

УДК 629.7(045)

doi: 10.32620/aktt.2025.5.08

Д. О. МАРШАЛОК, О. Є. ЛУППО

Державний Університет «Київський Авіаційний Інститут», Київ, Україна

НЕЧІТКО-МУЛЬТИКРИТЕРІАЛЬНА ОЦІНКА РИЗИКУ ТА БЕЗПЕКИ В СИСТЕМІ ТОЧКОВОГО ЗЛИТТЯ

Предмет дослідження. Процеси секвенсування прибуттів і інтегроване керування потоками в термінальному районі (Terminal Manoeuvring Area, TMA) з використанням системи точкового злиття (Point Merge System, PMS) та її узгодження з планувальниками прибуттів Arrival Manager (AMAN) і Extended-AMAN. Розглядається задача прозорого й робастного порівняння альтернативних конфігурацій PMS за умов невизначеності трафіку, метеобстановки та якості спостереження з фокусом на безпеку, ефективність і вплив на довкілля. **Мета.** Розроблення і валідація відкритої рамки нечітко-мультикритеріальної оцінки конфігурацій PMS, що поєднує методи багатокритеріального прийняття рішень (Multi-Criteria Decision-Making, MCDM) з правилковою нечіткою системою виведення для формування компактного узгодженого ризик-індексу, сумісного з підходами системи управління безпекою (Safety Management System, SMS) та практиками AMAN. **Завдання.** (1) Сформувати узгоджений набір індикаторів безпеки, ефективності та екологічності для конфігурацій PMS; (2) побудувати відповідні нечіткі функції належності та правила агрегації; (3) отримати ваги критеріїв методом нечіткого найкращого-найгіршого порівняння (Fuzzy Best-Worst Method, Fuzzy-BWM) з перевіркою узгодженості експертних суджень; (4) виконати ранжування альтернатив за Fuzzy-TOPSIS і VIKOR та оцінити конкордацію отриманих рейтингів; (5) спроектувати правилкову систему нечіткого виведення для інтегрального ризик-індексу; (6) провести валідацію на даних TMA з однічною та паралельною PMS з урахуванням реалістичних сценаріїв трафіку, погоди та спостереження. **Отримані результати.** Запропоновано відтворювану процедуру підготовки даних і нормування показників; сконструйовано набір функцій належності та правило-базу для ключових показників (стабільність інтервалів на точці злиття, додаткові трек-майли, час вирівнювання по висоті, дотримання мінімумів ешелонування, проксі-навантаження диспетчера); визначено ваги критеріїв за Fuzzy-BWM і продемонстровано їхню стійкість; отримано узгоджені рейтинги конфігурацій за Fuzzy-TOPSIS/VIKOR; побудовано інтегральний ризик-індекс на основі правилкової нечіткої системи, що поєднує локальні метрики у єдине інтерпретоване число; показано можливість інтеграції з AMAN для підтримки вибору/перемикання конфігурацій у реальному часі. **Висновки.** Запропонована рамка забезпечує прозоре та відтворюване порівняння конфігурацій PMS у TMA і підтримує прийняття рішень щодо налаштування схем під поточний попит. Компонівка «MCDM + правилкова нечітка система» поєднує локальні показники виконавчої ефективності з глобальним ризик-індексом і набором зрозумілих правил. Показано, що конфігурації, які зберігають стабільність інтервалів і зменшують рівнинність на малих висотах, водночас мінімізують ризик втрати ешелонування та проксі-навантаження диспетчера. Наведено практичні орієнтири для налаштування конфігурацій під варіації трафіку та погоди без порушення нормативних мінімумів. **Наукова новизна.** Уніфіковано процес нечіткого нормування показників безпеки/ефективності/екологічності для вибору конфігурацій PMS; поєднано Fuzzy-BWM з Fuzzy-TOPSIS/VIKOR і правилковою нечіткою системою виведення для формування узгодженого ризик-індексу, придатного до інтеграції з AMAN/SMS і застосовного як у TMA з однічною, так і з паралельною PMS; продемонстровано узгоджувальність рейтингових процедур та інтерпретованість рішень для експлуатаційного використання.

Ключові слова: система точкового злиття; нечітка логіка; багатокритеріальний вибір; безпека польотів; ризик-індекс.

Вступ

1.1. Мотивація дослідження

Сучасне керування повітряним рухом дедалі більше спирається на інтегровані підсистеми, які забезпечують центр керування актуальними оцінками стану в реальному часі та короткостроковими

прогнозами для проактивного секвенсування і балансування пропускної спроможності та попиту в термінальному районі (TMA) [1]. У межах цієї екосистеми Point Merge System (PMS) надає стандартизовану геометрію - секвенсингові відрізки, що збігаються до точки злиття, і процедури для диспетчера та пілота, які зменшують векторинг, водночас зберігаючи регулярність інтервалів [2]. Настанови з упровадження



[Creative Commons Attribution
NonCommercial 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

консолідуєть логіку спрямування з дуг до точки злиття та деталізують операційні передумови для узгодженого розгортання в різних ТМА [3]. Набір рішень SESAR формалізує зв'язування PMS з Arrival Manager (AMAN) та його розширеним варіантом (Extended-AMAN, E-AMAN), що дає змогу раніше виконувати метризацію потоку, стабілізувати прибуття та підвищувати пропускну здатність злітно-посадкової смуги (ЗПС) [1]. Емпіричні впровадження та високоточні симуляції свідчать, що PMS здатна підтримувати впорядковане злиття за високого попиту з меншою кількістю тактичних втручань авіадиспетчерів [4, 5].

Сучасне керування прибуттями залежить від своєчасного поєднання даних спостереження, прогнозу траєкторій та інформації про наміри, що підтримує передтактичні та тактичні рішення [2]. У ТМА, де застосовано PMS, такий інформаційний потік дозволяє уточнювати стратегії черговості та завчасно виділяти буфери інтервалів, скорочуючи поширення затримок і полегшуючи координацію на рівні секторів [3]. Із розширенням горизонтів AMAN/E-AMAN і підвищенням точності метризації система може раніше виявляти конфлікти, що назрівають, або дисбаланси пропускну спроможності й надавати інструкції коригувальних дій із суміжними секторами та аеропортами [1]. Завдяки такій стабілізації траєкторій і зменшенню подовження шляху та векторингу структуроване секвенсування сприяє зниженню витрат палива та викидів порівняно з операціями, де є узгодження з профілями безперервного зниження [6, 7]. Отже, інтеграція методів багатокритеріального прийняття рішень (Multi-Criteria Decision-Making, MCDM) та нечіткої логіки при проєктуванні й експлуатаційному налаштуванні процедур Point Merge у ТМА є актуальною задачею.

1.2. Сучасний стан та прогалини

Положення ІКАО визначають проєктування та впровадження низки процедур: Annex 11 встановлює вимоги до підтримання належного рівня обслуговування на всіх етапах польоту [8]. Safety Management Manual (Doc 9859) регламентує ідентифікацію небезпек, оцінювання ризику та моніторинг ефективності в межах Державної програми з безпеки польотів і системи управління безпекою (Safety Management System, SMS) постачальників послуг, що окреслює, як нові або змінені процедури прибуття мають бути обґрунтовані та відстежувані [9]. На практиці детерміновані показники продуктивності недостатньо відображають епістемічну та лінгвістичну невизначеність, властиву експертним судженням і мінливим умовам експлуатації. Нечіткі множини пропонують

формалізм для подання та контрольованого поширення такої невизначеності [10]. Коли розкид експертних оцінок є значним, інтервальні нечіткі множини типу 2 забезпечують додаткову робастність для моделювання неточностей у функціях належності та правилах [11].

Методи MCDM добре підходять для узгодження критеріїв безпеки, ефективності, пропускну здатності та впливу на довкілля під час вибору або налаштування конфігурацій PMS [12]. Fuzzy-TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) оцінює альтернативи відносно нечітких позитивного та негативного ідеалів, забезпечуючи прозорий аналіз компромісів між конфліктними метриками [12]. VIKOR (метод компромісного ранжування) акцентує компромісні рішення, поєднуючи групову корисність, що корисно, коли зацікавлені сторони по-різному пріоритезують критерії [13]. Метод найкращий–найгірший (Best–Worst Method, BWM) забезпечує економне, але стабільне отримання ваг із обмеженої кількості попарних порівнянь, а його нечіткі варіанти (Fuzzy-BWM) фіксують невизначеність в експертних судженнях без надмірного навантаження на процедуру збору оцінок [14]. Причинно-наслідкові залежності можуть бути відображені за допомогою нечіткого DEMATEL (Decision-Making Trial and Evaluation Laboratory) для виявлення структур впливу, що доповнюють суто компенсаторні моделі [15].

Застосування в управлінні повітряним рухом показують, що нечітке моделювання та нечітке MCDM здатні кількісно описувати ризик авіаційних подій і фактори діяльності диспетчерів так, щоб це було інтерпретовано практиками та сумісно з моніторингом у SMS [16, 17]. З екологічної точки зору, дані щодо зменшення витрат палива та CO₂ завдяки структурованому секвенсуванню й безперервним зниженням додатково мотивують інтегрувати екологічні критерії у простір рішень PMS [6, 7]. Відповідно, ми приймаємо уніфіковану нечітку MCDM-рамку, яка поєднує нечітке зважування (BWM), нечітке ранжування (Fuzzy-TOPSIS/VIKOR) та компактний правилловий нечіткий ризик-індекс, адаптований до кейсів PMS/E-AMAN [12, 14].

1.3. Мета, завдання і структура статті

Об'єктом дослідження є процеси секвенсування прибуттів у ТМА з використанням процедур PMS та їхня інтеграція з AMAN. Методологічною основою є поєднання принципів оптимального керування потоками прибуття з багатокритеріальним вибором під невизначеністю; для формалізації невизначеності застосовуються нечіткі множини та процедури Fuzzy-BWM для зважування критеріїв і Fuzzy-

TOPSIS/VIKOR для ранжування конфігурацій. Оцінювання безпеки здійснюється відповідно до підходів SMS з урахуванням імовірнісних показників втрати ешелонування та індикаторів операційної стабільності.

Мета дослідження - наукове обґрунтування методу інтегрованого багатокритеріального вибору та оцінювання конфігурацій Point Merge з використанням Fuzzy-BWM для зважування критеріїв, Fuzzy-TOPSIS і VIKOR для ранжування альтернатив та правилкової нечіткої системи для побудови компактного індексу ризику.

У рамках поставленої мети вирішуються такі завдання:

- розробити метод інтегрованого вибору конфігурацій PMS на основі нечіткого багатокритеріального підходу з прозорою процедурою узгодження рішень;
- сформулювати систему показників безпеки, ефективності та екологічності та побудувати для них нечіткі функції належності;
- отримати ваги критеріїв методом Fuzzy-BWM і перевірити узгодженість експертних суджень;
- виконати ранжування альтернатив конфігурацій PMS за Fuzzy-TOPSIS і VIKOR та оцінити конкордацію отриманих рейтингів;
- спроектувати правилкову нечітку систему виведення для формування компактного ризик-індексу та провести аналіз чутливості;
- валідувати метод на даних ТМА з одиничною та паралельною PMS з урахуванням сценаріїв трафіку, погоди та спостереження.

Структура статті. У розділі 2 подано матеріали та методи (показники, функції належності, процедури зважування і ранжування). У розділі 3 наведено приклад реалізації (кейс-стаді з описом даних, сценаріїв і параметризації). У розділі 4 подано результати обчислювальних експериментів. У розділі 5 обговорено інтерпретацію, обмеження та порівняння з відомими підходами. Розділ 6 містить висновки та напрями подальших досліджень

2. Матеріали та методи дослідження

2.1. Альтернативи, показники та їх визначення

Дослідження спирається на концепцію та впровадження EUROCONTROL щодо PMS для визначення операційної геометрії, логіки секвенсингових відрізків і процедур диспетчера/пілота [2, 3]. Метод також базується на рішенні SESAR AMAN/E-AMAN для поєднання менеджера прибуттів зі структурованим секвенсуванням, що забезпечує ранню метризацію та

передбачувані потоки [1]. Для управління безпекою метод спирається на Safety Management Manual ICAO, щоб узгодити ідентифікацію небезпек, оцінювання ризику та моніторинг ефективності з процедурою оцінювання [9]. Метод використовує літературу з PMS для визначення множини альтернатив $A = \{A_1, \dots, A_m\}$, що охоплює симетричні, асиметричні, багаторівневі та паралельні конфігурації PMS (P-PMS) [2, 4, 5]. Індикатори організовано у три виміри - безпека, ефективність і довкілля - відповідно до стовпів результативності SMS ICAO та практик організацій повітряного руху [9]. Екологічні індикатори обґрунтовані даними про те, що структуроване секвенсування та операції з безперервним зниженням зменшують витрати палива та викиди CO₂ [6, 7]. Операційні дані (наприклад, затримки на секвенсингових відрізках, варіабельність інтервалів на точці злиття, проксі навантаження диспетчера) зібрано зі звітів симуляцій та експлуатаційних записів у відповідності з настановами впровадження PMS [3].

Траєкторії було впорядковані за часом послідовності п'яти компонентних записів за часом, широтою, довготою, висотою, курсом $[t, \phi, \lambda, h, \chi]$; відстані великого кола обчислювалися за формулою гаверсінуса:

$$d_{i,i+1} = 2R \arcsin \left(\sqrt{\sin^2 \frac{\phi_{i+1} - \phi_i}{2} + \cos \phi_i \cos \phi_{i+1} \sin^2 \frac{\lambda_{i+1} - \lambda_i}{2}} \right), \quad (1)$$

де R – радіус Землі,
 ϕ – широта,
 λ – довгота.

Якщо сегмент заходу починається з індексу k (перша точка в межах 50 NM від EIDW) і закінчується на N :

$$L = \sum_{i=k}^{N-1} d_{i,i+1}, \quad (2)$$

де L – кумулятивна довжина заходу вздовж ламаної траєкторії.

Далі потрібно визначити кумулятивну довжина заходу вздовж ламаної

$$G = dkN, \quad (3)$$

$$G_{NM} = \frac{G}{1.852}, \quad (4)$$

де G – відстань великого кола між першою та останньою точками сегмента заходу.

Наступним етапом є визначення відстані великого кола та коефіцієнту протяжності шляху.

$$S = \frac{L}{G} \geq 1, \quad (5)$$

де S – коефіцієнт протяжності шляху.

$$T = \frac{t_n - t_k}{60}, \quad (6)$$

де T – тривалість заходу.

Після розраховуємо тривалість заходу.

$$C_{\text{vert}} = \sum_{i=k+1}^N 1_{|h_i - h_{i-1}| > 50m}, \quad (7)$$

де C_{vert} – кількість вертикальних "стрибків" ≥ 50 м,
 h – барометрична висота.

2.2. Нечіткі функції належності та зважування критеріїв

Невизначеність та лінгвістичні оцінки параметризуються трикутними/трапецієподібними функціями належності типу 1, відкаліброваними на емпіричних діапазонах та експертних межах [10]. За значного розкиду експертних думок передбачено інтервальне розширення типу 2 для моделювання «сліду невизначеності» в параметрах функцій і правил [11].

Відносну важливість індикаторів визначено методом Best–Worst Method (BWM) з нечіткими попарними оцінками: формується вектор «найкращий та інші» та «інші та найгірший», під час якої розв'язується задача мінімізації відхилення для отримання узгоджених ваг, після чого виконується дефазифікація та нормування ваг до суми 1 [10, 14].

2.3. Ранжування альтернатив, аналіз чутливості та узгодженість рангів

Застосовано дві комплементарні моделі: Fuzzy-TOPSIS для обчислення відносної наближеності до нечітких позитивного/негативного ідеалів [12] та VIKOR для отримання компромісного розв'язку з балансуванням групової корисності через параметр $v \in [0, 1]$ [13]. Поєднання моделей знижує методичне зміщення. Узгодженість ранжувань оцінюється непараметричними коефіцієнтами Кенделла та Спірмена.

За причинно-наслідкові залежності між критеріями діагностуються нечітким DEMATEL для підтримки інтерпретації [15]. Для інтерпретації з акцентом на безпеку розроблено компакту систему нечіткого виведення (FIS) типу Мамдані, що проектує вибрані індикатори у єдиний ризик-індекс. Дефазифікація –

центроїдна (або зважене середнє), шкала сумісна зі SMS [10, 11]. Стійкість перевіряється параметричними варіаціями ± 10 -20 % для параметрів функцій належності та ваг індикаторів, а також перебором v у VIKOR [12, 13]. Узгодженість TOPSIS/VIKOR кількісно оцінюється коефіцієнтами Кенделла та Спірмена з наперед визначеними порогами «сильного» узгодження.

2.3. Дані та обробка

Операційні дані зібрано зі звітів симуляцій і експлуатаційних записів згідно з настановами впровадження PMS [3]. Альтернативи сформовано на основі літератури з PMS/P-PMS [2, 4, 5]. Передобробка відповідає стандартам MCDM: монотонізація до «вигода/витрати», min–max нормалізація до інтервалу $[0; 1]$ у вигляді вигоди X [12]. Для витратних показників використано перетворення:

$$x = \frac{X_{\text{max}} - X}{X_{\text{max}} - X_{\text{min}}}. \quad (8)$$

3. Приклади реалізації

3.1. Дані та джерела, сценарії та налаштування зважування критеріїв

Це кейс-дослідження демонструє запропоновану нечітко-мультикритеріальну оцінку на відкритих операційних даних для аеропорту Дублін (EIDW) за 3 вересня 2025 р. Записи прибуттів отримано через OpenSky Network API за повну добу. Підмножину рейсів доповнено спрощеними ADS-B траєкторними треками. Погодні умови сформовано з METAR тієї ж дати, ранкові інтервали 03:00–05:00 UTC та 09:00–11:00 UTC віднесено до зниженої нижньої межі хмар і видимості. Сценарії комбінують режим трафіку (поза піком / середній / пік), метео (VMC / IFR / MVFR) і стан спостереження (повний / деградований), щоб відтворити реалістичні операційні діапазони для AMAN/E-AMAN. Параметри сценаріїв узгоджено з настановами впровадження PMS, щоб забезпечити здійсненність процедур у ТМА.

Для блоку «Ефективність/Довкілля» ваги вилучено за процедурою Fuzzy-BWM на основі таких експертних порівнянь:

- порівняння «Найкращий щодо Інших»: обрано C_3 як найкращий; оцінки C_3 проти $\{C_1, C_2, C_3, C_4, C_5\} = \{5, 5, 1, 9, 7\}$;

- порівняння «Інші щодо Найгіршого»: обрано C_4 як найгірший; оцінки $\{C_1, C_2, C_3, C_4, C_5\}$ проти $C_4 = \{5, 7, 9, 1, 5\}$. Після дефазифікації отримано нормалізовані ваги, наведені в табл. 1.

Таблиця 1
Вибраний нормалізований ваговий коефіцієнт

№	Критерій	Вага
1	Тривалість заходу хв	0.1572
2	Довжина заходу NM	0.186
3	Коефіцієнт протяжності шляху	0.4716
4	Кількість змін курсу ≥ 15 град	0.0524
5	Вертикальні стрибки ≥ 50 м	0.1329

3.2. Передобробка траєкторій та нормалізація показників

Траєкторії подано як впорядковані послідовності, а базова очистка вилучає записи з відсутніми часовими позначками/координатами та дублікати. Геометричні та часові показники обчислено за формулами (1)–(7). Оскільки всі п'ять показників трактується як витрати («менше - краще»), виконано монотонізацію й min–max нормалізацію до $[0;1]$ за формулою (8).

4. Результати та обговорення

Ранжування рейсів виконано методом TOPSIS у постановці із використанням нечітких ваг з табл. 1. Інтегральні бали наведені в табл. 2

Рисунок 1 демонструє описову статистику для п'яти показників: спостерігається помірна дисперсія, причому найбільший відносний розкид для C3 (про-

тяжність шляху) та C4. Це узгоджується з варіативністю векторингу й злиття потоків за умов MVFR.

Таблиця 2
Інтегральний бал TOPSIS ранжованих рейсів

№	Позивний	ICAO24	Оцінка TOPSIS
C1	EAI87M	4caa54	1
C2	RYR967K	4ca303	0,9135
C3	EAI11M	4caad8	0,9008
C4	RYR70YD	4ca891	0,8981
C5	EIN4VM	4ca935	0,8791
C6	HYS243	4a4d79	0,8506
C7	EIN33W	4ca27f	0,7772
C8	RYR71GG	4ca623	0,713
C9	TAP26T	495298	0,142
C10	EIN7VT	4cad7b	0

Отримані результати підтверджують, що структурні геометричні характеристики траєкторій, тобто відношення $S = L/G$ є визначальними для інтегральної оцінки конфігурацій у межах наведеного налаштування ваг. Це узгоджується з практикою структурованого секвенсування. Скорочення подовження шляху та стабілізація інтервалів на точці злиття зменшують потребу в тимчасовому векторингу, що позитивно впливає і на витрати палива/викидів за наявності профілів безперервного зниження. Водночас компоненти керованості курсу C4 та C_{vert} виступають м'якими обмежувачами.

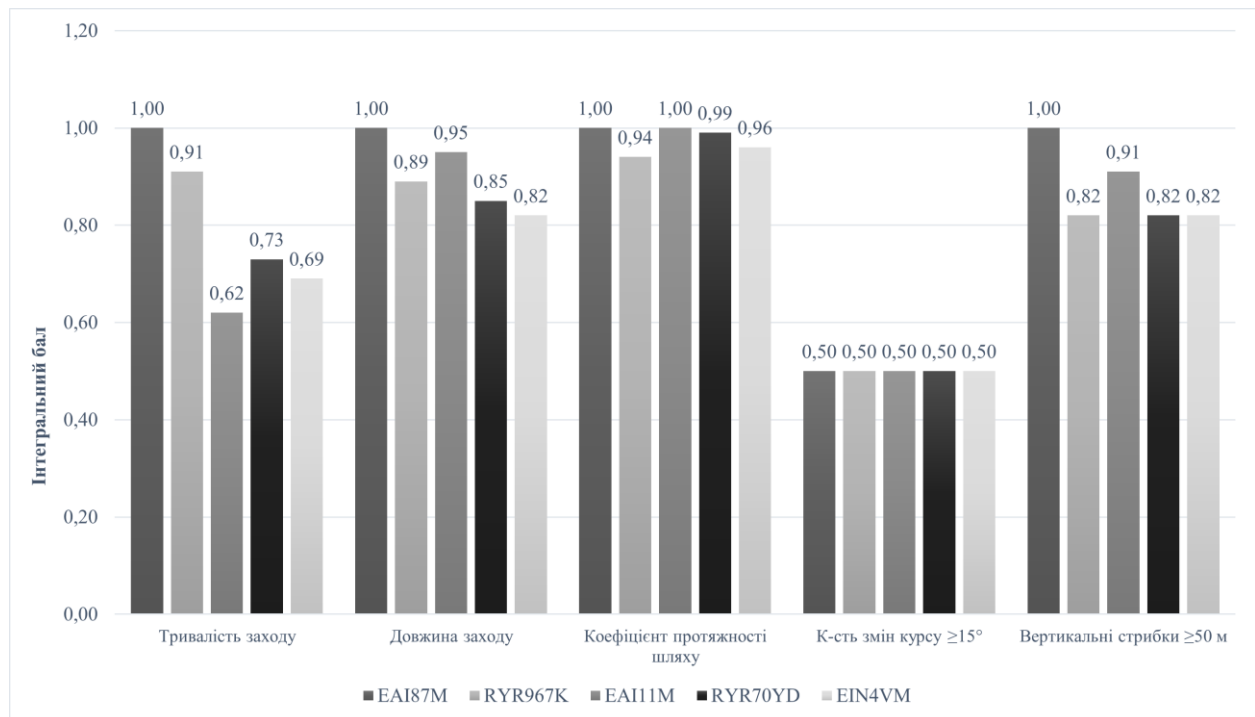


Рис. 1. Описова статистика для п'яти рейсів із найвищими інтегральними балами

Вони рідко переорієнтовують топ-позиції, але сигналізують про можливе зростання проксі-навантаження диспетчера й ризик локальних порушень стабільності інтервалів у фазі злиття потоку.

З точки зору узгодженості методів, використання пари комплементарних моделей разом з контролем рангової конкордації забезпечує діагностику методичного зміщення та підвищує довіру до вибору альтернатив. Правилова FIS-надбудова виконує роль «пояснювача»: вона не замінює компенсаторні MCDM-ранжування, але дає інтерпретований ризик-індекс, узгоджений із практиками SMS/AMAN, для комунікації рішень операторам.

4. Висновки

Робота представила прозору та відтворювану рамку для оцінювання конфігурацій Point Merge System у термінальному районі, що поєднує Fuzzy-BWM для зважування критеріїв, Fuzzy-TOPSIS/VIKOR для ранжування альтернатив та правилу нечіткої системи для формування єдиного ризик-індексу, сумісного з підходами SMS/AMAN.

На демонстраційному прикладі ранжування визначається насамперед геометричною ефективністю, тоді як «шорсткість» курсу і вертикального профілю відіграють роль коригувальних чинників, що сигналізують про потенційні операційні ризики та навантаження.

Практичний висновок полягає в узгодженому налаштуванні конфігурації PMS до оперативних умов, яке можливе на підставі інтерпретованих правил і інтегрального ризик-індексу без втрати зв'язку з локальними метриками ефективності. Рамка безпосередньо узгоджується з процедурами AMAN/Е-AMAN та може бути застосована як для одиничної, так і для паралельної PMS.

Перспективами подальших робіт може бути розширення набору індикаторів, зокрема часових метрик і енергетичних характеристик профілю зниження, багатодобові та мульти-ТМА валідації; апробація онлайн-зв'язку з AMAN для сценаріїв перемикавання конфігурацій у реальному часі.

Внесок авторів: аналіз, розробка моделі, візуалізація, написання, редагування – **Д. О. Маршалок**, формулювання завдань, концептуалізація, методологія, аналіз результатів, верифікація – **О. Є. Луппо**.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що вони не мають конфлікту інтересів стосовно цього дослідження, будь то фінансового, особистого, авторського чи іншого, який міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в цій статті.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки

Наявність даних

Рукопис не має пов'язаних даних в репозиторії даних.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що вони не використовували технології штучного інтелекту при створенні даної роботи.

Автори прочитали та погодилися з опублікованою версією рукопису.

Література

1. *Point Merge – Integration of arrival flows enabling extensive RNAV application and continuous descent (reference manual). Operational Services and Environment Definition (OSED), v. 2.0 [Text].* – Brussels : EUROCONTROL, 2010. – 124 p. – Available at: <https://www.eurocontrol.int/publication/point-merge-integration-arrival-flows-enabling-extensive-rnav-application-and> (accessed 12.12.2024).
2. *Annex 11: Air Traffic Services [Text] / ICAO.* – [S. l.] : Intl Civil Aviation Organization, 2018. – 136 p. – Available at: <https://elibrary.icao.int/product/223637>. (accessed 12.12.2024).
3. *Safety Management Manual (SMM), Doc 9859, 4th ed. [Text].* – International Civil Aviation Organization (ICAO).– Montréal : ICAO, 2018. – Available at: <https://www.icao.int/safety-management/guidance-material>. (accessed 12.12.2024).
4. *Point Merge implementation: A quick guide, Ed. 1.51 [Text].* – Brussels : EUROCONTROL, 2024. – Available at: <https://www.eurocontrol.int/publication/point-merge-implementation>. (accessed 20.12.2024).
5. *Point Merge in extended Terminal Area (PMS-TE 2009–2010) [Text].* – Brussels : EUROCONTROL, 2010. – 118 p. – Available at: https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/library/012_Point_Merge_in_extended_TMA.pdf. (accessed 20.12.2024).
6. *Dönmez, K. Air traffic management in parallel-point merge systems under wind uncertainties [Text] / Kadir Dönmez, Cem Çetek, & Onur Kaya // Journal of Air Transport Management.* – 2022. – Vol. 104. – Article no. 102268. DOI: 10.1016/j.jairtraman.2022.102268.
7. *Toratani, D. Application of merging optimization to an arrival manager algorithm considering trajectory-based operations [Text] / Daichi Toratani // Transportation Research Part C: Emerging Technologies.* – 2019. – Vol. 109. – P. 40–59. DOI: 10.1016/j.trc.2019.09.015.
8. *Chen, C.-T. Extensions of the TOPSIS for group decision-making under fuzzy environment [Text] / Chen-*

Tung Chen // *Fuzzy Sets and Systems*. – 2000. – Vol. 114, no. 1. – P. 1-9. DOI: 10.1016/s0165-0114(97)00377-1.

9. Rezaei, J. Best-worst multi-criteria decision-making method: Some properties and a linear model [Text] / Jafar Rezaei // *Omega*. – 2016. – Vol. 64. – P. 126–130. DOI: 10.1016/j.omega.2015.12.001.

10. Opricovic, S. Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS [Text] / Serafim Opricovic, & Gwo-Hshiung Tzeng // *European Journal of Operational Research*. – 2004. – Vol. 156, no. 2. – P. 445–455. DOI: 10.1016/s0377-2217(03)00020-1.

11. Characterization of Air Traffic Performance in Terminal Airspace with Point Merge at São Paulo/Guarulhos International Airport [Text] / Gabriel Lessa de Araújo, & et al. // *Journal of Aerospace Technology and Management*. – 2025. – Vol. 17. DOI: 10.1590/jatm.v17.1389.

12. Mendel, J. M. Type-2 fuzzy sets made simple [Text] / J. M. Mendel, & R. I. B. John // *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*. – 2002. – Vol. 10, no. 2. – P. 117–127. DOI: 10.1109/91.995115.

13. A comprehensive review on type 2 fuzzy logic applications: Past, present and future [Text] / Kanika Mittal, & et al. // *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. – 2020. – Vol. 95. – Article no. 103916. DOI: 10.1016/j.engappai.2020.103916.

14. Jassbi, J. A Fuzzy DEMATEL framework for modeling cause and effect relationships of strategy map [Text] / Javad Jassbi, Farshid Mohamadnejad, & Hossein Nasrollahzadeh // *Expert Systems with Applications*. – 2011. – Vol. 38, no. 5. – P. 5967–5973. DOI: 10.1016/j.eswa.2010.11..

15. Skorupski, J. The simulation-fuzzy method of assessing the risk of air traffic accidents using the fuzzy risk matrix [Text] / Jacek Skorupski // *Safety Science*. – 2016. – Vol. 88. – P. 76–87. DOI: 10.1016/j.ssci.2016.04.025.

16. Bongo, M. F. Evaluating the Performance-Shaping Factors of Air Traffic Controllers Using Fuzzy DEMATEL and Fuzzy BWM Approach [Text] / Miriam F. Bongo, & Rosemary R. Seva // *Aerospace*. – 2023. – Vol. 10, no. 3. – Article no. 252. DOI: 10.3390/aerospace10030252.

17. Huo, Y. A dynamic control method for extended arrival management using enroute speed adjustment and route change strategy [Text] / Ying Huo, Daniel Delahaye, & Mohammed Sbihi // *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. – 2023. – Vol. 149. – Article no. 104064. DOI: 10.1016/j.trc.2023.104064.

References

1. *Point Merge – Integration of arrival flows enabling extensive RNAV application and continuous descent (reference manual)*. Operational Services and Environment Definition (OSED), v2.0. Brussels: EUROCONTROL, 2010. 124 p. Available at: <https://www.eurocontrol.int/publication/point-merge-integration-arrival-flows-enabling-extensive-rnav-application-and> (accessed 12.12.2024).

2. *Annex 11 – Air Traffic Services (Consolidated edition)*. Montréal, ICAO, 2018. 136 p. Available at: <https://elibrary.icao.int/product/223637>. (accessed 12.12.2024).

3. *Safety Management Manual (SMM)*, Doc 9859, 4th ed. Montréal, ICAO, 2018. Available at: <https://www.icao.int/safety-management/guidance-material>. (accessed 12.12.2024).

4. *Point Merge implementation: A quick guide*, Ed. 1.51. Brussels, EUROCONTROL, 2024. Available at: <https://www.eurocontrol.int/publication/point-merge-implementation>. (accessed 20.12.2024).

5. *Point Merge in extended Terminal Area (PMS-TE 2009–2010)*. Brussels, EUROCONTROL, 2010. Available at: https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/library/012_Point_Merge_in_extended_TM_A.pdf. (accessed 20.12.2024).

6. Dönmez, K., Çetek, C., & Kaya, O. Air traffic management in parallel-point merge systems under wind uncertainties. *Journal of Air Transport Management*, 2022, vol. 104, article no. 102268. DOI: 10.1016/j.jairtraman.2022.102268.

7. Toratani, D. Application of merging optimization to an arrival manager algorithm considering trajectory-based operations. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2019, vol. 109, pp. 40–59. DOI: 10.1016/j.trc.2019.09.015.

8. Chen, C.-T. Extensions of the TOPSIS for group decision-making under fuzzy environment. *Fuzzy Sets and Systems*, 2000, vol. 114, iss. 1, pp. 1–9. DOI: 10.1016/s0165-0114(97)00377-1.

9. Rezaei, J. Best-worst multi-criteria decision-making method: some properties and a linear model. *Omega*, 2016, vol. 64, pp. 126–130. DOI: 10.1016/j.omega.2015.12.001.

10. Opricovic, S., & Tzeng, G.-H., (2004). Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. *European Journal of Operational Research*, 2004, vol. 156, iss. 2, pp. 445–455. DOI: 10.1016/s0377-2217(03)00020-1.

11. De Araújo, G. L., Murça, M. C. R., Caetano, M., & Da Silva, E. J. Characterization of air traffic performance in terminal airspace with point merge at são paulo/guarulhos international airport. *Journal of Aerospace Technology and Management*, 2025, vol. 17. DOI: 10.1590/jatm.v17.1389.

12. Mendel, J. M., & John, R. I. B. Type-2 fuzzy sets made simple. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2002, vol. 10, iss. 2, pp. 117–127. DOI: 10.1109/91.995115.

13. Mittal, K., Jain, A., Vaisla, K. S., Castillo, O., & Kacprzyk, J. A comprehensive review on type 2 fuzzy logic applications: past, present and future. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2020, vol. 95, article no. 103916. DOI: 10.1016/j.engappai.2020.103916.

14. Jassbi, J., Mohamadnejad, F., & Nasrollahzadeh, H. A Fuzzy DEMATEL framework for modeling cause and effect relationships of strategy map. *Expert Systems with Applications*, 2011, vol. 38, iss. 5, pp. 5967–5973. DOI: 10.1016/j.eswa.2010.11.026.

15. Skorupski, J. The simulation-fuzzy method of assessing the risk of air traffic accidents using the fuzzy risk matrix. *Safety Science*, 2016, vol. 88, pp. 76–87. DOI: 10.1016/j.ssci.2016.04.025.

16. Bongo, M. F., & Seva, R. R. Evaluating the performance-shaping factors of air traffic controllers using fuzzy DEMATEL and fuzzy BWM approach.

Aerospace, 2023, vol. 10, iss. 3, article no. 252. DOI: 10.3390/aerospace10030252.

17. Huo, Y., Delahaye, D., & Sbihi, M., A dynamic control method for extended arrival management using enroute speed adjustment and route change strategy. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2023, vol. 149, article no. 104064. DOI: 10.1016/j.trc.2023.104064.

Надійшла до редакції 23.06.2025, розглянута на редколегії 22.09.2025

FUZZY MULTI-CRITERIA EVALUATION OF RISK AND SAFETY IN THE POINT MERGE SYSTEM

Daniil Marshalok, Oleksandr Lupp

Subject of study. Arrival sequencing and integrated flow management in the Terminal Manoeuvring Area (TMA) using the Point Merge System (PMS), aligned with Arrival Manager tools (AMAN and Extended-AMAN). This paper presents a transparent and robust comparison of alternative PMS configurations under traffic, weather, and surveillance uncertainty, focusing on safety, efficiency, and environmental impact. **Purpose.** To develop and validate an open fuzzy multi-criteria assessment framework for PMS configurations that combines Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) with a rule-based fuzzy inference system to produce a compact, consistent risk index compatible with Safety Management System (SMS) practices and AMAN decision support. **Tasks.** (1) Define a harmonized set of safety/efficiency/environmental indicators for PMS configurations; (2) construct fuzzy membership functions and aggregation rules; (3) elicit criterion weights via the Fuzzy Best-Worst Method (Fuzzy-BWM) with a consistency check; (4) rank alternatives with Fuzzy-TOPSIS and VIKOR and assess ranking concordance; (5) design a rule-based fuzzy inference engine for an integrated risk index; (6) validate on TMA data with single and parallel PMS under realistic traffic, weather, and surveillance scenarios. **Results obtained.** A reproducible workflow for data preparation and indicator normalization is proposed. A library of membership functions and a rule base are built for key indicators (merge-point headway stability, additional track-miles, low-altitude level-off time, compliance with separation minima, and controller-workload proxy). Criterion weights estimated by Fuzzy-BWM are stable. PMS-configuration rankings by Fuzzy-TOPSIS/VIKOR are mutually consistent. A rule-based fuzzy system that fuses local metrics is used to construct a single interpretable risk index. Integration with AMAN supports configuration selection/switching in real time. **Conclusions.** The framework enables transparent and reproducible comparison of PMS configurations in TMA and supports operational decisions to tune schemes to current demand. The “MCDM + rule-based fuzzy system” links local performance metrics to a global risk index governed by explainable rules. Configurations preserving headway stability while reducing low-altitude level-offs simultaneously minimize loss-of-separation risk and controller-workload proxies. Practical guidance is provided for adapting configurations to traffic and weather variability without violating regulatory minima. Scientific novelty. This paper unifies fuzzy normalization of safety/efficiency/environmental indicators for PMS configuration choice, couples Fuzzy-BWM with Fuzzy-TOPSIS/VIKOR and a rule-based fuzzy inference engine to form a consistent risk index ready for AMAN/SMS integration, and demonstrates applicability in both single- and parallel-PMS TMA; ranking concordance and decision interpretability are evidenced for operational use.

Keywords: point merge system; fuzzy logic; multi-criteria selection; flight safety; risk index.

Маршалок Данііл Олександрович – асп., Державний Університет «Київський Авіаційний Інститут», Київ, Україна.

Луппо Олександр Євгенійович – канд. пед. наук, доц., доц. каф. Аеронавігаційних систем, Державний Університет «Київський Авіаційний Інститут», Київ, Україна.

Daniil Marshalok – PhD Student, State University “Kyiv Aviation Institute”, Kyiv, Ukraine, e-mail: 4646212@stud.kai.edu.ua, ORCID: 0000-0001-5706-5794.

Oleksandr Lupp – Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor, Associate Professor, Department of Air Navigation Systems, State University “Kyiv Aviation Institute”, Kyiv, Ukraine, e-mail: oleksandr.lupp@npp.kai.edu.ua, ORCID: 0000-0001-9063-985X.