей. У міжнародній практиці такі ситуації класифікуються як maintenance-induced failures, що підкреслює тісний зв'язок між технічними та організаційними аспектами авіаційної безпеки.

З метою зменшення кількості інцидентів, спричинених технічними відмовами, у світовій авіаційній практиці активно впроваджуються системи моніторингу стану літака в реальному часі (Aircraft Health Monitoring Systems, AHMS). Вони забезпечують збір, аналіз і зберігання технічних даних з тисяч сенсорів, що дозволяє своєчасно виявляти відхилення в роботі вузлів і агрегатів. Використання штучного інтелекту в межах таких систем робить можливим прогнозування потенційних відмов задовго до їх фактичного прояву, що, у свою чергу, дозволяє мінімізувати ризики для екіпажу та пасажирів [21].

Таким чином, технічні та технологічні причини інцидентів виступають складною комбінацією інженерних, програмних та експлуатаційних чинників. Вони потребують комплексного підходу до аналізу, який включає як контроль за технічним станом літальних апаратів, так і впровадження інформаційно-аналітичних технологій прогнозування. Розвиток таких підходів є одним із ключових напрямів підвищення рівня авіаційної безпеки у світі та запорукою створення ефективних систем управління ризиками в міжнародному повітряному просторі.

У структурі авіаційної безпеки людський фактор посідає центральне місце, оскільки саме діяльність людини залишається визначальним елементом у забезпеченні надійності системи польотів. Незважаючи на автоматизацію та цифровізацію авіаційної галузі, людина залишається головною ланкою між технічними процесами, управлінськими рішеннями та динамічним середовищем польотної діяльності. За оцінками Міжнародної організації цивільної авіації (ІКАО), понад 70% усіх авіаційних подій і катастроф прямо

або опосередковано пов'язані з людським чинником, що робить його одним із найвагоміших елементів системи ризиків у сучасній авіації.

Під поняттям «людський фактор» у контексті авіаційної безпеки розуміють сукупність психологічних, фізіологічних, когнітивних і поведінкових характеристик авіаційного персоналу, які впливають на ефективність виконання професійних завдань. До таких чинників належать увага, стресостійкість, рівень підготовки, здатність до командної взаємодії, сприйняття інформації, швидкість прийняття рішень і ступінь втоми. Саме поєднання цих елементів визначає здатність екіпажу або диспетчерів ефективно реагувати на позаштатні ситуації, приймати правильні рішення та уникати критичних помилок [22].

Одним із ключових прикладів впливу людського чинника є катастрофа рейсу Air France 447 (2009) над Атлантичним океаном. Розслідування показало, що екіпаж неправильно інтерпретував показники приладів під час турбулентності, внаслідок чого літак увійшов у неконтрольоване зниження. Цей інцидент продемонстрував, що навіть високий рівень технічного оснащення не гарантує безпеки за відсутності адекватної психологічної підготовки екіпажу до стресових ситуацій

Психофізіологічний аспект людського фактора полягає в тому, що авіаційна діяльність потребує постійної концентрації уваги, швидкої реакції, а також вміння зберігати самоконтроль у критичних умовах. Вплив втоми, недосипання, зміни часових поясів, емоційного перенапруження або монотонності роботи часто знижує ефективність дій персоналу. За результатами дослідження FAA Human Factors Division (2022), близько 40% авіаційних інцидентів пов'язані з фізичною або когнітивною втомою екіпажу. Особливо небезпечним є зниження пильності під час нічних рейсів і довготривалих трансатлантичних польотів [23].

Вагоме значення має також організаційний аспект людського чинника. Недосконала комунікація між екіпажами, низький рівень взаєморозуміння між пілотами та диспетчерами, недостатній контроль з боку керівництва авіакомпаній щодо культури безпеки - усе це створює умови для виникнення помилок. Прикладом є катастрофа на Тенеріфе (1977), що стала наслідком

неправильного тлумачення інструкцій диспетчера та поспішних рішень екіпажу, в результаті чого зіткнулися два літаки, загинуло понад 580 осіб. Це довело критичну важливість розвитку комунікативної культури та колективного управління ризиками в авіації.

Для зниження впливу людського чинника у світовій практиці активно впроваджуються спеціалізовані системи управління поведінковими ризиками. Найпоширенішими є програми Crew Resource Management (CRM), спрямовані на вдосконалення взаємодії в екіпажі, розподіл відповідальності та підвищення ситуаційної обізнаності. Додатково застосовується методологія Threat and Error Management (TEM), що передбачає виявлення потенційних загроз, їх нейтралізацію та мінімізацію наслідків помилок. Також дедалі більшого поширення набувають Fatigue Risk Management Systems (FRMS), які дозволяють аналізувати робочі цикли екіпажів, відстежувати рівень втоми та адаптувати графіки польотів відповідно до біоритмів людини [24].

На сучасному етапі розвитку авіаційної галузі спостерігається тенденція інтеграції технологій штучного інтелекту у моніторинг людського чинника. Алгоритми машинного навчання застосовуються для аналізу поведінкових патернів пілотів, оцінки реакції на стресові ситуації, виявлення емоційного напруження або когнітивних відхилень під час тренувань. У Європейському Союзі вже тестуються системи AI-based Pilot Monitoring, здатні визначати рівень навантаження екіпажу за допомогою біометричних датчиків і відеоаналізу. Такі технології дозволяють запровадити новий рівень профілактики помилок, забезпечуючи підтримку рішень у реальному часі.

В українській практиці управління людським фактором здійснюється на основі гармонізації з міжнародними нормами ІКАО та EASA. Зокрема, Державіаслужба України вимагає від авіаперевізників обов'язкового впровадження програм CRM, TEM і FRMS у процесі підготовки льотного складу, а також систематичної психологічної оцінки персоналу. Такі заходи спрямовані на формування культури безпеки, у якій кожен член авіаційної організації усвідомлює свою відповідальність за збереження життя пасажирів і стабільність авіаційного процесу [25].

Отже, людський фактор залишається найуразливішим, але водночас

найгнучкішим елементом авіаційної системи. Його ефективне управління вимагає поєднання технологічних, організаційних і психологічних підходів, що базуються на системному аналізі поведінки, постійному навчанні персоналу та розвитку культури безпеки. У перспективі застосування штучного інтелекту в управлінні людським фактором відкриває нові можливості для підвищення надійності авіаційних систем, перетворюючи людський досвід і технологічну підтримку на єдиний механізм попередження ризиків.

Організаційні чинники та зовнішнє середовище мають вагомий вплив на рівень авіаційної безпеки, формуючи умови, в яких функціонує вся авіаційна система. Вони визначають ефективність управління ризиками, координацію між підрозділами, рівень підготовки персоналу та оперативність реагування на надзвичайні ситуації. Недостатня організованість процесів, слабка взаємодія між структурними елементами авіаційної галузі та відсутність культури безпеки можуть стати непрямими, але критичними причинами авіаційних катастроф.

Згідно з аналітичними звітами Міжнародної організації цивільної авіації (ІКАО), близько 10-15% усіх авіаційних інцидентів спричинені організаційними недоліками, які охоплюють неправильне планування, неефективний розподіл обов'язків, дефіцит координації між операторами та регулятором, а також недостатнє інвестування у безпекові технології. Найбільш поширеними організаційними помилками є недосконалість системи контролю за дотриманням процедур, застарілі інструкції з експлуатації, недостатній рівень навчання персоналу та формальний підхід до сертифікації повітряних суден.

Організаційні ризики можуть виникати як на рівні авіакомпаній, так і на державному рівні. Неефективне управління ресурсами, відсутність постійного моніторингу технічного стану літаків, недостатній контроль за льотною придатністю або перевантаженість диспетчерських служб призводять до накопичення системних помилок. Прикладом такого явища є катастрофа Spanair Flight 5022 (2008) в Іспанії, коли внаслідок невиконання контрольного списку перед зльотом та відсутності належного контролю з боку інженерної служби злетів літак із неправильно виставленими закрилками. Розслідування

показало, що проблеми були не лише в екіпажі, а й у загальній організації системи технічного контролю та підготовки персоналу [26].

Суттєвий вплив на безпеку польотів справляє зовнішнє середовище, під яким розуміють природні, економічні, політичні та соціальні умови, що формують контекст функціонування авіаційної галузі. До природних чинників належать погодні умови, кліматичні зміни, вплив атмосферних явищ, наприклад, обледеніння, сильні грози, турбулентність або попільні хмари після вулканічних вивержень. Так, у 2010 році через виверження вулкану Ейяф'ятлайокудль (Ісландія) було скасовано понад 100 000 рейсів у Європі, що засвідчило масштабність екологічних ризиків для авіації [27].

Водночас зовнішнє середовище включає й геополітичні та економічні фактори, які безпосередньо впливають на операційну діяльність перевізників. Збройні конфлікти, санкційні обмеження, закриття повітряного простору або дефіцит авіаційного пального можуть істотно змінювати маршрути, збільшувати тривалість польотів і створювати додаткові навантаження на екіпажі. Прикладом є зміни у міжнародній авіаційній логістиці після 2022 року, коли низка держав закрила свій повітряний простір для окремих країн, що призвело до перерозподілу повітряних потоків і підвищення витрат авіакомпаній.

На рівні управління безпекою надзвичайно важливо враховувати взаємозв'язок між організаційними недоліками та зовнішніми впливами. Низький рівень внутрішнього контролю, відсутність гнучких протоколів адаптації до змін середовища або слабка координація між службами безпеки можуть значно посилювати негативний ефект від зовнішніх факторів. Саме тому міжнародна практика передбачає створення державних програм управління безпекою (State Safety Programme, SSP), які поєднують технічні, людські, організаційні та середовищні аспекти у єдину систему моніторингу ризиків [28].

За період незалежності Україна демонструє дуже низький рівень аварійності у цивільній авіації, особливо в сегменті регулярних пасажирських перевезень. За даними міжнародних реєстрів авіаційних подій та аналітичних звітів, у 1991–2022 рр. в українському цивільному авіаційному секторі було

зафіксовано близько 15–18 фатальних катастроф. При цьому лише мала частина цих подій стосувалася регулярних пасажирських рейсів українських авіакомпаній. Більшість випадків припадали на чартерні, вантажні та технічні рейси, що характерно для держав з невеликим авіапарком та обмеженою кількістю комерційних операторів.

Такий показник свідчить про те, що українська цивільна авіація впродовж тривалого часу дотримувалась міжнародних стандартів ІСАО та мала стійко низький рівень ризику у сфері регулярних авіаперевезень. Зокрема, остання фатальна катастрофа регулярного пасажирського рейсу української компанії сталася ще у 2002 році, тоді як подальші інциденти були переважно пов'язані з експлуатацією транспортних або допоміжних літаків в умовах підвищеного технічного та операційного навантаження.

Табл1.2.1.

Орієнтовний перелік фатальних авіакатастроф у цивільній авіації України (1991–2022)

№	Рік	Тип ПС	Оператор / Рейс	Характер рейсу	Короткий опис події	Загиблі
1	1992	Ан-26	Аерофлот / техн. рейс	Технічний	Падіння під Львовом	8
2	1995	Ан-24	Аеросвіт	Пасажирський чартер	Катастрофа біля Афін	60+
3	1997	Ан-24	Аеросвіт 241	Пасажирський	Падіння в горах Каламата	70
4	2002	Ан-140	Аеросвіт / техн.	Технічний (фери-флайт)	Катастрофа під Ісфаганом	46
5	2003	Ан-26	Укр. екіпаж (Конго)	Вантажний	Падіння при заході на посадку	7
6	2004	Ан-12	Укр. вантажний оператор	Вантажний	Пожежа на борту, падіння	7
7	2007	Ан-26	ПБЛ Україна	Вантажний	Зіткнення із землею	2
8	2009	Ан-12	AeroRent Ukraine	Вантажний	Падіння поблизу Карфагену	6

9	2011	Як-42	Як Сервіс	Пасажирський чартер	Катастрофа під Ярославлем («Локомотив»)	44
10	2012	Ан-28	СЦ «Южмашавіа»	Технічний	Катастрофа в ДР Конго	4
11	2014	Ан-26	Україн. оператор (Конго)	Вантажний	Падіння при посадці	8
12	2017	Ан-26	Constanta Airline	Транспортний	Катастрофа в Сирії (цивільний контракт)	32
13	2019	Ан-12	Ukraine Air Alliance	Вантажний	Падіння біля Львова	5
14	2020	Ан-12	Savok Air	Вантажний	Відмова під час посадки	5
15	2021	Ан-26	Технічна експлуатація	Технічний	Відмова двигуна, катастрофа	3
16	Інші (1991–2022)	Ан-26, Ан-12, Як-40	Українські оператори	Техн./вантажні	Малі групи інцидентів	1–5 кожний

Джерело: розроблено на основі [72, 73]

Табл.1.2.2

### Орієнтовний розподіл причин авіакатастроф у світі

Група факторів	Орієнтовна частка, %	Що саме мається на увазі (приклади)
Людський фактор	≈ 60–65 %	Помилки екіпажу (неправильне керування, порушення SOP, помилки в прийнятті рішень, просторове дезорієнтування, недооцінка метеоумов), втома, неефективна CRM.
Технічні фактори	≈ 20 %	Конструкторські недоліки ПС, відмови двигунів і систем (гідросистема, електрика, паливна, авіоніка), помилки в техобслуговуванні, приховані дефекти, втомні тріщини, некоректний ремонт.

<b>Організаційні фактори</b>	<b>≈ 10–12 %</b>	Недоліки в роботі авіакомпаній та аеронавігаційних служб: слабкий контроль за підготовкою пілотів, дефіцит тренувань, порушення процедур SMS, помилки/перевантаження в ОПР, тиск менеджменту «летіти за будь-яку ціну».
<b>Природні (метео) фактори</b>	<b>≈ 8–10 %</b>	Сильні грози, обледеніння, вітер із зсувом (windshear), туман з малою видимістю, попіл вулканів, турбулентність на малих висотах, інші екстремальні метеоявища.

Джерело: розроблено на основі [74]

Таким чином, організаційні недоліки та зовнішні чинники становлять складну взаємопов'язану систему, у якій кожен елемент впливає на загальний рівень авіаційної безпеки. Усунення цих недоліків можливе лише за умови інтеграції управлінських і технологічних рішень, розвитку культури безпеки, регулярного аудиту процедур та підвищення стійкості авіаційних структур до зовнішніх впливів. Формування адаптивної системи управління, здатної прогнозувати наслідки змін зовнішнього середовища, є ключовим напрямом розвитку міжнародної авіаційної безпеки у XXI столітті.

### **1.3. Роль штучного інтелекту в управлінні ризиками та підвищенні безпеки польотів**

Штучний інтелект (ШІ) докорінно змінює авіаційну сферу, підвищуючи ефективність і безпеку всіх етапів авіаційних операцій, від управління повітряним рухом до технічного обслуговування літаків. Його ключова перевага полягає у здатності швидко обробляти великі обсяги даних із різних джерел, а саме метеорологічних систем, планів польотів, даних сенсорів і технічних звітів. Аналізуючи ці дані, ШІ може виявляти закономірності, прогнозувати затори в повітряному просторі, оптимізувати маршрути та своєчасно ідентифікувати потенційні ризики, що значно підвищує рівень безпеки польотів і ефективність використання авіаційної інфраструктури [29].

Крім традиційних сфер застосування, штучний інтелект стає рушійною силою розвитку нових форм повітряної мобільності - передової (ААМ) та

міської (UAM). Водночас це створює нові виклики для інтеграції автоматизованих систем у повітряний простір і потребує переосмислення взаємодії між людиною та машиною. Надмірна автоматизація може вплинути на ситуаційну обізнаність операторів і поставити етичні питання щодо прийняття рішень у критичних ситуаціях. Саме тому важливо забезпечити збалансоване впровадження ШІ з урахуванням технічних, етичних і навчальних аспектів.

У межах сучасних підходів пропонується інтеграція технологій штучного інтелекту в системи управління повітряним рухом (ATM) та розроблення концепції AI/CNS/ATM, спрямованої на цифрову трансформацію аеронавігації. Це передбачає використання вже досягнутих результатів і стимулювання подальших інновацій, що забезпечать підвищення безпеки польотів, ефективність обслуговування та сталий розвиток авіаційної галузі [30].

Аналіз управління ризиками у сфері авіаційної безпеки може здійснюватися з трьох основних перспектив: управлінської, навчальної та технічної.

З управлінської точки зору, ключові сценарії охоплюють використання великих моделей штучного інтелекту для підтримки процесів прийняття рішень, а також комплексний моніторинг і оцінювання стану безпеки повітряних суден. Такі моделі сприяють підвищенню точності управлінських рішень завдяки глибокому аналізу великих масивів даних та інтерактивній взаємодії між системами і персоналом. Застосування діалогових модулів у межах великих моделей дає змогу забезпечити ефективну взаємодію між користувачем і системою, слугуючи своєрідним «інтелектуальним ядром» управлінського процесу. Це підвищує оперативність отримання релевантних даних, точність консультацій із безпеки та загальну ефективність ухвалення рішень [31].

У сфері підготовки персоналу типові сценарії включають створення профілів ризику для пілотів, відпрацювання дій у надзвичайних ситуаціях, розроблення мобільних додатків для тренування, прогнозування витрат палива, контроль низьковисотних польотів, моніторинг польотних сцен і оптимізацію графіків, а також аналіз і діагностику параметрів польоту. Такі підходи

сприяють підвищенню рівня ситуаційної обізнаності, швидкості реагування та здатності екіпажу приймати обґрунтовані рішення в умовах ризику.

З технічного погляду, сучасні інструменти включають використання цифрових двійників для створення реалістичних навчальних середовищ і проведення аналітичних оцінок на основі даних. Об'єднання інформації з різних джерел: систем моніторингу параметрів літаків, двигунів, неруйнівного контролю, польотних реєстраторів і зовнішніх центрів керування - забезпечує можливість багатовимірного аналізу в режимі реального часу. Завдяки технологіям великих даних і хмарним обчисленням здійснюється інтеграція та обробка багатоджерельної інформації, що дозволяє комплексно відстежувати технічний стан повітряних суден, прогнозувати відмови систем і підвищувати рівень авіаційної безпеки [32].

Комплексна система моніторингу та оцінювання стану безпеки повітряних суден базується на інтегрованому аналізі багатоджерельних гетерогенних даних. Такий підхід дозволяє здійснювати детальне виявлення відхилень, аналіз їхніх взаємозв'язків та тенденцій, що суттєво підвищує точність діагностики технічного стану літальних апаратів. Завдяки цьому формується повна оцінка рівня справності та льотної придатності повітряного судна. Отримані результати надають можливість підрозділам технічного забезпечення проводити всебічну оцінку стану техніки та визначати найкращі зразки, що відповідають стандартам льотної придатності.

Система ризик-профілю пілота (Pilot Risk Portrait System) базується на технологіях аналізу, добування та візуалізації даних і спрямована на вдосконалення методів оцінювання ризиків, пов'язаних із людським фактором у процесі польотів. Використання цієї системи дає змогу різним підрозділам авіаційної безпеки здійснювати комплексний перегляд польотних даних, визначати ключові ризики та контролювати їх. Регулярна обробка та фільтрація даних підвищують точність управлінських рішень, спрямованих на зниження ризиків. Крім того, інформація, отримана за допомогою цієї системи, може бути використана як основа для оцінювання якості підготовки пілотів та побудови системи управління їхнім життєвим циклом [33].

Щодо реагування на надзвичайні ситуації, нинішні методи підготовки

часто мають обмеження, адже базуються на стандартних гіпотетичних сценаріях. Реальні авіаційні умови характеризуються високою динамічністю, а тактика реагування може змінюватися залежно від типу літака, особливостей аеропорту, сезону чи погодних умов. Тому підвищення ефективності реагування можливе завдяки впровадженню технологій цифрової симуляції - віртуальної реальності та цифрових двійників, які дозволяють моделювати складні сценарії, проводити повномасштабні тренування та розробляти цільові навчальні програми для конкретних типів надзвичайних ситуацій. Це сприяє формуванню гнучких навичок дій екіпажу та підвищує їхню готовність до реагування в умовах ризику.

Крім того, мобільні застосунки для управління польотними завданнями відіграють важливу роль у підвищенні ефективності передавання, обробки та візуалізації даних. Вони полегшують доступ до інформації щодо безпеки польотів, комунікації між підрозділами, контролю навчальних процесів і моніторингу ризиків під час підготовки та виконання польотів. Використання мобільних технологій забезпечує швидке збирання, обмін і відображення даних у реальному часі, що сприяє своєчасному ухваленню рішень та підвищенню рівня безпеки польотів.

Точне прогнозування споживання палива є ключовим елементом ефективного планування польотів, оскільки воно визначає такі параметри, як дальність польоту, тривалість перебування у повітрі та оптимальні режими роботи двигунів. Сучасні методи розрахунку мають обмежену точність і не враховують у повному обсязі всі чинники, що впливають на споживання палива. Тому актуальним є впровадження інтелектуальних технологій, зокрема алгоритмів машинного навчання, які дозволяють здійснювати комплексний аналіз кореляцій між численними змінними - метеоумовами, технічним станом літака, маршрутом польоту та навантаженням. Застосування таких моделей підвищує точність прогнозів і забезпечує більш ефективне планування місій, дозволяючи пілотам та диспетчерам ухвалювати обґрунтовані рішення щодо оптимального використання пального [34].

Польоти на висоті менше ніж 100 метрів над рівнем землі належать до найбільш ризикованих типів авіаційних операцій через складність навігації,

вплив мінливих погодних умов і підвищену ймовірність зіткнення з перешкодами. Для безпечного виконання таких місій необхідне поєднання високої кваліфікації пілота з використанням технологій штучного інтелекту. Алгоритми машинного навчання та генеративні моделі дають змогу прогнозувати короткострокові зміни умов польоту, розпізнавати потенційні небезпеки й оптимізувати траєкторії руху. Завдяки цьому забезпечується створення безпечних повітряних коридорів і своєчасне ухилення від перешкод. Інтеграція таких технологій у систему управління польотами сприяє підвищенню точності планування маршрутів і зниженню рівня ризику при виконанні надмаловисотних операцій.

Етап посадки літака є одним із найкритичніших у контексті забезпечення авіаційної безпеки. Ефективне управління цим процесом потребує безперервного моніторингу наземної обстановки та своєчасного реагування з боку пілотів і диспетчерів. Інтеграція радіолокаційних і візуальних систем спостереження за допомогою технології злиття радарно візуальних даних (radar-vision fusion) забезпечує єдиний аналітичний простір, у якому штучний інтелект синтезує зображення та сигнали з різних сенсорів. Такий підхід дозволяє отримувати високоточні моделі ситуаційної обстановки в реальному часі, що підвищує якість прийняття рішень при керуванні посадкою. Для диспетчерів і пілотів це означає кращу візуалізацію даних, підвищену надійність навігаційних рішень і зменшення ризиків при завершальних етапах польоту [35].

Безпека конструкції літака є одним із ключових напрямів управління ризиками в авіації. Особливу увагу приділяють контролю параметрів роботи двигунів, зокрема стану роторних компонентів, які піддаються значним навантаженням під час польоту. Постійний моніторинг показників експлуатації, рівня зношення деталей та аналіз потенційних відмов дозволяє своєчасно виявляти тенденції до погіршення технічного стану й попереджати критичні ситуації. Застосування методів глибинного навчання забезпечує глибоку аналітичну обробку великих масивів даних, виявлення взаємозв'язків між технічними параметрами та прогнозування ймовірності виникнення несправностей. Завдяки цьому значно підвищується точність діагностики, а

також ефективність технічного обслуговування. Отримані результати дають змогу інженерно-технічному персоналу оперативно оцінювати стан компонентів, планувати заміну деталей і здійснювати превентивні заходи для підтримання належного рівня безпеки польотів.

Система підготовки пілотів, диспетчерів та наземного персоналу традиційно базується на поєднанні теоретичного навчання, комп'ютерних симуляцій, тренажерних занять і практичних польотів. Проте практичні навчання є ресурсомісткими, потребують ретельної організації та несуть певні ризики. У цьому контексті технологія «цифрового двійника» (Digital Twin) виступає інноваційним інструментом, який дозволяє створювати віртуальні моделі авіаційних систем, максимально наближені до реальних умов експлуатації. Такий підхід, заснований на принципах інженерії модельно-орієнтованих систем, забезпечує високий рівень деталізації тренувального середовища та дозволяє відтворювати динаміку реальних польотних ситуацій.

Оптимізація рівня складності моделей залежно від впливу зовнішніх факторів і специфіки польотних завдань дає можливість досягати максимального ефекту навчання, зменшуючи при цьому витрати часу та ресурсів. Використання цифрових двійників сприяє підвищенню якості професійної підготовки персоналу та забезпечує більш точну і безпечну відпрацювання дій у складних або нестандартних умовах [36].

## **РОЗДІЛ 2. ІНФОРМАЦІЙНО-АНАЛІТИЧНИЙ ПІДХІД ДО ПРОГНОЗУВАННЯ РИЗИКІВ АВІАЦІЙНИХ КАТАСТРОФ**

### **2.1. Концепція інформаційного моніторингу авіаційної безпеки**

Формування інформаційних потоків у міжнародній авіації ґрунтується на багаторівневій системі збору, передачі та обробки даних, що походять із різних технічних, організаційних і нормативних джерел. Ця система забезпечує безперервність комунікації між повітряними суднами, наземними службами, авіакомпаніями, державними регуляторами та міжнародними структурами. Кожен тип джерел відіграє специфічну роль у забезпеченні безпеки польотів, управлінні ризиками та координації роботи глобальної авіаційної мережі.

Першим і найбільш фундаментальним джерелом інформації є бортові системи повітряних суден, що формують первинний потік оперативних і технічних даних. Сенсорні модулі літака забезпечують вимірювання параметрів роботи двигунів, змін навантаження, характеристик польоту та стану ключових систем. Реєстратори параметрів польоту (FDR) фіксують детальну інформацію про сотні експлуатаційних показників, створюючи базу для подальшого аналізу відхилень і неполадок. Системи ACARS та ADS-B забезпечують передачу телеметрії, координат і швидкісних параметрів у режимі реального часу, тоді як TCAS генерує дані щодо взаємного розташування повітряних суден і потенційно небезпечних зближень. У сукупності ці системи формують основний масив технічної інформації, що дозволяє оперативно контролювати стан літака та виявляти можливі ризики під час польоту [42].

Другим ключовим джерелом інформації виступає наземна інфраструктура, що забезпечує обслуговування польотів і моніторинг повітряного простору. Диспетчерські центри отримують і передають інформацію про маршрути, висоти, швидкості та зміну параметрів польоту, координуючи рух повітряних суден у просторі з високим рівнем навантаження. Метеорологічні служби формують критично важливі дані щодо погодних умов,

які можуть створювати загрози безпеці польотів: турбулентність, грози, зледеніння, шторми. Радіолокаційні станції здійснюють контроль за фактичним положенням літаків, забезпечуючи точну інформацію для розділення повітряних суден та коригування маршрутів. Завдяки цьому наземні служби формують потужний інформаційний контур підтримки польотів [43].

Третім елементом системи є корпоративні бази даних авіакомпаній, які акумулюють результати післяпольотного аналізу. Системи Flight Data Monitoring (FDM) обробляють інформацію з FDR з метою виявлення відхилень у поведінці судна та тенденцій, що можуть свідчити про підвищений ризик. Технічні бази даних містять інформацію про проведені огляди, ремонтні роботи, прогностичні відмови й інші технічні аспекти, що визначають стан флоту. Додатково формуються ризикові профілі екіпажів, що включають інформацію про рівень кваліфікації, досвід, поведінкові особливості в стресових ситуаціях та відхилення під час польотів. Завдяки цим базам даних авіакомпанії отримують можливість здійснювати внутрішній контроль безпеки та формувати індивідуальні ризикові карти для кожного рейсу [44].

Четверту групу джерел становлять державні бази даних, у яких акумулюється офіційна інформація про авіаційні події, серйозні інциденти та порушення експлуатаційних норм. До них входять реєстри інцидентів, нормативні каталоги технічних стандартів, вимог до сертифікації та експлуатації авіаційної техніки. Державні регулятори використовують ці дані для контролю відповідності авіакомпаній вимогам безпеки, аналізу тенденцій у національному повітряному просторі та розроблення нових регуляторних документів.

Завершальною складовою структури інформаційних потоків є міжнародні джерела, що забезпечують глобальний обмін даними між державами та авіаційними організаціями. ICAO формує комплексні стандарти та методичні матеріали, регулює обмін інформацією про безпеку польотів і координує роботу глобальних баз даних. EASA веде європейські системи звітності про інциденти, формує рекомендації та директиви для держав-членів. FAA адмініструє

американські платформи звітності й аналітики, які використовуються авіакомпаніями та виробниками авіатехніки. IATA збирає статистику інцидентів серед комерційних перевізників, тоді як Eurocontrol забезпечує централізований обмін оперативними даними повітряного руху у Європі. Спільно ці організації створюють глобальну мережу даних, що дозволяє формувати єдину інформаційну картину безпеки польотів у міжнародному авіаційному просторі.

Ефективне попередження авіаційних інцидентів у міжнародній практиці значною мірою залежить від здатності авіаційної системи своєчасно збирати, аналізувати та інтерпретувати дані з різноманітних джерел. Сучасна авіація функціонує у гіперінформаційному середовищі, де обсяг, швидкість і різноманітність даних формують основу превентивної моделі управління безпекою польотів. Роль даних у цьому процесі є визначальною, оскільки саме вони дозволяють виявляти закономірності, аномалії та ризикові тенденції, що часто є недоступними для традиційних методів технічного контролю.

Одним із ключових елементів інформаційної інфраструктури є відкриті джерела, що забезпечують доступ до значних масивів даних про інциденти, технічний стан авіаційного парку, метеорологічні показники, навантаження на повітряний простір та інші критичні параметри. Відкриті системи ADS-B, ACARS-телеметрія, глобальні бази інцидентів, аналітичні панелі EASA та ICAO, а також платформи обміну оперативною інформацією формують багатовимірне інформаційне середовище, яке використовується для оцінки поточних і потенційних ризиків [47].

Особливе значення мають бази даних про авіаційні події та серйозні інциденти, зокрема ECCAIRS, ASIAs, IATA GADM та ICAO iSTARS. Їх використання дозволяє виявляти повторювані типи відхилень, порівнювати національні та міжнародні тренди й аналізувати латентні загрози, які можуть накопичуватися у системі протягом тривалого часу. Доступність таких джерел є важливою передумовою прозорості та ефективності глобальної системи авіаційної безпеки, оскільки вони забезпечують стандартизований формат подання даних, що полегшує їхній аналіз та подальше застосування у моделях

прогнозування [45].

Відкриті метеорологічні джерела відіграють окрему роль у попередженні інцидентів. Дані супутникового моніторингу, погодні карти, моделі атмосферної турбулентності та системи попередження про небезпечні явища дозволяють оперативно коригувати маршрути, забезпечуючи адаптивне управління безпекою польотів. В умовах інтенсивної зміни клімату та збільшення частоти екстремальних погодних явищ такі дані стають критично важливим елементом системи раннього попередження.

Важливою є й роль відкритої телеметрії у режимі реального часу. Потoki ADS-B дозволяють проводити моніторинг руху повітряних суден, виявляти відхилення від стандартних траєкторій, аналізувати поведінкові аномалії та попереджати потенційні конфліктні ситуації у повітряному просторі. Такі дані широко використовуються аналітичними центрами, науковими установами та операторами повітряного руху для побудови моделей оцінки ризику та підвищення рівня ситуаційної обізнаності [46].

Інтеграція відкритих джерел із внутрішніми корпоративними даними авіакомпаній забезпечує максимальний ефект превентивного аналізу. Поєднання інформації з FDR, FDM, технічних журналів, профілів екіпажів та відкритих міжнародних баз створює багаторівневу карту ризиків, яка дозволяє виявити слабкі місця в експлуатаційних процесах, технічному обслуговуванні чи організації повітряного руху. У результаті дані відкритих джерел стають не лише засобом документування авіаційних подій, а й інструментом формування прогностичних моделей, які дають змогу попередити інциденти до їх виникнення [47].

Система циркуляції інформації в міжнародній авіації побудована на взаємодії вертикальних і горизонтальних потоків даних, які забезпечують повноцінний обмін інформацією між усіма учасниками авіаційної діяльності. Ця структура дозволяє поєднати оперативну інформацію, що надходить безпосередньо з повітряного судна, з аналітичними та нормативними даними, які формуються на рівні держав та міжнародних організацій. Вертикальні

потоки забезпечують послідовну передачу інформації між підпорядкованими рівнями системи, тоді як горизонтальні канали підтримують взаємодію на рівних організаційних сегментах, сприяючи глобальній координації безпеки польотів.

Вертикальні інформаційні канали формують основну комунікаційну вісь авіаційної системи. Передача даних розпочинається на рівні екіпажу, який генерує первинні оперативні повідомлення про стан повітряного судна, технічні відхилення, погодні умови та інші фактори, що впливають на безпеку польоту. Ця інформація надходить до диспетчерських центрів управління повітряним рухом, де вона доповнюється радіолокаційними та метеорологічними даними. Наступним рівнем є авіакомпанія, яка агрегує ці дані з інформацією власних технічних систем, таких як Flight Data Monitoring або технічні реєстри обслуговування. Після внутрішньої обробки інформація передається до національного регулятора, який здійснює контроль відповідності нормам авіаційної безпеки, аналізує інциденти та формує державні звіти. Завершальним рівнем вертикального потоку є міжнародні організації, а саме ICAO, EASA, IATA, FAA, які акумулюють дані з різних країн та забезпечують глобальну стандартизацію інформаційних процесів. Таким чином, вертикальні канали забезпечують узгоджений рух даних від рівня конкретного рейсу до рівня міжнародної системи безпеки [48].

Горизонтальні інформаційні потоки виконують іншу функцію — вони забезпечують обмін даними між організаціями одного рівня, що дає змогу формувати спільні аналітичні платформи, узгоджувати стандарти та оперативно реагувати на глобальні ризики. Взаємодія між авіакомпаніями передбачає обмін технічними даними, досвідом щодо експлуатації повітряних суден, інформацією про інциденти чи повторювані відхилення. Такий обмін, зокрема в рамках програм типу IATA GADM або ASIAs, дозволяє формувати ширший спектр даних для аналізу ризиків.

На рівні державних регуляторів горизонтальний обмін забезпечує координацію між авіаційними адміністраціями різних країн, що сприяє

уніфікації методик розслідування інцидентів, гармонізації стандартів і взаємному визнанню сертифікаційних вимог. Інформаційна взаємодія між технічними центрами, зокрема виробниками авіаційної техніки, включає передачу даних про технічні відмови, оновлення програмного забезпечення, результати діагностики та рекомендації щодо технічного обслуговування. Важливу роль відіграють і глобальні системи даних, такі як ECCAIRS, iSTARS або Eurocontrol Network Manager, які забезпечують доступ до централізованих інформаційних масивів і підтримують аналітичні процеси в міжнародній авіаційній системі [49].

Завдяки взаємодії вертикальних і горизонтальних потоків формується цілісна, багаторівнева система управління інформацією, яка забезпечує прозорість, стандартизованість та оперативність обміну даними. Такий підхід дає змогу ефективно використовувати інформаційні ресурси для прогнозування ризиків, попередження інцидентів та підтримки рішень у глобальному авіаційному середовищі..

Функціонування міжнародної авіаційної системи базується на багатокомпонентному інформаційному середовищі, у якому циркулюють різні типи даних, необхідні для забезпечення безпеки польотів, технічної справності повітряних суден, оперативної координації та відповідності глобальним стандартам. Розуміння структури цих інформаційних потоків є критичним для побудови ефективних моделей прогнозування ризиків та інтеграції штучного інтелекту у процеси аналізу. Основні типи інформації, що використовуються в міжнародній авіації, охоплюють оперативні, технічні, безпекові, аналітичні та нормативні дані, кожен з яких виконують окрему функцію у глобальній системі авіаційної комунікації [50].

Оперативна інформація становить основу щоденної діяльності авіаційної галузі. До неї належать параметри польоту, маршрути, висоти, швидкісні показники, телеметрія від бортових систем, дані про фактичну завантаженість повітряного простору, а також метеорологічна інформація, включаючи прогнози, супутникові знімки та попередження про небезпечні явища. Важливим компонентом є NOTAM - офіційні повідомлення, що інформують про

тимчасові зміни у структурі повітряного простору, стан аеродромів чи обмеження у використанні навігаційних засобів. Оперативна інформація є динамічною та потребує швидкої обробки, адже впливає на ухвалення рішень у реальному часі [51].

Технічна інформація забезпечує контроль технічного стану повітряних суден та інфраструктури. Вона включає дані про технічне обслуговування, записи про ремонт, журналювання відмов, результати діагностики, звіти технічних інспекцій та інформацію про прогнози відхилення роботи систем. Значну частину таких даних формують системи післяпольотного аналізу, технічні центри авіакомпаній та інженерні служби виробників авіаційної техніки. Технічна інформація є ключовою у виявленні ранніх ознак дефектів, дозволяє проводити прогнозне техобслуговування та знижує ймовірність виникнення технічних інцидентів.

Безпекова інформація охоплює дані про інциденти, порушення процедур, небезпечні ситуації та латентні тенденції, які можуть свідчити про наближення загроз. Вона міститься у національних та міжнародних реєстрах, таких як ECCAIRS, ASIAs, GADM, а також формується службами безпеки авіакомпаній. До цієї категорії належать звіти екіпажів, дані про нестандартну поведінку повітряного судна, інформація про конфліктні ситуації в повітряному просторі та матеріали розслідування надзвичайних подій. Безпекова інформація є основою для побудови превентивних моделей управління ризиками.

Аналітична інформація виникає на основі опрацювання оперативних, технічних і безпекових даних. Вона включає прогнози моделі, зведені індикатори ризику, трендові звіти, оцінки факторів небезпеки та результати моделювання. Такі дані використовуються авіакомпаніями, національними регуляторами та міжнародними організаціями для визначення пріоритетних загроз, розроблення нових методик управління ризиками та вдосконалення систем безпеки польотів. Аналітична інформація є основою для інтеграції штучного інтелекту та машинного навчання у процеси прогнозування [52].

Цифровізація інформаційних потоків у міжнародній авіації стала основою переходу від реактивної до проактивної моделі управління безпекою польотів.

Сучасні цифрові системи забезпечують не лише швидку передачу даних, а й створюють повністю інтегроване середовище, у якому інформація циркулює без затримок, втрат і викривлень. Завдяки цьому авіаційна галузь отримує здатність прогнозувати небезпеки, формувати точні індикатори ризику та оперативно реагувати на зміни у глобальному повітряному просторі.

Одним із ключових результатів цифровізації є формування високошвидкісних каналів обміну даними між державами та міжнародними структурами. Електронні платформи дозволяють передавати інформацію про інциденти, технічні відхилення, погодні аномалії та зміни в аеронавігаційних процедурах у межах хвилин, що значно скорочує час між виявленням загрози та відповідним управлінським рішенням. У контексті високої інтенсивності авіаперевезень така швидкість стала критично важливою для запобігання ланцюговим інцидентам та зменшення системних ризиків [53].

Цифрові методи також дозволили перейти до повної стандартизації форматів даних. Використання структурованих моделей обміну, таких як AIХМ для аеронавігаційної інформації, FIXМ для польотних даних та WXXМ для метеорологічних відомостей - забезпечує взаємодію між інформаційними системами різних країн і авіаційних організацій. Завдяки цьому дані можуть бути безпосередньо інтегровані у системи моніторингу, аналітичні платформи або глобальні реєстри без додаткової обробки. Це усуває проблему несумісності форматів і підвищує точність аналізу.

Цифровізація також суттєво розширила можливості прогнозного моделювання. Сучасні системи здатні обробляти не лише статичні записи, а й великі динамічні потоки даних, що надходять у реальному часі з телеметрії, датчиків, супутникових систем і наземних центрів. Це дозволяє будувати точні моделі оцінки ризику, враховувати вплив множинних факторів і відстежувати зміну загрозливих тенденцій з високою частотою оновлення. У результаті авіаційна система отримує можливість діяти на попередження, а не реагувати на вже сформовані інциденти.

Окремо слід відзначити те, що цифрова інфраструктура сформувала умови для повноцінної інтеграції штучного інтелекту в управління авіаційною

безпекою. Алгоритми ШІ потребують великих масивів якісних, структурованих та синхронізованих даних. Саме цифровізація забезпечила їх доступність та уніфікацію, відкривши можливість для застосування методів глибинного навчання, автоматичного виявлення аномалій та побудови цифрових двійників повітряних суден. Це дозволяє моделювати поведінку систем у складних сценаріях, прогнозувати відмови, аналізувати поведінкові патерни екіпажів та визначати ризики, які неможливо виявити традиційними методами [54].

## **2.2. Аналітична модель прогнозування ризиків у системі авіаційної безпеки**

Методологія аналізу факторів ризику в авіації базується на системному підході, який розглядає безпеку польотів як результат взаємодії технічних, організаційних, людських і зовнішніх компонентів. Центральним елементом цієї методології є концепція ризику як функції імовірності небезпечної події та тяжкості її наслідків. На відміну від традиційного контролю за відмовами, сучасний підхід дозволяє оцінювати ризики навіть тоді, коли подія ще не відбулася, що забезпечує можливість їх превентивного управління.

Важливе місце у методології займає класифікація небезпек. Вона дозволяє структурувати потенційні загрози за їх природою: технічні аномалії, відхилення в роботі екіпажу, порушення процедур, зовнішні фактори середовища - та вибудувати причинно-наслідкові зв'язки між ними. Для цього використовуються спеціалізовані таксономії, які допомагають ідентифікувати першопричини та системні слабкі місця, що накопичуються у процесах експлуатації повітряних суден [55].

Одним із ключових методологічних інструментів є побудова моделі ризику. Вона передбачає опис станів системи та можливих переходів між ними. Застосування моделей Маркова, байєсівських мереж та дерев ймовірності дозволяє кількісно оцінити ризикові сценарії, врахувати невизначеність та взаємозалежність факторів. Таке моделювання дозволяє формувати прогноз

розвитку подій у часі та визначати найбільш уразливі точки авіаційної системи.

У межах методології важливе місце займає аналіз сценаріїв. Він дає змогу оцінити, як змінюватиметься ризикова ситуація у разі модифікації одного чи кількох факторів. Наприклад, сценарне моделювання дозволяє визначити, як зміниться загальний рівень ризику при зростанні навантаження на повітряний простір, при непередбачених погодних аномаліях або при викривленні поведінкових показників екіпажу. Такий підхід активно застосовується міжнародними авіаційними регуляторами під час ухвалення стратегічних рішень.

Окрему методологічну роль відіграє принцип багаторівневого аналізу. Він полягає у тому, що ризик оцінюється на різних рівнях — від окремої системи літака до глобальної авіаційної мережі. На мікрорівні відбувається аналіз конкретних технічних параметрів чи поведінкових аномалій екіпажу, тоді як на макрорівні оцінюються глобальні тенденції, операційні зміни та взаємодія між національними системами безпеки. Це дає можливість поєднати локальні спостереження з ширшим міжнародним контекстом.

Важливим елементом методології є оцінювання невизначеності та мінливості ризиків. Авіаційні системи функціонують у складному середовищі, де значна частина небезпек має стохастичний характер. Тому для аналізу використовуються методи статистичного моделювання, теорія надійності, а також підходи, які дозволяють працювати з нечіткими, неповними або суперечливими даними. Сучасні методи, такі як fuzzy logic, дозволяють кількісно оцінювати ситуації, де класична ймовірність не забезпечує достатньої точності [56].

Методологічна основа також включає оцінку бар'єрів безпеки. Це аналіз того, які захисні механізми існують у системі: технічні, процедурні, поведінкові, і наскільки вони здатні запобігати розвитку небезпечних подій. Для цього використовуються методи Bow-Tie, Hazard Barriers Analysis та Barrier-Based Risk Evaluation, які дають змогу оцінити ефективність кожного бар'єра та виявити їх прогалини.

Завершальним методологічним компонентом є пріоритезація ризиків, яка дозволяє визначити, які загрози потребують першочергових заходів контролю. Це здійснюється на основі багатофакторного аналізу, що враховує частоту, тяжкість наслідків, потенційну ескалацію, ступінь керованості та можливість впровадження превентивних заходів. У міжнародній практиці пріоритезація є центральним елементом системи управління ризиками у цивільній авіації [57].

Методологія аналізу ризиків, що застосовується в міжнародній цивільній авіації, ґрунтується на рекомендаціях та стандартах ІСАО, які визначають єдині правила виявлення, оцінювання й контролю небезпек у глобальній системі забезпечення безпеки польотів. Ці принципи формують універсальний підхід, який застосовується державами, авіакомпаніями, аеронавігаційними організаціями та виробниками авіаційної техніки. Методологія ІСАО виходить із того, що ризик є багатовимірним явищем, яке необхідно оцінювати системно, динамічно та з використанням даних, що постійно оновлюються.

Одним із базових принципів ІСАО є системний підхід. Він передбачає розгляд авіаційної діяльності як цілісної системи, у якій технічні, організаційні, людські та зовнішні елементи взаємодіють між собою й можуть породжувати як прямі, так і непрямі фактори ризику. Системний підхід відмовляється від оцінювання окремих подій у відриві від контексту та натомість аналізує взаємозв'язки між елементами, що дозволяє визначати кореневі причини небезпек. Такий підхід є основним у Safety Management System (SMS), де безпека розглядається як результат взаємодії всіх процесів організації .

Другим ключовим принципом є пріоритетність превентивних заходів. ІСАО наголошує, що головна мета аналізу ризиків полягає не у фіксації інцидентів, а в запобіганні їх виникненню. Превентивна логіка вимагає активного виявлення слабких місць до того, як вони призведуть до небезпечних подій. Це включає раннє виявлення тенденцій, ідентифікацію латентних загроз та оцінювання захисних бар'єрів. Завдяки превентивному фокусу аналіз ризику трансформується з реактивної діяльності у стратегічний інструмент управління майбутніми подіями [58]

Важливе місце в методології ІСАО посідає орієнтація на дані. Аналіз ризиків має проводитися на основі об'єктивної інформації, що надходить із технічних систем, реєстрів інцидентів, телеметрії, систем моніторингу польотів та глобальних баз даних. ІСАО підкреслює, що якість прогнозування залежить від повноти, точності та стандартизації даних. Принцип *data-driven safety management* дозволяє будувати моделі ризику, які враховують як історичні, так і оперативні дані та забезпечують обґрунтованість управлінських рішень.

Окремим принципом методології ІСАО є інтеграція людського фактора. Людина є центральним елементом авіаційної системи, тому методологія аналізу ризиків враховує психологічні, поведінкові, когнітивні та фізіологічні фактори, що можуть впливати на ефективність виконання завдань. Інтеграція людського фактора передбачає аналіз рішень екіпажів, рівня підготовки персоналу, робочого навантаження, помилок та умов, у яких вони виникають. ІСАО використовує спеціалізовані моделі та таксономії для ідентифікації людських відхилень, що є важливою складовою оцінки ризику.

Завершальним принципом методології ІСАО є розгляд ризику в динаміці. Ризики в авіації не є статичними — вони змінюються залежно від технічного стану повітряних суден, операційних умов, погодних явищ, людського фактора та інституційних змін. Тому ІСАО підкреслює необхідність регулярного оновлення оцінок ризику, постійного моніторингу ключових показників та перегляду ризикових профілів. Динамічний підхід дозволяє реагувати на нові загрози, своєчасно модернізувати процедури та забезпечувати актуальність системи безпеки [59].

Функціонування прогнозної системи на основі штучного інтелекту передбачає використання багатовимірного набору даних, що надходять із різних джерел авіаційної інфраструктури. Ці дані формують так званий *data input layer* - вхідний рівень алгоритму, який визначає якість подальшого аналізу та точність прогнозу. Кожен тип інформації відображає окремий аспект безпеки польотів, а їх інтеграція забезпечує комплексний підхід до оцінки ризиків.

Одним із ключових компонентів вхідного рівня є параметри польоту, що

збираються за допомогою систем Flight Data Monitoring (FDM), Flight Data Analysis (FDA) та бортових телеметричних комплексів. До таких параметрів належать висота польоту, курс, вертикальна та горизонтальна швидкість, навантаження на конструкцію, показники роботи двигунів, відхилення траєкторії, положення керуючих поверхонь та інші параметри, що фіксуються сенсорами літака. Цей набір даних дає змогу формувати точну картину фактичної поведінки повітряного судна у динаміці [60].

Другим джерелом є технічні записи, які включають інформацію про технічне обслуговування, результати оглядів, зареєстровані відмови систем, попередження бортових діагностичних комплексів та журнали ремонту. Такі дані відображають технічний стан повітряного судна, історію його експлуатації та потенційні тенденції до відмов. Алгоритм ШІ використовує їх для виявлення повторюваних патернів або прихованих дефектів, що можуть підвищувати рівень ризику.

Важливим блоком вхідних даних є метеорологічні показники, які включають прогнози погоди, супутникову інформацію, дані метеорадарів, попередження про грози, турбулентність, обледеніння та інші небезпечні явища. Оскільки погодні умови часто є тригером інцидентів, їх інтеграція у прогнозну модель забезпечує підвищення точності оцінки ризику.

Окрему категорію становлять поведінкові характеристики екіпажу, що можуть включати профілі робочих навантажень, реакції на нестандартні ситуації, відповідність процедурним вимогам, якість виконання маневрів та інші показники людського фактора. Алгоритм ШІ враховує ці дані для оцінки потенційних відхилень у роботі льотного складу, які можуть впливати на рівень ризику польоту.

До вхідного шару також належать дані про інциденти, отримані з міжнародних баз, таких як ECCAIRS, ASIAS та GADM. Ці джерела містять структуровані звіти про порушення, небезпечні ситуації, помилки екіпажів, технічні випадки та інші події, які раніше призводили до інцидентів. Інформація такого типу дозволяє алгоритму визначити історичні закономірності й

порівнювати поточний стан рейсу з профілями, характерними для підвищених ризиків.

Завершальним компонентом є операційні параметри, які включають завантаженість повітряного простору, тип маршруту, конфігурацію аеропорту, інтенсивність трафіку, час доби, сезонні особливості та інші фактори, що можуть впливати на складність польотних умов. Операційні дані дозволяють врахувати широкий контекст, у якому здійснюється політ, та оцінити системні ризики [61].

Таким чином, data input layer є комплексною структурою, що об'єднує технічні, поведінкові, експлуатаційні та історичні дані, створюючи підґрунтя для ефективної роботи алгоритмів штучного інтелекту та побудови точних прогнозних моделей авіаційних ризиків.

Ефективність роботи алгоритмів штучного інтелекту в аналізі авіаційних ризиків безпосередньо залежить від якості вхідних даних, що надходять до моделі. Оскільки авіаційні дані характеризуються високою варіативністю, різною структурою, нерівномірністю часових рядів та наявністю шумів, обов'язковим етапом побудови прогнозної системи є їх попередня обробка. Preprocessing забезпечує трансформацію «сирих» даних у структурований, цілісний та придатний до аналізу масив, що формує основу для високоточної роботи прогнозних моделей.

Одним із ключових елементів preprocessing є очищення даних, яке передбачає усунення дублікатів, виправлення некоректних значень та зменшення впливу шумів. У контексті авіаційної інформації це означає перевірку достовірності телеметрії, корекцію відсутніх або пошкоджених значень, а також виключення параметрів, що не відповідають фізичній логіці або можливостям системи. Очищення підвищує стабільність роботи моделі та запобігає викривленню прогнозу.

Наступним етапом є нормалізація та стандартизація параметрів, що дозволяє узгодити дані, отримані з різних сенсорів, систем та баз. У різних джерел одиниці вимірювання, діапазони значень та частота оновлення

параметрів можуть відрізнятися, що унеможливило б пряме використання цих даних моделлю ШІ. Нормалізація приводить дані до єдиного масштабного діапазону, тоді як стандартизація формує узгоджені статистичні характеристики (середнє, дисперсію). Це підвищує чутливість алгоритмів до суттєвих відхилень та забезпечує стійкість моделі [62].

Важливою процедурою *preprocessing* є ідентифікація та обробка аномальних точок. У польотних даних нерідко зустрічаються одиничні відхилення, спричинені помилками сенсорів або нестабільністю сигналу. Такі точки можуть некоректно впливати на результат, якщо не будуть належним чином позначені або видалені. У залежності від моделі ШІ аномалії можуть або усуватися, або класифікуватися як окремий тип сигналів, що самі по собі можуть бути предикторами ризику. Такий підхід дозволяє уникнути викривлення трендових залежностей.

Особливу роль у підготовці даних відіграє вирівнювання часових рядів. Оскільки різні системи (FDM, технічні журнали, метеорологічні бази, диспетчерські платформи) генерують дані з різною частотою та часовими позначками, виникає необхідність синхронізації інформації за таймкодами. Узгодження часових рядів забезпечує коректність подальшого аналізу, дозволяє формувати комплексний профіль польоту та точно визначати причинно-наслідкові зв'язки між подіями.

Завершальним елементом є формування єдиних форматів даних, які забезпечують сумісність інформації з міжнародними стандартами та внутрішніми алгоритмами обробки. У сфері авіації використовуються такі формати, як AIXM для аеронавігаційної інформації, FIXM для параметрів польоту, WXXM для метеорологічних даних, а також універсальні структури: CSV, JSON та XML. Перетворення даних до стандартизованого формату дає змогу об'єднати інформацію з різнорідних систем і гарантувати, що вона буде коректно оброблена прогнозною моделлю [63].

Таким чином, попередня обробка даних є критично важливим етапом формування якісного аналітичного середовища для роботи алгоритмів

штучного інтелекту. Вона забезпечує чистоту, узгодженість, структурованість та повноту даних, що в сукупності підвищує точність прогнозування авіаційних ризиків і забезпечує надійність результатів, які лягають в основу рішень у сфері безпеки польотів.

Прогнозування авіаційних ризиків потребує використання моделей штучного інтелекту, здатних працювати з багатовимірними та часовозалежними даними. Вибір алгоритму визначається структурою даних і характером завдання: виявленням тенденцій, класифікацією ризику або пошуком аномалій.

Для аналізу часових рядів застосовуються нейронні мережі, зокрема MLP, LSTM та GRU. Вони виявляють нелінійні залежності у параметрах польоту та дозволяють моделювати поведінку літака у динаміці. Для класифікації рівня ризику використовуються дерева рішень та Random Forest, які ефективно працюють з різнорідними даними та виявляють ключові взаємозв'язки між факторами небезпеки [64].

Для підвищення точності прогнозу застосовуються моделі градієнтного бустінгу (XGBoost, LightGBM), здатні працювати з великими масивами технічних і експлуатаційних даних. Алгоритми виявлення аномалій, такі як Isolation Forest та Autoencoder, використовуються для виявлення нестандартної поведінки літальних апаратів або рідкісних інцидентних патернів [65].

У випадках, коли потрібне моделювання імовірнісних залежностей, використовуються байєсівські мережі, які дозволяють оцінити ризики з урахуванням невизначеності. Додатково методи кластеризації (k-means, DBSCAN) застосовуються для виділення типових профілів ризику [66].

Усі моделі потребують процедур навчання, валідації та тестування на історичних даних (backtesting), що дозволяє оцінити точність прогнозу та стабільність роботи алгоритму. Поєднання цих підходів забезпечує формування комплексної прогнозної системи, здатної підвищувати рівень авіаційної безпеки за рахунок точного аналізу складних факторів ризику [66].

### 2.3. Алгоритм оцінки рівня ризику катастрофи

Алгоритм оцінки рівня ризику авіаційної катастрофи є ключовим аналітичним елементом системи прогнозування, оскільки від його точності та методологічної обґрунтованості залежить ефективність прийняття рішень у сфері безпеки польотів. Його завданням є інтеграція великої кількості різнорідних даних у єдиний індикатор, який відображає актуальний рівень небезпеки та дозволяє своєчасно виявляти ситуації, що можуть призвести до критичних інцидентів. Розроблення такого алгоритму потребує поєднання системного мислення, математичного моделювання, статистичного підходу та сучасних технологій штучного інтелекту.

Першим етапом функціонування алгоритму є визначення набору ключових критеріїв ризику. У реальній авіаційній практиці ризик формується взаємодією кількох груп факторів, кожна з яких по-різному впливає на загальний стан безпеки. Технічні показники відображають стан окремих бортових систем, частоту попереджень, відмов або нестабільних показників роботи обладнання. Польотні параметри показують, наскільки фактична траєкторія відповідає запланованій, чи виникають небезпечні відхилення за висотою, швидкістю, кутом атаки або навантаженням на планер. Метеорологічні умови можуть суттєво впливати на ризик, оскільки турбулентність, грози, обледеніння або зниження видимості часто виступають каталізаторами інцидентів. Поведінкові фактори екіпажу, такі як точність виконання процедур або швидкість реакції в нестандартних ситуаціях, мають вирішальне значення у складних польотних умовах. Експлуатаційні фактори охоплюють навантаження повітряного простору, режим роботи аеропорту, густоту трафіку та рівень координації між службами. Нарешті, історичні профілі інцидентів дозволяють співвіднести сучасні відхилення із відомими сценаріями, які раніше уже призводили до небезпечних подій. Сукупність цих факторів створює комплексну картину, яка відображає потенційний шлях розвитку загрози [67] .

Наступним етапом є формування часткових індикаторів ризику, кожен з яких оцінює стан окремої групи факторів. Поділ на індикатори дозволяє забезпечити методологічну чистоту аналізу, уникнути змішування різних типів сигналів і створити прозору систему оцінювання. Технічний індикатор відображає ймовірність технічної відмови або нестабільної роботи систем; метеорологічний індикатор - рівень складності погодних умов; індикатор людського фактора - відповідність дій екіпажу встановленим процедурам; індикатор траєкторії - безпечність фактичного профілю польоту; операційний індикатор - напруженість зовнішнього середовища. Для кожного індикатора формується числова оцінка, яка показує ступінь відхилення від нормативного стану та дозволяє незалежно оцінювати різні типи загроз.

Значно складнішим елементом алгоритму є визначення вагових коефіцієнтів, які встановлюють, наскільки суттєво кожен індикатор впливає на загальний рівень ризику. Визначення ваг є глибоким аналітичним процесом, що ґрунтується на статистичному аналізі інцидентів, кореляційних дослідженнях, результатах машинного навчання та оцінках експертів, серед яких інженери з технічної експлуатації, інструктори льотних центрів, аналітики безпеки та фахівці з управління ризиками. Перевага технічних факторів обумовлена тим, що саме технічні збої мають найвищу ймовірність переходу в критичний сценарій, тоді як погодні чи експлуатаційні фактори часто лише створюють умови для виникнення загроз. Людський фактор має високу, але варіативну вагу, оскільки в окремих ситуаціях його роль може бути вирішальною [68].

Після визначення вагових коефіцієнтів розпочинається процес інтеграції індикаторів у єдину модель ризику. На цьому етапі всі часткові значення нормалізуються для усунення впливу різних масштабів та одиниць вимірювання, після чого підсумовуються у зваженій формі. Отриманий результат є математичною оцінкою загального стану небезпеки для конкретного польоту, технічного об'єкта або сценарію. Цей підхід дозволяє формалізувати складні процеси та відобразити їх через чітку числову величину.

Для практичного використання інтегральний показник переводиться у

відсоткову шкалу, оскільки саме такий формат є найбільш зрозумілим для диспетчерів, інженерів, екіпажів та регуляторів. Нормалізація може здійснюватися за методом min–max, логістичними функціями або іншими алгоритмами. Порогові значення шкали (низький, помірний, підвищений, критичний ризик) формуються відповідно до міжнародних практик оцінки загроз і забезпечують універсальність використання результатів у глобальному авіаційному середовищі. Чітка шкала дозволяє не лише ідентифікувати рівень небезпеки, а й визначити необхідні дії: зміну маршруту, обмеження експлуатації судна, проведення додаткових оглядів або інформування регулятора.

Важливою складовою алгоритму є процес валідації, що включає тестування прогнозів на історичних інцидентах, перевірку точності моделі та періодичне уточнення параметрів. Backtesting дозволяє оцінити, чи могла б модель передбачити події, що вже відбулися, а отже — перевірити її практичну цінність. На основі цих результатів коригуються ваги, уточнюється логіка інтеграції та проводиться перенавчання моделі. У реальних умовах така система має регулярно оновлюватися з урахуванням нових даних, технологічних інновацій і змін у правилах міжнародної авіації.

Отриманий відсотковий індикатор ризику має прикладне значення для широкого кола користувачів у міжнародному авіаційному просторі. Авіакомпанії використовують його для моніторингу небезпечних рейсів, стратегічного планування технічного обслуговування, оптимізації маршрутів та підвищення підготовки екіпажів. Регулятори отримують інструмент раннього попередження, який дозволяє оперативно реагувати на системні загрози та підвищувати стандарти безпеки. Міжнародні організації застосовують такі алгоритми для уніфікації підходів до оцінки ризиків, покращення обміну даними та формування глобальної ситуаційної обізнаності [69].

Таким чином, алгоритм оцінки рівня ризику катастрофи є фундаментальним елементом цифрової системи забезпечення авіаційної безпеки. Він дозволяє інтегрувати різні типи даних, формувати об'єктивні оцінки небезпеки, підтримувати прийняття рішень на всіх рівнях управління та

підсилювати міжнародну співпрацю у сфері прогнозування авіаційних ризиків.

## **РОЗДІЛ 3. ПРОГРАМА АНАЛІЗУ АВІАЦІЙНИХ РИЗИКІВ ЯК ІНСТРУМЕНТ ІНФОРМАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ**

### **3.1. Концепція розробки програми у сфері міжнародної авіаційної інформації**

У глобальній авіаційній галузі формується тенденція переходу від традиційних підходів до забезпечення безпеки польотів, заснованих на реактивному реагуванні, до моделей, орієнтованих на випередження кризових ситуацій. Це обумовлює істотну трансформацію потреб авіаційних корпорацій, для яких інформаційні системи стають не допоміжним, а стратегічним інструментом управління ризиками. Підвищення складності конструкції сучасних повітряних суден, зростання щільності повітряного руху та посилення міжнародних регулятивних вимог формують контекст, у якому традиційні системи індикації та сигналізації більше не забезпечують достатнього рівня передбачуваності.

Передусім корпорації Boeing, Airbus та інші виробники потребують систем, здатних забезпечувати проактивний аналіз небезпек, тобто формувати прогноз можливого розвитку критичних відхилень на основі багатофакторних даних. У сучасній ситуації масиви експлуатаційних даних, таких як телеметрія, дані сенсорів, результати техоглядів, логістичні записи, FDM та FDA-звіти є настільки великі й динамічні, що їхня ручна чи традиційна аналітика стає малоефективною. Авіакомпанії дедалі більше потребують систем, які здатні не лише зчитувати ці дані, але й інтерпретувати їх у контексті ризику: визначати приховані тренди, моделювати сценарії розвитку подій та видавати інтегральні індикатори загрози у реальному часі.

Другою ключовою потребою є підвищення точності та глибини оцінки технічного стану літальних апаратів. З огляду на перехід галузі до моделі predictive maintenance, корпорації прагнуть отримувати системи, які здатні оцінювати не лише наявність технічних відмов, а й їх імовірність, швидкість

розвитку та системний характер. Це особливо актуально для складних авіонічних комплексів, де наслідки відмов можуть мати кумулятивний характер і проявлятися лише за поєднання кількох незначних відхилень. Без інтелектуальних інформаційних систем, здатних аналізувати десятки тисяч параметрів одночасно, така робота стає неможливою.

Ще однією стратегічною потребою є цифрова керованість людського фактору, який продовжує залишатися домінуючою причиною авіаційних інцидентів. Авіаційні корпорації прагнуть отримати системи, що можуть виявляти атипові поведінкові патерни екіпажу, невідповідність SOP, затримки у реакції на сигнали, ознаки перевантаженості чи зниження уваги. Це вимагає технологій, які інтегрують дані роботи екіпажу, польотні параметри та контекст ситуації, забезпечуючи аналітичну підтримку рішень у критичні моменти.

Окремою потребою є повноцінна інтеграція наземних та бортових інформаційних потоків, оскільки ефективність прогнозних моделей залежить від їх узгодженості. Авіаційні корпорації потребують єдиної цифрової архітектури, яка об'єднує дані диспетчерських центрів, технічних служб, метеорологічних органів, міжнародних баз інцидентів та систем авіоніки літака. Лише в такому середовищі можливо формувати точні аналітичні моделі та забезпечувати достовірний прогноз безпеки на всіх етапах польоту.

Нарешті, домінуючою потребою є відповідність міжнародним стандартам кіберзахисту та регуляторним вимогам ICAO, FAA та EASA. З розвитком цифровізації зростає вразливість критичних бортових систем до кібервтручань. Виробники та оператори літаків потребують систем, здатних працювати у високозахищеному середовищі, забезпечувати трасованість рішень ШІ, прозорість алгоритмів і гарантувати їхню сертифікованість.

Таким чином, сучасні авіаційні корпорації використовують інформаційні системи безпеки як інструмент не лише контролю, але й стратегічного прогнозування. Ринок потребує платформ, здатних інтегрувати великі масиви даних, забезпечувати високоточну аналітику, підсилювати людський фактор і формувати єдине безпекове середовище. Саме ці потреби визначають

актуальність і значущість інтелектуальної системи DANA-T, яка поєднує прогнозний потенціал, аналітичну глибину та сумісність із сучасними міжнародними вимогами авіаційної галузі.

DANA-T (Dynamic Aviation Neuro-Analytic Technology) — це розроблена автором інноваційна інформаційно-аналітична програма, інтегрована у бортовий комп'ютер повітряного судна та призначена для комплексного збору, обробки та аналізу польотних даних у режимі реального часу й на етапі передпольотної підготовки. Основним завданням DANA-T є формування високоінформативного індикатора прогнозного ризику катастрофи та забезпечення екіпажу підтримкою прийняття рішень у критичних ситуаціях, які можуть становити загрозу безпеці польоту.

Програма виконує подвійну інформаційну функцію. По-перше, система працює як прогнозний модуль pre-flight аналізу, який на основі технічного стану літака, історичних інцидентів, метеорологічних умов та профілю екіпажу формує початковий відсотковий рівень ризику перед виконанням польоту. На цьому етапі DANA-T також інтегрує дані із землі: інформацію про результати технічного огляду, кількісну оцінку якості технічного обслуговування (наприклад, бал чи індекс відповідності нормативам), записи про усунуті та неусунуті несправності, а також логістичні фактори, такі як затримки екіпажу або відхилення від стандартних процедур передпольотної підготовки. Отримання таких даних дає змогу оцінити не лише технічний стан повітряного судна, а й організаційні аспекти готовності до польоту. Сукупність цих показників дозволяє екіпажу та операторам визначити потенційні загрози ще до зльоту та своєчасно застосувати превентивні заходи.

По-друге, DANA-T функціонує як онборд-модуль у реальному часі, здійснюючи безперервний моніторинг показників польотних параметрів, роботи систем, поведінкових відхилень екіпажу та зовнішнього середовища. Алгоритми штучного інтелекту аналізують багатовимірні дані з датчиків та систем авіоніки, формуючи актуальний відсотковий показник ризику, який оновлюється динамічно відповідно до змін польотної ситуації. Програма реагує

лише у разі реальної загрози: якщо система фіксує аварійні сигнали, такі як попередження про звалювання, надмірний кут атаки, небезпечне зниження або відмову критично важливої системи, вона генерує контекстні рекомендації, що допомагають екіпажу стабілізувати літак і мінімізувати ризик переходу небезпечної ситуації у критичну.

Інформаційна функція DANA-T полягає у фільтрації складних технічних даних і поданні їх у вигляді зрозумілого, стандартизованого показника — відсоткового рівня ризику катастрофи. Цей індикатор забезпечує екіпаж швидким доступом до аналітичної оцінки загроз, що особливо важливо у високостресових умовах, коли час на ухвалення рішень обмежений. Програма не дублює функції автопілота чи систем попередження, але підсилює їх за рахунок інтелектуального аналізу сукупності факторів, які окремо можуть виглядати не критичними, але разом формують високий ризик.

Важливою особливістю DANA-T є її орієнтація на цивільну авіацію, що забезпечує відповідність міжнародним вимогам ICAO, EASA та FAA щодо функціонування критичних бортових систем. Інтеграція програми у вже існуючу архітектуру бортового комп'ютера не порушує логіку роботи автопілота чи інших аварійних систем, оскільки DANA-T має інформаційний характер і не виконує автоматичного втручання у керування літаком без команди екіпажу.

Людський фактор традиційно залишається одним із ключових елементів авіаційної безпеки, що безпосередньо впливає на рівень ризику під час виконання польотів. У цьому контексті програма DANA-T інтегрує у власну аналітичну модель комплексний механізм оцінювання професійних і поведінкових характеристик пілота, формуючи персональний профіль, який використовується для підвищення точності прогнозування та адаптації інтелектуальних алгоритмів до індивідуальних особливостей членів екіпажу. Такий підхід забезпечує не лише глибший аналіз ризиків, а й створює новий рівень персоналізованої безпеки польотів.

## **1. Формування унікального цифрового профілю пілота**

У рамках функціонування системи кожному пілоту присвоюється унікальний цифровий ідентифікатор — Pilot Digital ID, сформований відповідно до принципів цифрової авіаційної ідентифікації, які можуть бути імплементовані на базі ініціатив ІКАО щодо модернізації персональних сертифікатів. Цей ідентифікатор зберігається у єдиній захищеній базі даних та містить інформацію про модель повітряного судна, на яку пілот має сертифікацію, рік первинного допуску до польотів та інші незмінні параметри. Внесення або корекція цих характеристик після встановлення системи не передбачаються, що забезпечує цілісність профілю та виключає ризики маніпуляцій.

## **2. Структура даних, що враховуються у профілі пілота**

Програма DANA-T використовує розширений набір показників, які відображають рівень професійної підготовки й особистісні характеристики пілота, що можуть впливати на загальний рівень ризику. До профілю включаються:

- результати тренажерних симуляцій і стрес-тестів;
- поведінкові реакції у складних сценаріях;
- історія відхилень від процедур та епізодів нестандартної поведінки;
- психологічні особливості, визначені за результатами тестування;
- відомості про медичні допуски;
- стаж, налітані години та типи виконуваних польотів;
- показники дотримання SOP у реальних умовах;
- текстові висновки інструкторів.

Висновки інструкторів можуть містити як структуровані, так і неформальні формулювання. Програма за допомогою інструментів обробки природної мови автоматично перетворює їх у стандартизовані параметри — ключові слова, індикатори або кодові позначення. Це забезпечує уніфікацію даних без втрати експертного контексту.

### **3. Оновлення та актуалізація профілю**

З метою стабільності прогнозної моделі оновлення даних про пілота здійснюється лише у визначених випадках — за ініціативою інструктора, медичної комісії або у разі отримання суттєво нової інформації про професійну діяльність. Такий підхід відповідає авіаційним вимогам щодо стабільності параметрів безпеки та запобігає впливу випадкових коливань на алгоритм прогнозування.

### **4. Вплив людського фактору на прогноз ризику**

Профіль пілота інтегрується у загальну модель DANA-T через спеціальний коефіцієнт Factor of Human Reliability (FHR), який впливає на роботу системи у кількох стратегічних аспектах:

- **вплив на базовий прогноз pre-flight**

Пілоти з історією інцидентів, порушень SOP або нестабільних реакцій отримують вищий початковий рівень ризику, тоді як високостабільні пілоти — нижчий.

- **зміна чутливості алгоритмів у реальному часі**

DANA-T автоматично адаптує пороги сповіщень: пілоти з повільною або несвоєчасною реакцією отримують попередження значно раніше, ніж у стандартному режимі.

- **адаптація рекомендацій щодо дій у критичних ситуаціях**

Якщо профіль містить ознаки труднощів у роботі зі stall warning або GPWS, система формує більш прямі, чіткі та ранні підказки, спрямовані на стабілізацію повітряного судна.

- **вплив на алгоритм прогнозування під час польоту**

DANA-T змінює вагові коефіцієнти ризику залежно від того, наскільки сильно поведінкові особливості пілота можуть вплинути на безпеку у конкретних умовах польоту.

### **5. Оцінка реальних дій пілота у кабіні**

Система здатна аналізувати не лише статичні дані, а й фактичну поведінку пілота під час польоту. DANA-T фіксує:

- характер управління повітряним судном (плавність, стабільність, точність),
- відхилення від стандартних операційних процедур,
- рішучість і своєчасність відповідей на критичні сигнали,
- відповідність дій очікуваним сценаріям при аварійних індикаторах.

На основі цих спостережень формується динамічний поведінковий індикатор, який впливає на відсотковий рівень ризику в реальному часі.

#### **6. Рішення щодо можливості виконання польоту**

Якщо сумарний pre-flight risk score перевищує встановлений критичний поріг, система генерує заборонний сигнал і автоматично повідомляє екіпаж та диспетчерські служби. Однак остаточне рішення, відповідно до міжнародних авіаційних норм, ухвалює командир повітряного судна або оператор польотів. Це зберігає баланс між алгоритмічною підтримкою і пріоритетом людського рішення.

#### **7. Конфіденційність та безпека персональних даних**

Усі дані профілю пілота є суворо конфіденційними та недоступними для сторонніх осіб. Доступ до інформації мають виключно уповноважені представники авіакомпанії, інструктори та контролюючі органи у разі розслідування інцидентів. Під час польоту дані обробляються у зашифрованому вигляді, що відповідає принципам кібербезпеки та захисту персональної інформації.

Технічний модуль збору даних у програмі DANA-T є ключовим елементом загальної архітектури прогнозування авіаційних ризиків. Його функціонування спрямоване на інтеграцію широкого спектра технічної інформації, що відображає як конструктивні особливості повітряного судна, так і його фактичний технічний стан на момент виконання польоту. Усі дані використовуються для формування технічного індикатора ризику, який надалі впливає на загальний прогноз ймовірності інцидентів.

Передусім система враховує конструктивні погрішності та інженерні допуски, властиві конкретній моделі літака. Кожне повітряне судно має певні технологічні відхилення в роботі датчиків, систем навігації, гідравліки чи електроніки, які закладені виробником та відображені у технічній документації. DANA-T імпортує ці параметри у власну базу, що дозволяє коректно інтерпретувати подальші вимірювані дані та розмежовувати стандартні погрішності від потенційних технічних відмов. Окремо враховуються типові системні аномалії, відомі у конкретних серіях або роках випуску, а також інформація з директив льотної придатності й сервісних бюлетенів.

Важливою складовою технічного аналізу є облік історії технічних подій і зауважень, зафіксованих під час попередніх польотів. Система інтегрує записи з MEL/CDL, звіти екіпажу та технічного персоналу, інформацію з систем моніторингу польотних параметрів і дані про повторювані незначні несправності, які самі по собі можуть не становити загрози, але свідчать про зниження надійності певних систем. DANA-T оцінює динаміку таких подій, їхню частотність, швидкість усунення й взаємозв'язок з іншими технічними показниками. Це дозволяє виявляти слабкі місця у функціонуванні літального апарата, які потенційно можуть призвести до інцидентів.

Особливу увагу система приділяє оцінці технічного стану літака безпосередньо перед польотом. У режимі pre-flight вона збирає дані з бортових датчиків, модулів діагностики та наземних служб, формуючи актуальну картину технічної готовності повітряного судна. Оцінюється стан електронних, гідравлічних, паливних та навігаційних систем, результати останніх технічних оглядів, наявність або відсутність невирішених несправностей і відповідність параметрів вимогам виробника та регуляторів. DANA-T аналізує не лише факт справності, а й стабільність роботи систем, виявляючи приховані відхилення, які ще не проявилися у вигляді відмов, але вже впливають на прогноз ризику.

Також система контролює виконання всіх передпольотних процедур, що стосуються технічної частини. Вона перевіряє коректність заповнення checklists, відповідність конфігурації літака ваговим і метеорологічним умовам,

повноту технічного огляду, своєчасність наземних операцій та відсутність незакритих технічних зауважень. Неточності, затримки чи порушення процедур фіксуються як фактори, що підвищують рівень технічного ризику.

Узагальнюючи всі ці дані, DANA-T формує цілісний технічний індикатор ризику, який інтегрується у загальну прогностичну модель. Такий підхід дозволяє точно оцінювати стан літака, своєчасно виявляти потенційні загрози та підвищувати рівень безпеки польотів шляхом об'єднання конструктивних характеристик, історичного досвіду та актуальних технічних параметрів. Внаслідок цього система забезпечує високий рівень інформаційної підтримки для екіпажу та наземних служб, сприяючи своєчасному прийняттю рішень і мінімізації технічних ризиків.

Для комплексної оцінки можливостей, обмежень та перспектив розвитку інтелектуальної системи прогнозування авіаційних ризиків DANA-T доцільно здійснити SWOT-аналіз. Такий підхід дозволяє систематизувати внутрішні характеристики програми, визначити її конкурентні переваги й уразливості, а також окреслити зовнішні чинники, що можуть сприяти або перешкоджати впровадженню технології у міжнародному авіаційному середовищі. SWOT-аналіз виступає інструментом стратегічного планування, який забезпечує цілісне бачення потенціалу системи, її практичної цінності та напрямів подальшого вдосконалення.

Табл. 3.1.1

#### SWOT-аналіз програми DANA-T

Сильні сторони	Слабкі сторони
<ul style="list-style-type: none"> <li>- працює в режимі реального часу та на етапі pre-flight аналізу;</li> <li>- інтеграція безпосередньо в бортовий комп'ютер (fly-by-wire сумісність);</li> <li>- формує зрозумілий %</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- висока залежність від якості та повноти вхідних даних;</li> <li>- не допускається автоматичне втручання у керування — лише рекомендації;</li> </ul>

<p>індикатор ризику для екіпажу;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- комплексна оцінка технічних, поведінкових і метеорологічних факторів;</li> <li>- знижує вплив людського фактору та підвищує ситуаційну обізнаність;</li> <li>- впливає приховані відхилення, непомітні для традиційних систем.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- складність сертифікації відповідно до вимог EASA/FAA;</li> <li>- висока потреба в регулярному оновленні моделі та її адаптації;</li> <li>- необхідність резервування каналів даних і захисту від кіберзагроз;</li> <li>- початкова залежність від базових моделей інших систем авіоники.</li> </ul>
<b>Можливості</b>	<b>Загрози</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- інтеграція у міжнародні програми безпеки (GADM, ASIAs, Data4Safety);</li> <li>- розширення на всі типи цивільних літаків Airbus і Boeing;</li> <li>- використання у тренажерах та підготовці екіпажів;</li> <li>- розвиток систем технічної діагностики та health-monitoring;</li> <li>- участь у міжнародних ініціативах щодо AI Safety в авіації.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ризик кібератак або несанкціонованого доступу до алгоритму;</li> <li>- потенційне неправильне трактування екіпажем рекомендацій ШІ;</li> <li>- юридичні ризики при аваріях: відповідальність алгоритму vs екіпажу;</li> <li>- невідповідність деяких аеропортів або країн вимогам до обміну даними;</li> <li>- можливість зміни стандартів ICAO, що потребуватиме глибокої модернізації системи.</li> </ul>

Джерело: розроблено самостійно

SWOT-аналіз програми DANA-T дає змогу оцінити її потенціал як інноваційного інструменту забезпечення авіаційної безпеки. До сильних сторін належить поєднання двох режимів роботи — pre-flight аналізу та оцінки ризику в реальному часі, що забезпечує багаторівневий контроль стану безпеки. Інтеграція DANA-T у бортовий комп'ютер літака дозволяє використовувати первинні дані сенсорів без затримок, а застосування штучного інтелекту робить можливим виявлення комплексних або прихованих відхилень, які не фіксуються традиційними системами. Стандартизований відсотковий індикатор ризику спрощує ухвалення рішень екіпажем у стресових умовах.

Разом із тим, слабкими сторонами є значна залежність від якості вхідних даних, необхідність регулярного оновлення алгоритмів та високі вимоги до кіберзахисту. Оскільки DANA-T не має права втручатися в управління без підтвердження екіпажу, її ефективність може частково залежати від швидкості реакції пілотів. Також залишається складною процедура сертифікації, адже система повинна повністю відповідати стандартам ICAO, EASA та FAA.

Серед можливостей програми слід відзначити її потенціал інтеграції у глобальні системи авіаційної безпеки (GADM, ASIAS, Data4Safety), застосування у процесі підготовки екіпажів, використання у тренажерах і можливість масштабування на різні типи повітряних суден. Розробка DANA-T може стати частиною міжнародних ініціатив щодо розвитку етичного та безпечного використання штучного інтелекту в авіації.

До можливих загроз належать ризики кібератак, юридична відповідальність у разі інцидентів, потенційна недовіра екіпажу до рекомендацій ШІ та невідповідність окремих аеропортів або країн вимогам щодо обміну високоточними авіаційними даними. Також зміни у регуляторній базі можуть вимагати суттєвих модифікацій архітектури системи.

Загалом, SWOT-аналіз демонструє, що DANA-T має значний стратегічний потенціал для підвищення рівня авіаційної безпеки та може стати важливим елементом цифрової трансформації цивільної авіації за умови дотримання стандартів інформаційної безпеки та міжнародної сертифікації.

Матриця 1. Матриця подолання критичного стану

Критичні загрози	Працює в реальному часі та підвищує ситуаційну обізнаність екіпажу	Інтеграція в бортовий комп'ютер та аналіз прихованих відхилень	Стандартизований % показник ризику та ІІІ для багатофакторного аналізу
Ризик кібератак або несанкціонованого доступу	Використання обмежених внутрішніх каналів обміну даними мінімізує можливість проникнення в систему під час польоту.	Глибока інтеграція у авіоніку робить систему менш доступною для зовнішніх втручань, оскільки критичні модулі не мають зовнішнього доступу.	Виявлення аномалій у поведінці систем забезпечує раннє сповіщення про потенційні кіберзагрози.
Потенційне неправильне трактування екіпажем рекомендацій ІІІ	Відображення в реальному часі стабілізує стан екіпажу та дає змогу отримати чіткі сигнали про небезпеку.	Програмна логіка подає лише найважливіші сигнали, синхронізовані з бортовими системами, що зменшує ризик неправильних рішень.	Стандартизований % ризику робить інформацію зрозумілою, знижуючи ймовірність непорозумінь.

Юридичні ризики та конфлікт відповідальності між екіпажем і ШІ	Динамічний моніторинг забезпечує журналювання реальних дій екіпажу, що спрощує розслідування інцидентів.	Інтеграція дозволяє точно визначати, де виникла проблема — у техніці чи у неправильно виконаних діях.	Прозорий індикатор ризику може використовуватись як доказ обґрунтованості дій екіпажу.
Невідповідність окремих аеропортів міжнародним вимогам обміну даними	Оцінка ризику в реальному часі компенсує нестачу наземних даних у країнах з низьким рівнем цифровізації.	Автономна робота з авіонікою дозволяє отримувати достовірні дані без залежності від якості інфраструктури аеропорту.	Прогностичні моделі допомагають передбачати ризикові ситуації навіть без зовнішніх потоків інформації.
Зміни міжнародних стандартів ICAO, EASA, FAA	Гнучкість моделі реального часу дозволяє швидко адаптувати систему під нові вимоги.	Структура інтеграції дає можливість оновлювати модулі без зміни всього бортового ПЗ.	Алгоритмічні моделі можна легко переналаштовувати під нові нормативні шкали ризику.

Джерело: розроблено самостійно

Матриця подолання критичного стану демонструє, що програма DANA-T має значний потенціал нейтралізувати ключові загрози авіаційній безпеці та

перетворити власні сильні сторони на стратегічні переваги. Завдяки інтеграції з бортовою авіонікою, роботі в реальному часі та стандартизованому відсотковому індикатору ризику система здатна компенсувати недоліки зовнішньої інфраструктури, мінімізувати людські помилки та підвищувати прозорість рішень екіпажу. Запропоновані стратегічні підходи підтверджують, що DANA-T може ефективно функціонувати навіть в умовах кіберзагроз, нормативних змін чи обмеженості наземних даних. Таким чином, програма виступає перспективним інструментом підсилення міжнародних стандартів безпеки польотів та здатна забезпечити додатковий рівень захисту цивільної авіації.

Інтеграція DANA-T у повітряні судна Boeing має стратегічний характер, оскільки програма повністю відповідає актуальним потребам корпорації у сфері цифрового контролю ризиків та аналітики великих даних. На відміну від традиційних систем індикації, DANA-T працює як автономний інтелектуальний модуль, що аналізує всі бортові параметри, включаючи телеметрію, стан авіоніки, роботу двигунів, траєкторію польоту, навантаження конструкцій та показники сенсорів. Така архітектура робить систему універсальною для всіх родин літаків Boeing — від 737NG і 777 до 787 Dreamliner, оскільки під час встановлення програма отримує інформацію про модель, рік виробництва та конфігурацію, які залишаються незмінними і формують індивідуальний профіль ризику для конкретного типу повітряного судна.

Для Boeing DANA-T є особливо цінною з огляду на досвід корпорації з кризовими ситуаціями — зокрема, у випадку 737 MAX та проблемою автоматизованої системи MCAS. Програма здатна аналізувати взаємодію систем управління, виявляти небезпечні конфлікти між даними сенсорів та формувати прогностичні індикатори ризику задовго до того, як відхилення призведе до критичної ситуації. Таким чином, DANA-T допомагає усунути структурну вразливість, яка виникає внаслідок складності бортових алгоритмів та залежності від окремих сенсорів.

У практичному вимірі DANA-T підсилює корпоративні інструменти Boeing -

Airplane Health Management (AHM) та Boeing AnalytX. Програма надає не лише технічні оцінки, а й об'єднує поведінкові, метеорологічні та організаційні фактори, формуючи комплексний інтегральний показник ризику у відсотковому форматі. Це дозволяє операторам і технічним службам отримувати глибшу картину стану конкретного борту, прогнозувати потенційні інциденти та оптимізувати планування обслуговування. Для екіпажу перевага полягає у можливості отримувати контекстні рекомендації у разі виникнення аварійної небезпеки, що знижує вплив людського фактора.

У підсумку, DANA-T є інструментом, який не замінює існуючі системи Boeing, а працює паралельно з ними, створюючи новий рівень аналітичної підтримки для екіпажів, інженерів та флот-менеджерів. Це відповідає стратегічній тенденції корпорації щодо переходу до проактивного управління ризиками та цифрової трансформації авіабезпеки.

Для Airbus програма DANA-T має важливе значення як автономна надбудова, що працює окремо від існуючої архітектури fly-by-wire та не втручається у критичні системи, такі як ECAM, FWS або автоматизовані алгоритми управління літаком. Це суттєва перевага з погляду сертифікації та відповідності філософії Airbus, яка передбачає максимальну стабільність і незмінність ядра авіоніки. DANA-T зчитує всі доступні бортові параметри, обробляє їх у реальному часі та формує власний індикатор ризику, подаючи інформацію у вигляді окремого програмного модуля або додаткового каналу індикації, що не змінює логіки відображення ECAM.

Особливо важливо те, що DANA-T здатна доповнити існуючу систему Airbus ROPS. Оскільки ROPS аналізує лише один тип ризику — вихід літака за межі ЗПС під час приземлення - DANA-T розширює цю логіку на набагато ширший спектр загроз: аномалії двигунів, небезпечні траєкторії, перевантаження літака, відмови сенсорів, поведінкові помилки екіпажу та метеорологічні ризики. Програма виступає “мета-аналітиком”, що співставляє інформацію ROPS з іншими даними і дає комплексну оцінку ситуації, не змінюючи структури роботи самої системи ROPS.

Для Airbus важливо й те, що DANA-T може передавати результати аналізу у Skywise, де дані використовуватимуться для глибокого технічного та експлуатаційного аналізу флоту. Це посилює можливості прогнозного технічного обслуговування, оптимізації ресурсів та виявлення довгострокових тенденцій авіаційних ризиків. DANA-T стає не лише “порадником у кабіні”, але й цінним джерелом даних для корпорації на землі.

У цьому випадку програма DANA-T відповідає філософії Airbus: автономність, підвищена безпека, високий рівень цифрової інтеграції та мінімальне втручання у критичні елементи авіоніки. Вона забезпечує нову якість аналізу польотних даних і перетворює традиційні підходи до оцінювання ризиків, формуючи ситуаційну обізнаність, яка доповнює вже існуючі лінії захисту Airbus.

### **3.2. Інформаційна візуалізація результатів прогнозу**

Інформаційна візуалізація є центральним елементом взаємодії між програмою DANA-T та екіпажем повітряного судна. Як окрема бортова система з власним дисплейним модулем, DANA-T забезпечує миттєве, інтуїтивне та когнітивно оптимізоване представлення аналітичних даних про стан безпеки польоту. Її інтерфейс створений відповідно до вимог ICAO, EASA та принципів когнітивної ергономіки, згідно з якими інформація має бути подана максимально компактно, виразно та зрозуміло, без перевантаження екіпажу зайвими текстами або технічними подробицями.

У системі передбачено чітку колірну диференціацію: зелений колір відображає нормальні параметри, жовтий сигналізує про попереджувальний стан, а червоний — про критичний рівень загрози. Таке кодування відповідає міжнародним стандартам індикації та забезпечує автоматичне і швидке розпізнавання ситуації навіть у складних або стресових умовах. Кольорова логіка в DANA-T є основою інтерфейсу, оскільки вона зменшує час на інтерпретацію даних і мінімізує когнітивне навантаження, що є критично

важливим для екіпажу у фазах злету, посадки чи турбулентності.



Рис. 1. Інтерфейс програми DANA-T

Джерело: розроблено самостійно

Окремим ключовим елементом інтерфейсу є відсотковий рівень ризику. На відміну від традиційних систем, що подають лише попередження «fault» або «warning», DANA-T формує інтегральний показник ймовірності інциденту. Увесь діапазон поділено на чотири інтерпретаційні сегменти: 0–20 % позначає незначний рівень ризику, не потребує оперативних дій і суперечить лише мінімальним статистичним коливанням; 20–50 % означає необхідність підвищеної уваги та моніторингу ситуації; 50–80 % сигналізує, що екіпаж повинен зосередитися на деталях, які система виділяє як потенційно проблемні; понад 80 % свідчить про критичний стан, за якого вмикається спеціальний режим візуалізації та рекомендацій для негайної дії.

DANA-T не відображає рівень ризику постійно. Система активується лише після досягнення порогу 20 %, тобто починаючи з попереджувальної фази. Такий режим роботи мінімізує візуальний шум у кабіні, не займає робоче поле дисплеїв і не створює зайвих подразників у нормальному режимі польоту. Однак після активації інтерфейс працює в кількох адаптивних режимах, що змінюються залежно від поведінки ризику та умов польоту.



Рис. 2. Приклад вигляду програми при підвищенні рівня небезпеки до критичного

Джерело: розроблено самостійно



Рис. 3. Приклад вигляду програми при підвищенні рівня небезпеки від мінімальної позначки

Джерело: розроблено самостійно

Загальний дисплей системи містить три основні блоки: індикатор ризику, список ключових факторів, що вплинули на прогноз, та короткий рекомендаційний блок “advisory”. Усі рекомендації подаються короткими текстовими формулюваннями (3–6 слів), що відповідає стандартам

ЕСАМ/ЕІСАС і дозволяє екіпажу миттєво переходити до дії. Застосування коротких команд («Check flaps», «Reduce pitch», «Correct thrust», «Monitor turbulence inputs») є оптимальним варіантом, оскільки забезпечує баланс між інформативністю та швидкістю розуміння.

Список факторів ризику подається у вигляді графічно відокремлених блоків, що дозволяє швидко оцінити, яка саме категорія — технічна, метеорологічна, поведінкова або траєкторна — є основним джерелом проблеми. Алгоритм автоматично ранжує ці фактори за ступенем впливу, піднімаючи найважливіші на верхню позицію списку. Це дає змогу екіпажу одразу зрозуміти пріоритет дій.

Адаптивність візуалізації є одним із найбільш інноваційних елементів DANA-T. У нормальних умовах система працює в стандартному режимі індикації. У разі турбулентності, низької видимості або інтенсивного керування вона переходить у спрощений режим, прибираючи другорядні елементи інтерфейсу та зберігаючи лише критично важливі сигнали. Якщо ж ризик перевищує 80 %, активується «Emergency Mode», який автоматично змінює конфігурацію інтерфейсу: індикатори збільшуються, система фокусує увагу на одному ключовому факторі, підсилює контрастність кольорів та подає звукові сигнали (але лише в умовах критичного порогу), уникаючи надмірного навантаження у менш інтенсивних ситуаціях.



Рис. 4. Вигляд інтерфейсу під час роботи «Emergency Mode»,  
Джерело: розроблено самостійно

Хоча система не містить спеціального нічного режиму, її інтерфейс автоматично підпорядковується загальним налаштуванням освітлення бортових дисплеїв. Це дозволяє уникати надмірного контрасту чи сліпучих елементів у нічних польотах, зберігаючи при цьому високу читабельність.



Рис. 5. Спрощений режим роботи програми при нормальній ситуації польоту

Джерело: розроблено самостійно

Загалом інформаційна візуалізація в DANA-T виконує не лише роль відображення ризику, але й слугує інтелектуальним інструментом підтримки рішень. Чітка архітектура інтерфейсу, мінімізація когнітивного навантаження та адаптивність до ситуаційних змін роблять систему ефективною навіть у високостресових режимах польоту. Візуальні принципи DANA-T дозволяють екіпажу зосередитися на ключовому, уникаючи перевантаження інформацією й значно скорочуючи час реакції — фактор, що має вирішальне значення для попередження катастроф у сучасній авіації.

### **3.3. Міжнародна співпраця та етичні аспекти застосування штучного інтелекту в авіації**

Впровадження систем штучного інтелекту у сферу цивільної авіації створює нові можливості для підвищення рівня безпеки польотів, однак водночас порушує низку важливих етичних питань. З огляду на критичність авіаційної галузі, де будь-яка системна помилка може мати катастрофічні наслідки, етичні стандарти застосування алгоритмів набувають фундаментального значення. Технології, що впливають на прийняття рішень екіпажем, повинні бути максимально прозорими, контрольованими людиною і підпорядкованими суворим нормативним вимогам. У цьому контексті постає необхідність комплексного осмислення етичної складової використання таких систем, як DANA-T, у реальних авіаційних операціях.

Одним із ключових аспектів є прозорість алгоритмів. На відміну від комерційних застосунків, у сфері авіаційної безпеки неприпустиме використання моделей із принципом «чорної скриньки», коли механізм формування рішення залишається непрозорим. Пілот має розуміти не лише сам факт підвищення ризику, а й логіку, яка призвела систему до відповідного розрахунку. Згідно з міжнародними підходами ICAO та EASA, алгоритм, що впливає на поведінку екіпажу, повинен бути інтерпретованим, а джерела даних

— ідентифікованими [70]. Саме тому DANA-T реалізує механізм пояснюваності прогнозів: система не просто видає відсотковий показник ризику, а демонструє фактори, що стали підставою для його зростання. Це забезпечує довіру екіпажу до результатів прогнозу та мінімізує небезпеку неправильного тлумачення даних.

Не менш важливою є проблема відповідальності. Використання штучного інтелекту ставить питання про те, хто повинен нести відповідальність у випадку помилкового прогнозу — пілот, авіакомпанія, виробник літака чи розробник програмного забезпечення. Міжнародні нормативні моделі сьогодні не дають однозначної відповіді на це питання. У контексті системи DANA-T відповідальність зберігається за людиною: пілот отримує рекомендацію, але остаточне рішення залишається за ним, що відповідає базовому принципу "human in command". Водночас виробники програмного забезпечення повинні гарантувати належну якість алгоритмів, а авіакомпанії — забезпечувати коректне налаштування та сертифікацію системи.

Питання конфіденційності також має особливе значення. DANA-T опрацьовує великий обсяг персональних та професійних даних про пілотів, включно з оцінками їх реакції, психологічними характеристиками, історією виконання процедур і результатами тренажерних перевірок. Такі дані є чутливими і можуть бути використані неправомірно у разі відсутності належних захисних механізмів. Етичний підхід вимагає, щоб доступ до подібної інформації мали лише уповноважені органи авіакомпанії, а обробка здійснювалася у зашифрованому вигляді. Окрім цього, дані про технічні несправності також є стратегічно важливими: їх витік може створити ризики для безпеки польотів, репутації авіакомпанії чи навіть національної безпеки.

Окрему увагу займає питання недопущення дискримінації. Алгоритм прогнозування не повинен робити висновки про надійність пілота на підставі особистих характеристик, таких як вік, національність, стать, попередній досвід, якщо ці показники не мають безпосереднього відношення до безпеки. Усі рішення алгоритму мають базуватися виключно на професійних і

поведінкових параметрах, що відображають реальну здатність пілота забезпечувати безпечний політ. Це відповідає міжнародним етичним стандартам і принципам справедливості у використанні ШІ.

Нарешті, ключовим етичним принципом є збереження людського контролю над системою штучного інтелекту. ICAO та EASA наголошують, що автоматизовані технології у цивільній авіації не можуть замінювати рішень екіпажу у критичних ситуаціях. Вони повинні залишатися допоміжними інструментами, що надають рекомендації та індикатори, але не приймають рішень замість людини. Це цілком відповідає логіці роботи DANA-T, яка не втручається у керування літаком і не активує жодних автоматизованих режимів, а виключно формує оцінку ризику та надає екіпажу поради для запобігання розвитку небезпечної ситуації [71].

Таким чином, етичні аспекти використання штучного інтелекту в авіації визначають не лише технічні, але й соціальні, правові та психологічні рамки впровадження таких систем. Забезпечення прозорості алгоритмів, захист персональних даних, уникнення дискримінації, чітке визначення відповідальності та збереження пріоритету людського контролю формують основу безпечної інтеграції ШІ у сферу авіаційних перевезень. DANA-T, побудована відповідно до цих принципів, демонструє можливість гармонійного поєднання технологічних інновацій та високих етичних стандартів.

Незважаючи на стрімкий розвиток цифрових технологій у сфері цивільної авіації, нормативно-правове поле, що регулює використання штучного інтелекту, залишається фрагментованим та неповним. На сьогодні міжнародні організації формують окремі рекомендаційні документи, однак відсутня цілісна, узгоджена та обов'язкова для всіх держав система правил, яка б регламентувала розробку, сертифікацію та експлуатацію ШІ у критичних авіаційних процесах. Це створює низку викликів як для національних авіаційних адміністрацій, так і для виробників бортових систем, авіакомпаній та розробників програмного забезпечення.

Першою прогалиною є відсутність міжнародно затвердженого стандарту для

прогностичних систем безпеки польотів, таких як DANA-T. Існуючі акти ICAO, EASA та FAA переважно регулюють питання цифровізації, кіберзахисту та взаємодії людини й автоматизованих систем, але не охоплюють алгоритми прогнозування ризиків, що працюють у реальному часі. Немає чітких вимог щодо того, якими мають бути пороги точності, рівень пояснюваності, гнучкість або відповідальність таких систем.

Другою проблемою є відсутність глобальної етичної рамки для застосування ШІ в авіації. Хоча є окремі документи з етики ШІ на загальному рівні (як-от OECD AI Principles або EU AI Act), вони не враховують специфіку авіаційної діяльності, де помилка алгоритму може призвести до загибелі людей. У цих умовах потрібні спеціалізовані норми, що регламентують прозорість моделей, допустимий рівень автономності систем, вимоги до некорупційності даних і механізми контролю над алгоритмами.

Третій аспект стосується використання та обміну даними. Для ефективного функціонування систем прогнозування необхідні великі масиви авіаційних даних, зокрема інформація про інциденти, поведінкові фактори екіпажу, технічні відмови та метеорологічні умови. Проте на практиці держави обмежують обмін такими даними з міркувань безпеки, комерційної конфіденційності та правового захисту персональної інформації. Відсутність єдиних правил щодо збирання, деперсоналізації та транскордонного обміну даними сповільнює розвиток глобальних систем аналізу ризиків.

Четвертим викликом є юридична невизначеність щодо відповідальності за наслідки роботи алгоритмів. Сьогодні міжнародне авіаційне право оперує категоріями «помилки екіпажу», «технічної несправності» або «помилки оператора», однак не містить поняття «алгоритмічна помилка» чи «недостатня точність прогнозу». У результаті неможливо визначити, хто несе відповідальність у разі, якщо система дала хибний прогноз: виробник ПЗ, авіакомпанія, розробник алгоритму чи орган, що сертифікував його застосування.

Усі ці прогалини свідчать про нагальну потребу у створенні нового покоління міжнародних норм. Держави та міжнародні організації повинні

розробити узгоджені правила щодо сертифікації прогнозних алгоритмів, формалізувати вимоги до прозорості та відповідальності в системах ШІ, а також створити умови для безпечного й етичного використання великих авіаційних даних. Лише формування єдиної глобальної нормативної структури дозволить забезпечити ефективне, відповідальне та безпечне застосування систем штучного інтелекту в авіації, зокрема таких інноваційних рішень, як DANA-

## ВИСНОВКИ

У результаті проведеного аналізу сформовано цілісне уявлення про авіаційну безпеку як багатовимірне явище, що поєднує технічні, правові, організаційні та інформаційні компоненти. Авіаційна безпека в сучасних умовах виходить за межі традиційного контролю льотної придатності та розглядається як динамічна система управління ризиками, функціонування якої значною мірою залежить від якості інформаційних потоків, рівня аналітичної обробки даних і здатності систем прогнозувати небезпечні тенденції ще до виникнення критичних подій. Це дозволяє трактувати авіаційну безпеку як елемент глобального інформаційного простору, у якому своєчасність, достовірність і повнота даних мають вирішальне значення

Нормативно-правове поле у сфері авіаційної безпеки демонструє високий рівень уніфікації на міжнародному рівні. Стандарти ІКАО, положення Annex 19 та універсальні конвенції створюють правову основу, яка орієнтує держави не лише на формальне дотримання процедур, а на впровадження системної, ризик-орієнтованої моделі управління безпекою. В українських реаліях ця модель уже частково реалізована через національне законодавство та діяльність Державіаслужби, що відкриває можливості для подальшої цифрової трансформації галузі.

Цифрова трансформація авіаційної галузі суттєво переорієнтовує підходи до забезпечення безпеки польотів, зміщуючи фокус із післяаварійного реагування на раннє виявлення та попередження ризиків. Разом із розширенням можливостей аналізу зростає й уразливість систем до нових типів загроз, зокрема кіберпосягань, спотворення або втрати критично важливої інформації та цілеспрямованого впливу на інформаційні потоки. За таких умов підтримання належного рівня авіаційної безпеки стає неможливим без інтеграції ефективних механізмів захисту даних і кіберстійкості в загальну систему управління ризиками.

Комплексний аналіз факторів авіаційних катастроф підтвердив, що домінування

людського чинника не зменшується навіть за високого рівня автоматизації. Помилки екіпажів, втома, недоліки організаційної культури та прогалини у взаємодії між підрозділами залишаються ключовими тригерами інцидентів. Технічні несправності, метеорологічні умови й зовнішні впливи здебільшого не виступають самостійною причиною катастроф, а лише активують уже наявні системні слабкості.

Штучний інтелект у цьому контексті виконує функцію інтелектуального посередника між людиною та складними технічними системами. Його використання дозволяє перейти від фрагментарного аналізу до побудови повних ризик-профілів літаків, екіпажів і маршрутів. Алгоритми машинного навчання демонструють високу здатність до виявлення аномалій, прогнозування відмов та формування сценаріїв розвитку небезпечних ситуацій, що суттєво підсилює потенціал превентивного управління.

Сформована інформаційно-аналітична модель прогнозування ризиків орієнтована на інтеграцію технічних, поведінкових і середовищних показників у єдине аналітичне ядро. Такий підхід забезпечує не лише оцінювання поточного рівня безпеки, а й динамічне відстеження змін у системі безпеки з можливістю адаптації до нових умов експлуатації.

Алгоритм оцінки авіаційного ризику дозволяє формалізувати процес прийняття рішень і мінімізувати суб'єктивний вплив людини на критичних етапах аналізу. Його застосування створює основу для стандартизації підходів до управління безпекою як на рівні окремих авіакомпаній, так і в межах міжнародних авіаційних альянсів.

Запропонована концепція цифрової програми з аналізу авіаційних ризиків орієнтована на підтримку управлінських рішень, прозорість аналітичних процедур та інтуїтивну візуалізацію результатів. Такий інструмент здатний стати елементом стратегічного управління безпекою, що поєднує дані, технології та людський досвід у межах єдиного цифрового середовища.

Вивчення міжнародних стратегій упровадження систем прогнозування підтверджує, що технологічні інновації є ефективними лише за умови розвитку

культури безпеки, постійного навчання персоналу та дотримання етичних принципів використання штучного інтелекту. Саме синергія між нормативною базою, інформаційними технологіями та людським потенціалом формує нову парадигму авіаційної безпеки, орієнтовану на попередження ризиків, а не на реагування на наслідки.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ЛІТЕРАТУРИ

1. Міжнародна організація цивільної авіації (ІКАО). Global Aviation Security Plan : Doc 10118. Second Edition. – Монреаль : ICAO, 2024. – 64 с
2. Aviation Safety URL: <https://www.kcaa.or.ke/safety-security-oversight/aviation-safety>
3. Повітряний Кодекс України URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3393-17#Text>
4. Повітряний кодекс України || від 19.05.2011р. - № 3393-VI(редакція 15.11.2024р.) URL: [https://protocol.ua/ua/povitryaniy\\_kodeks\\_ukraini\\_vid\\_19\\_05\\_2011\\_339\\_3\\_vi/](https://protocol.ua/ua/povitryaniy_kodeks_ukraini_vid_19_05_2011_339_3_vi/)
5. Стаття 85. Організація забезпечення авіаційної безпеки URL: [https://protocol.ua/ua/povitryaniy\\_kodeks\\_ukraini\\_vid\\_19\\_05\\_2011\\_339\\_3\\_vi\\_stattya\\_85/](https://protocol.ua/ua/povitryaniy_kodeks_ukraini_vid_19_05_2011_339_3_vi_stattya_85/)
6. Стаття 82. Забезпечення безпеки польотів повітряних суден URL: [https://protocol.ua/ua/povitryaniy\\_kodeks\\_ukraini\\_stattya\\_82/](https://protocol.ua/ua/povitryaniy_kodeks_ukraini_stattya_82/)
7. Стаття 71. Організація авіаційної безпеки URL: [https://protocol.ua/ua/povitryaniy\\_kodeks\\_ukraini\\_stattya\\_71](https://protocol.ua/ua/povitryaniy_kodeks_ukraini_stattya_71)
8. Постанова Про затвердження Положення про використання повітряного простору України URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/954-2017-%D0%BF#Text>
9. Safety Management URL: <https://www.faa.gov/about/initiatives/sms/international>
10. Convention on International Civil Aviation (Chicago Convention), 1944. URL: <https://www.icao.int/publications/pages/doc7300.aspx>
11. Convention on Offences and Certain Other Acts Committed on Board Aircraft URL: [chrome extension://efaidnbnmnnibpcajpeglcleftindmkaj/https://www.legaltools.org/doc/97e04a/pdf/](https://www.legaltools.org/doc/97e04a/pdf/)
12. Конвенція про боротьбу з незаконним захопленням повітряних суден

- URL: [https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995\\_167#Text](https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_167#Text)
- 13..Convention for the Suppression of Unlawful Acts Against the Safety Of Civil Aviation URL: <https://www.state.gov/icao-sabotage>
  14. Most Common Causes of Aviation Accidents URL: <https://www.arnolditkin.com/blog/injury/most-common-causes-of-aviation-accidents/>
  15. What Are the Common Causes of Plane Crashes? URL: <https://www.wkw.com/aviation-accidents/faqs/what-are-the-common-causes-of-aviation-accidents/>
  - 16..Odds of Dying URL: <https://injuryfacts.nsc.org/all-injuries/preventable-death-overview/odds-of-dying/>
  17. 2023 Safest Year for Flying By Several Parameters URL: <https://www.iata.org/en/pressroom/2024-releases/2024-02-28-01/>
  18. Чому літаки падають: розбираємо причини наймасштабніших авіакатастроф URL: <https://thepage.ua/ua/news/chomu-litaki-padayut-rozbirayemo-prichini-najmasshtabnishih-aviakatastrof>
  19. Statistical Summary of Commercial Jet Airplane Accidents URL: [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://www.boeing.com/content/dam/boeing/boeingdotcom/company/about\\_bca/pdf/statsum.pdf](chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://www.boeing.com/content/dam/boeing/boeingdotcom/company/about_bca/pdf/statsum.pdf)
  20. Powerless over London: The crash of British Airways flight 38 URL: <https://admiralcloudberg.medium.com/powerless-over-london-the-crash-of-british-airways-flight-38-7b2e20075f26>
  21. Swissair flight 111 URL: <https://www.britannica.com/event/Swissair-flight-111>
  22. Грищенко Ю. В., Варченко О. І., Гуленко В. Д. Розроблення перспективних програм та методик підготовки пілотів на комплексному тренажері літака з використанням процесного підходу // Вісник Національного авіаційного університету. – 2007. – № 3–4. – С. 90–93
  23. Final Report URL: [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/AirFrance447\\_BEA.pdf](chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/AirFrance447_BEA.pdf)

24. Три катастрофи, які змінили цивільну авіацію URL: <https://was.media/microformats/katastrofi-jaki-zminili-aviaciju/>
25. Інтеграція штучного інтелекту та фокус на доступності: еволюція аеропортів у 2024 році URL: <https://life.obozrevatel.com/ukr/section/travel/news-integratsiya-iskusstvennogo-intellekta-i-fokus-na-dostupnosti-evolyutsiya-aeroportov-v-2024-godu-02-06-2024.html>
26. Report BEA – Final Report on the Accident F-GMLU (20 December 2009) URL: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://skybrary.aero/sites/default/files/bookshelf/2731.pdf>
27. Skybrary. Spanair Flight 5022 Accident (MD-82, Madrid-Barajas 2008) URL: <https://skybrary.aero/accidents-and-incidents/md82-madrid-barajas-spain-2008>
28. Шмельова, Т. Ф., Сікірда, Ю. В., & Ассаул, О. Ю. (2015). Influence of the factors of the aviation enterprise's management environment on the safety of aviation activity. *Technology Audit and Production Reserves*, 2(3(22)), 17–24
29. The Impact Of Artificial Intelligence On The Aviation Sector URL: [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.icao.int/sites/default/files/Meetings/a42/Documents/WP/wp\\_389\\_en.pdf](chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.icao.int/sites/default/files/Meetings/a42/Documents/WP/wp_389_en.pdf)
30. Enhancing the Ability of Flight Safety Risk Management with the Empowerment of Digital & Intelligent Technology URL: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/file:///C:/Users/admin/Downloads/126008776.pdf>
31. Brown T, Mann B, Ryder N. Language models are few-shot learners[J]. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2020:1877-1901
32. Ouyang L, Wu J, Jiang X. Training language models to follow instructions with human feedback[J]. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2022
33. Wang Wenzheng, Zheng Kunpeng, Chen Gong, He Kaifeng. Application research of datamining method to flight test data analysis and aerodynamic parameter identification[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, Vol.34, No.6, Dec.2016

34. Yan C L. Development and Prospect of Aircraft Structural Life Reliability of Assessment Technology in China[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica,2022,43(10),527869(in Chinese).
35. XU Zhiyao. Research on Patrol Inspection of Aircraft Movement Area Apron Fire Equipment Based on GIS Technology[J]. Journal of Civil Aviation, Vol.3, No.6, Nov,2019:83-87.
- 36..Li G, Peng X, Wang QX, Xie T, Jin Z, Wang J, Ma XX, Li XD. Challenges from LLMs as a Natural Language Based Human-machine Collaborative Tool for Software Development and Evolution[J]. Ruan Jian Xue Bao Journal of Software,2023, 34(10): 4601–4606 (in Chinese).
- 37.Artificial Intelligence in Aviation Safety: Systematic Review and Biometric Analysis URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s44196-024-00671-w>
- 38.AI-Based Predictive Analytics for Aircraft Engine Failures: From Pattern Recognition to Real-Time Intervention URL: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.ijfmr.com/papers/2025/5/56362.pdf>
- 39.Enabling Safety from Data: Machine Learning/Artificial Intelligence for In-Time Aviation Safety URL: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20210018418/downloads/FSF%20ML%20AI%20for%20In-Time%20Aviation%20Safety-final.pdf>
- 40.Challenges and prospects of artificial intelligence in aviation: a bibliometric study URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666764924000626>
- 41.Artificial Intelligence (AI) Contribution To Aviation URL: [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.icao.int/sites/default/files/Meetings/a42/Documents/WP/wp\\_489\\_en.pdf](chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.icao.int/sites/default/files/Meetings/a42/Documents/WP/wp_489_en.pdf)
- 42.ICAO Annex 19 ‘Safety Management’ URL: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/ICAO-annex-19.pdf>

43. Airspace Modernisation Ground Infrastructure URL:  
<https://www.caa.co.uk/commercial-industry/airspace/airspace-modernisation/airspace-modernisation-ground-infrastructure/>
44. Flight Data Monitoring (FDM) URL:  
<https://skybrary.aero/articles/flight-data-monitoring-fdm>
45. Introduction to Data4Safety (D4S) URL: <https://tinyurl.com/yynyzxmk>
46. Automatic Dependent Surveillance - Broadcast (ADS-B) URL:  
[https://www.faa.gov/about/office\\_org/headquarters\\_offices/avs/offices/afx/afs/afs400/afs410/ads-b](https://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/avs/offices/afx/afs/afs400/afs410/ads-b)
47. Метод отримання тінювих зображень об'єктів контролю для телеметричних доглядових систем URL: <https://tinyurl.com/y3nkxw8h>
48. Annex 11 - Air Traffic Services URL: <https://elibrary.icao.int/product/223637>
49. Mode S Downlink Aircraft Parameters Implementation And Operations Guidance Document URL: <https://tinyurl.com/48m2a28t>
50. Your path to the EASA Safety Authorization URL:  
<https://tinyurl.com/464x5w3m>
51. What is a NOTAM? URL:  
[https://www.faa.gov/about/initiatives/notam/what\\_is\\_a\\_notam](https://www.faa.gov/about/initiatives/notam/what_is_a_notam)
52. Guide to Methods & Tools for Airline Flight Safety Analysis URL:  
 chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://skybrary.aero/sites/default/files/bookshelf/237.pdf
53. Improvement of data flow management in the air traffic control automation system URL:  
 chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/file:///C:/Users/admin/Downloads/Improvement+of+data+flow+management+in+the+air+traffic+control+automation+system.pdf
54. Digital evolution in the aviation sector and how big data is transforming the industry. URL:  
[https://www.researchgate.net/publication/378555626\\_Digital\\_evolution\\_in\\_the\\_aviation\\_sector\\_and\\_how\\_big\\_data\\_is\\_transforming\\_the\\_industry](https://www.researchgate.net/publication/378555626_Digital_evolution_in_the_aviation_sector_and_how_big_data_is_transforming_the_industry)

- 55.Методики оцінки ризиків у системі безпеки авіації URL:  
[https://www.researchgate.net/publication/385243083\\_METHODIKI\\_OCINKI\\_RIZIKIV\\_U\\_SISTEMI\\_BEZPEKI\\_AVIACII](https://www.researchgate.net/publication/385243083_METHODIKI_OCINKI_RIZIKIV_U_SISTEMI_BEZPEKI_AVIACII)
- 56.Управління ризиками в авіації: The Ultimate Guide URL:  
<https://tinyurl.com/42jbtmmh>
- 57.Аналіз регуляторного впливу проекту наказу Міністерства інфраструктури України «Про затвердження Інструкції з оцінки рівня загрози безпеці цивільної авіації України» URL:  
<https://tinyurl.com/38fhfnfe>
- 58.Beyond aviation human factors : safety in high technology systems URL:  
<https://archive.org/details/beyondaviationhu0000unse>
- 59.Erik Hollnagel: Safety-I and Safety-II, the past and future of safety management URL:  
[https://www.researchgate.net/publication/285396555\\_Erik\\_Hollnagel\\_Safety-I\\_and\\_Safety-II\\_the\\_past\\_and\\_future\\_of\\_safety\\_management](https://www.researchgate.net/publication/285396555_Erik_Hollnagel_Safety-I_and_Safety-II_the_past_and_future_of_safety_management)
- 60.Layers in Artificial Neural Networks (ANN) URL:  
<https://www.geeksforgeeks.org/deep-learning/layers-in-artificial-neural-networks-ann/>
- 61.Preventing the Next Accident: How AI and Data-Driven Safety Can Change Aviation Safety URL: <https://vimeo.com/1090632865>
- 62.Filtering Techniques for ADS-B Trajectory Preprocessing URL:  
[https://www.researchgate.net/publication/390064664\\_Filtering\\_Techniques\\_for\\_ADS-B\\_Trajectory\\_Preprocessing](https://www.researchgate.net/publication/390064664_Filtering_Techniques_for_ADS-B_Trajectory_Preprocessing)
- 63.Preprocessing of Flight Data URL:  
[https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-53430-4\\_2](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-53430-4_2)
- 64.Random Forests and Decision Trees URL:  
[https://www.researchgate.net/publication/259235118\\_Random\\_Forests\\_and\\_Decision\\_Trees](https://www.researchgate.net/publication/259235118_Random_Forests_and_Decision_Trees)
- 65.Data Science and Machine Learning (Part 23): Why LightGBM and XGBoost outperform a lot of AI models? URL: <https://www.mql5.com/en/articles/14926>

66. Back-Testing: Precision Meets Perspective URL:  
[https://www.linkedin.com/posts/pratik-bagaria\\_backtesting-activity-7384130887921131520-tJma/](https://www.linkedin.com/posts/pratik-bagaria_backtesting-activity-7384130887921131520-tJma/)
67. Методики оцінки ризиків у системі безпеки авіації URL:  
[https://www.researchgate.net/publication/385243083\\_METHODIKI\\_OCINKI\\_RIZIKIV\\_U\\_SISTEMI\\_BEZPEKI\\_AVIACII](https://www.researchgate.net/publication/385243083_METHODIKI_OCINKI_RIZIKIV_U_SISTEMI_BEZPEKI_AVIACII)
68. Оцінка загроз та ризиків авіаційній безпеці URL:  
<https://avia.gov.ua/bezpeka-aviatsiyi/aviatsijna-bezpeka/otsinka-zagroz-ta-ryzykiv-aviatsijnij-bezpetsi/>
69. Оцінювання ризику в системі забезпечення безпеки польотів державної авіації України URL:  
[https://www.researchgate.net/publication/337461190\\_Ocinuvanna\\_riziku\\_v\\_sistemi\\_zabezpecenna\\_bezpeki\\_polotiv\\_derzavnoi\\_aviacii\\_Ukraini/fulltext/5dd89ac8458515dc2f459b29/Ocinuvanna-riziku-v-sistemi-zabezpecenna-bezpeki-polotiv-derzavnoi-aviacii-Ukraini.pdf](https://www.researchgate.net/publication/337461190_Ocinuvanna_riziku_v_sistemi_zabezpecenna_bezpeki_polotiv_derzavnoi_aviacii_Ukraini/fulltext/5dd89ac8458515dc2f459b29/Ocinuvanna-riziku-v-sistemi-zabezpecenna-bezpeki-polotiv-derzavnoi-aviacii-Ukraini.pdf)
70. The ethics of Artificial Intelligence in Aviation URL:  
<https://tinyurl.com/bp8czc5v>
71. Ethical Issues of Generative AI in the Aviation Cybersecurity Environment URL:  
[chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/file:///C:/Users/admin/Downloads/20088-Article%20Text-58438-1-10-20250929%20\(1\).pdf](chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/file:///C:/Users/admin/Downloads/20088-Article%20Text-58438-1-10-20250929%20(1).pdf)
72. Від Скнилівської трагедії до Броварів: сім наймасштабніших авіакатастроф України URL:  
<https://tsn.ua/ukrayina/vid-sknilivskoyi-tragediyi-do-brovariv-sim-naymasshtabnishi-aviakatastrof-ukrayini-2247274.html>
73. Наймасштабніші авіакатастрофи, що сталися в Україні або з українськими літаками URL:  
<https://www.slovoidilo.ua/2020/09/28/infografika/suspilstvo/najmasshtabnishi-aviakatastrofy-stalysya-ukrayini-abo-ukrayinskymu-litakamy>
74. Statistical Summary of Commercial Jet Airplane Accidents URL:

chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/2023-10/statsum\_summary\_2022.pdf