

Автомобільний, річковий, морський та авіаційний транспорт

УДК 656.7.052:629.7

doi: 10.26906/SUNZ.2026.2.012

Ю. В. Баїстов¹, О. В. Сальник¹, О. Ю. Дроль¹, С. В. Мельник¹, Л. В. Грушенкова²

¹ Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків, Україна

² Науково-дослідний інститут Воєнної розвідки, Київ, Україна

АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ УПРАВЛІННЯ ПОВІТРЯНИМ РУХОМ В УМОВАХ ДИНАМІЧНОЇ ПОВІТРЯНОЇ ОБСТАНОВКИ

Анотація. Предметом вивчення в статті є існуючі методи управління повітряним рухом. Метою є аналіз існуючих методів управління повітряним рухом в умовах динамічної повітряної обстановки. Завдання: здійснити аналіз існуючих підходів до управління повітряним рухом; виокремити групи методів управління повітряним рухом за схожим принципом дії; провести порівняльну характеристику сучасних методів управління повітряним рухом; провести оцінку методів управління повітряним рухом за ключовими критеріями. Використовуваними методами є: аналітичні та емпіричні методи порівняльного дослідження. Отримано такі результати. Проведено комплексний аналіз сучасних методів управління повітряним рухом в умовах динамічної повітряної обстановки. Виокремлено та розглянуто шість основних груп методів управління повітряним рухом. Встановлено їх основні принципи роботи, їх основні переваги та недоліки та рівень ефективності роботи методів в умовах динамічної повітряної обстановки. Проведено оцінку виокремлених груп методів управління повітряним рухом за такими ключовими критеріями, як адаптивність до змін повітряної обстановки, оперативність, масштабованість та рівень їх автоматизації. Доведено, що подальший розвиток систем управління повітряним рухом має бути спрямований на підвищення рівня автоматизації, забезпечення масштабованості, оперативності прийняття рішень та ефективної інтеграції великої кількості повітряних об'єктів повітряного простору. **Висновки.** Отримані результати можуть бути використані при розробці та удосконаленні методів повітряного руху. Напрямом подальших досліджень є розробка методу управління повітряним рухом з урахуванням сучасних умов динамічної повітряної обстановки.

Ключові слова: авіаційна технологія, повітряний об'єкт, управління повітряним рухом, метод управління повітряним рухом, динамічна повітряна обстановка.

Вступ

Постановка проблеми у загальному вигляді.

В умовах стрімкого розвитку авіаційних технологій, які в останній час активно застосовуються як в цивільній, так і військовій авіації, а також в рятувальних операціях, вантажних перевезеннях та сільському господарстві, та як результат такого застосування в умовах постійного зростання інтенсивності повітряного руху, питання ефективного управління рухом повітряних об'єктів є дуже актуальним [1–3]. Особливої актуальності це набуває в умовах, коли ситуація в повітряному просторі постійно змінюється в часі, тобто в умовах динамічно змінного операційного середовища, та коли зростають навантаження та складність такої обстановки [4]. Отже, динамічна повітряна обстановка характеризується [4]:

- високою інтенсивністю польотів;
- можливим регіональним військовим конфліктом (різнорідні повітряні атаки);
- появою розвідувальних та ударних безпілотних літальних апаратів (БпЛА);
- можливою дією засобів радіоелектронної боротьби та радіоелектронної протидії;
- швидкоплинною зміною кількості, типів і траєкторій повітряних об'єктів;
- забороною на використання окремих ділянок повітряного простору тощо.

Досвід останніх воєнних конфліктів показав, що така повітряна обстановка є характерною для

сучасних умов ведення бойових дій та управління повітряним рухом. Зокрема, в зонах з інтенсивним використанням різними повітряними об'єктами (як пілотованих, так і БпЛА), коли ситуація постійно змінюється та потребує оперативного об'єктивного аналізу та прийняття управлінських рішень. Така обстановка є також характерною під час кризових ситуацій, коли незаплановано відбувається різке зростання невизначеності, відбувається перевантаження інформаційних каналів, обмежений час на прийняття рішення та при цьому є нагальна потреба одночасно враховувати велику кількість взаємопов'язаних факторів в режимі реального часу [5].

Характерною особливістю і вимогою сьогодення є інтеграція різнорідних користувачів повітряного простору як цивільної, так і військової авіації в єдину систему. Це суттєво ускладнює процеси планування, координації польотів повітряних об'єктів та забезпечення безпеки їх польотів. Питанню складності спільного використання повітряного простору сьогодні приділяється багато уваги [6–8].

Традиційні підходи до управління повітряним рухом, які були розроблені для пілотованої авіації, на сьогодні вже не забезпечують достатньої ефективності в тих умовах, що склалися [9]. Отже, важливість розроблення нових підходів визначається необхідністю гарантування безпеки повітряним об'єктам цивільної авіації та ефективного забезпечення виконання бойових завдань повітряними об'єктами військової авіації.

Для виконання бойових завдань проблема є більш критичною. Адже радіолокаційні системи мають обмеження щодо виявлення малопомітних цілей, роботи в умовах радіоелектронної протидії та інтеграції даних із різнорідних джерел. Крім того, вони не забезпечують достатньої гнучкості для підтримки прийняття рішень у режимі реального часу в умовах високої динаміки повітряної обстановки.

Отже, динамічно змінюване операційне середовище з наявністю у повітряному просторі як цивільних, так і військових повітряних об'єктів, потребує високоточного, оперативного та адаптивного управління. При такому спільному використанні повітряного простору потрібна чітка узгодженість різних процедур, пріоритетів та обмежень.

Таким чином, постає завдання щодо розробки та вдосконалення методів управління повітряним рухом, які здатні ефективно функціонувати в умовах динамічно змінюваного операційного середовища, неоднорідної та багатокористувацької повітряної обстановки. При цьому забезпечуючи безпеку повітряним об'єктам цивільної авіації та ефективно забезпечення виконання бойових завдань повітряними об'єктами військової авіації, пропускну здатність та оперативність прийняття рішень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Аналіз сучасних наукових досліджень і публікацій [10, 11] свідчить, що розглянута проблема управління повітряним рухом в умовах динамічної повітряної обстановки на сьогоднішній день активно досліджується в контексті інтеграції нових типів повітряних об'єктів, зокрема БпЛА та систем міської повітряної мобільності (Urban Air Mobility, UAM).

В роботах міжнародних організацій та дослідницьких програм, таких як ICAO, EUROCONTROL, SESAR, [12–14], розглядаються концепції інтегрованого управління повітряним простором. Ці концепції передбачають спільне використання повітряного простору як пілотованою, так і безпілотною цивільною та військовою авіацією. В [12–14] підкреслюється необхідність розвитку ефективної взаємодії цивільної та військової авіації та гнучкого використання ними повітряного простору (Flexible Use of Airspace, FUA) як ключового елемента сучасних систем управління повітряним рухом.

В останній час виокремлено окремий напрям досліджень, який пов'язаний з інтеграцією БпЛА в уже існуючі системи управління повітряним рухом. В роботах [15, 16] доведено, що стрімке зростання кількості БпЛА, яке в найближчому майбутньому вже перевищить кількість пілотованої авіації, розпочало створювати значне навантаження на систему управління повітряним рухом. Отже, таке застереження вимагає розробки нових моделей та підходів щодо безконфліктної координації та розведення повітряних об'єктів.

Важливим напрямом є також концепція динамічного управління повітряним простором (Dynamic Airspace Management, DAM) [17]. DAM передбачає адаптивну зміну конфігурації повітряних маршрутів в реальному часі залежно від поточної повітряної

обстановки. Ця концепція вже активно використовується в діяльності EUROCONTROL, стандартах ICAO та програмі SESAR.

Також наукові дослідження останніх років [18, 19] вказують на необхідність використання цифрових технологій, зокрема штучного інтелекту, великих даних та інтегрованих комунікаційних систем при управлінні повітряним рухом. Це може забезпечити ситуаційну обізнаність та підтримку прийняття рішень у режимі реального часу, особливо в умовах динамічно змінюваної повітряної обстановки.

Отже, аналіз останніх досліджень і публікацій показує, що сучасні методи управління повітряним рухом вимушено еволюціонують у напрямі інтеграції, цифровізації та динамічного адаптивного управління. Водночас залишаються відкритими питання підвищення ефективності одночасного управління повітряним рухом військової та цивільної авіації, як пілотованої, так і безпілотної, в умовах динамічної повітряної обстановки, що обґрунтовує актуальність подальших досліджень у даній сфері.

Мета статті – провести детальний аналіз існуючих методів управління повітряним рухом в умовах динамічної повітряної обстановки.

Основна частина

Аналіз показав, що сучасні методи управління повітряним рухом умовно можна поділити на шість основних груп. Такий розподіл залежить від принципів побудови, рівня автоматизації, масштабованості та адаптивності до змін повітряної обстановки.

До першої групи було віднесено усі *традиційні (класичні) методи управління повітряним рухом (традиційне диспетчерське управління) (Air Traffic Control, ATC)*, які були сформовані в другій половині ХХ століття і які досі використовуються у більшості країн як базові. Група цих методів базується на централізованому диспетчерському управлінні, при якому ключові рішення щодо руху повітряних об'єктів приймає людина (диспетчер), а екіпаж виконує його вказівки, дотримуючись встановлених процедур [20, 21].

Група традиційних (класичних) методів управління повітряним рухом передбачає [20, 21]:

– фіксовану структуру повітряного простору – коли увесь простір умовно поділяється на сектори, границі яких є статичними, та коли кожен з секторів обслуговується окремим диспетчером;

– заздалегіть визначені маршрути руху повітряних об'єктів – коли повітряні об'єкти переміщуються у повітряному просторі по визначених повітряних трасах, відхилення від яких є обмеженим;

– стандартизовані процедури – коли використовуються уніфіковані схеми усіх процесів, наприклад, заходу повітряного об'єкта на посадку;

– ешелонування – коли безпека польотів забезпечується шляхом витримування мінімально допустимих інтервалів як у вертикальній, так і у горизонтальній площині.

Але попри високу надійність роботи традиційних методів, вони мають низку суттєвих недоліків, а саме:

– низьку адаптивність – тобто система управління повітряним рухом, побудована на класичних методах, слабо реагує на будь-які зміни у трафіку, погодних умовах тощо та на виникнення надзвичайних та кризових ситуацій;

– неоптимальність маршрутів руху повітряних об'єктів – адже фіксовані повітряні траси не завжди є найкоротшими та/або найекономічнішими;

– обмеження пропускної здатності – адже через жорсткі інтервали часу між повітряними об'єктами суттєво знижується ефективність використання повітряного простору;

– переваження диспетчерів як людський фактор – адже зі збільшенням інтенсивності руху повітряних об'єктів диспетчер обробляє великий обсяг вхідної інформації в реальному часі, що суттєво збільшує ризик його помилок.

Отже, традиційні (класичні) методи управління повітряним рухом забезпечують високий рівень безпеки завдяки централізації та стандартизації, проте їхня жорстка структура обмежує ефективність у сучасних умовах зростання трафіку у повітряному просторі та робить їх недовірними в умовах динамічної повітряної обстановки.

До другої групи було віднесено усі **методи управління повітряним рухом на основі траєкторій (Trajectory-Based Operations, TBO)**. Ця група методів є одним із ключових напрямів розвитку сучасних систем управління повітряним рухом (Air Traffic Management, ATM).

Основною концепцією роботи методів цієї групи є планування та управління польотами повітряних об'єктів з урахуванням чотирирівневих траєкторій (4D-траєкторій), де три виміри – це просторові координати (широта, довгота та висота), а четвертим виміром є час (точка проходження повітряного об'єкту у конкретний момент часу) [22, 23].

На відміну від попередньої групи (коли диспетчер реагує вже після виникнення ситуації), методи даної групи орієнтовані на прогнозування польоту повітряних об'єктів та управління на випередження (проактивне управління) повітряним простором.

Група методів управління повітряним рухом на основі траєкторій передбачає [22, 23]:

– чотирирівневе траєкторне планування – коли для польоту кожного повітряного об'єкта формується узгоджена з іншими траєкторія. При такому узгодженні враховується маршрут польоту, профіль висоти та часові обмеження;

– оперативний обмін даними в реальному часі – коли взаємодія через цифрові канали зв'язку відбувається між тими, хто задіяний у даному процесі (повітряним об'єктом, диспетчерськими центрами, авіакомпаніями тощо);

– інтеграцію з автоматизованими системами – коли для вирішення завдань планування та управління польотами повітряних об'єктів використовуються алгоритми оптимізації, штучний інтелект, моделі прогнозування тощо;

– прогнозування конфліктів – коли система управління повітряним рухом не тільки завчасно визначає можливі конфлікти прокладених повітряних

трас, а й пропонує рішення для їх вирішення.

Але попри підвищення пропускної здатності повітряного простору, зменшення затримок, оптимізацію ресурсів та зниження навантаження на диспетчерів, методи другої групи мають низку суттєвих недоліків та обмежень, а саме:

– залежність від точності прогнозів – адже при наявності неточностей в отриманих метеоданих, похибок даних характеристик польоту або помилок у поведінці екіпажу може призвести до відхилень від запланованої траєкторії польоту;

– залежність від стану розвитку та якості інформаційної інфраструктури – адже для якісної роботи такої системи необхідні високонадійні канали зв'язку, чітка синхронізація даних між усіма учасниками та кібербезпека;

– чутливість до невизначеності, так званих форс-мажорних ситуацій – наприклад ситуація, яка на сьогодні склалася в Україні є гарним прикладом для неможливості використання методів даної групи;

– складність впровадження – адже, це потребує дороговартісної модернізації як наземної інфраструктури, так і бортових систем.

Але досвід міжнародних організацій показує, що методи управління повітряним рухом на основі траєкторій поступово інтегруються у практику управління повітряним рухом, доповнюючи класичні підходи до управління повітряним рухом.

До третьої групи було віднесено усі **методи управління потоками повітряного руху (Air Traffic Flow Management, ATFM)**. Ця група методів сфокусована на збалансуванні попиту на польоти повітряних об'єктів та пропускної здатності повітряного простору й можливостей наземної інфраструктури.

Основною відмінністю методів цієї групи є робота на стратегічному, тобто планування польотів за добу і більше, та передтактичному, тобто планування за кілька годин до польоту, рівнях.

Група методів управління потоками повітряного руху передбачає [24, 25]:

– балансування попиту та пропускної здатності – коли відбувається постійний аналіз кількості запланованих польотів, можливостей секторів повітряного простору та наземної інфраструктури, усі обмеження та приймає рішення чи не виникне перевантаження;

– централізоване планування – коли управління потоками повітряного руху здійснюється спеціалізованими центрами;

– регулювання повітряних потоків – коли застосовуються вимушені міри, наприклад, затримка повітряного об'єкта на землі, перенаправлення маршрутів, слотування тощо, у випадку коли прогнозується або відбувається перевищення пропускної здатності;

– використання моделей для прогнозування – коли для запобігання перевантаженню повітряного простору, ще до виникнення такої ситуації, завчасно аналізуються трафік, погодні умови, завантаженість секторів тощо.

Але попри такі переваги як можливість запобігання перевантаженню повітряного простору, змен-

шення затримок та підвищення загальної ефективності системи управління повітряним рухом, методи третьої групи мають низку суттєвих недоліків та обмежень, а саме:

- залежність від точності прогнозів – адже ефективність роботи методів на пряму залежить від якості даних, моделей та коректної координації всіх учасників системи;

- обмежена оперативність у реальному часу – адже група методів працює наперед і не завжди реагує на раптові зміни та форс-мажорні ситуації;

- затримки на окремих маршрутах – адже оптимізація системи в цілому може призвести до індивідуальних затримок повітряних об'єктів.

На сьогоднішній день методи управління потоками повітряного руху вже є невід'ємною частиною систем управління повітряним рухом і ведуться розробки щодо їх інтегрування з методами управління повітряним рухом на основі траєкторій.

До наступної четвертої групи належать *методи управління повітряним рухом в умовах інтеграції БпЛА*. Поява та виокремлення даної групи зумовлені стрімким збільшенням кількості використання БпЛА як у військовій сфері, так і для цивільних потреб та інтеграцією БпЛА у загальний повітряний простір.

Отже, така інтеграція БпЛА в єдиний повітряний простір разом із пілотованою авіацією стала потребувати нових підходів до управління повітряним рухом, адже попередньо розглянуті групи методів управління повітряним рухом не враховували особливості застосування БпЛА, а саме: малі та гранично малі висоти польоту БпЛА, можливість одночасно дуже великої їх кількості перебування в повітряному просторі та високу динамічність повітряної обстановки.

Отже, у зв'язку з появою у повітряному просторі повітряних об'єктів з переліченими особливостями, розпочали активно розвиватися такі спеціалізовані системи управління повітряним рухом, як UTM (Unmanned Traffic Management) та U-space [26].

Методи даної групи мають наступні особливості [26, 27]:

- високий рівень автоматизації – коли управління повітряним рухом здійснюється переважно без участі диспетчера, а із застосуванням елементів штучного інтелекту, алгоритмів оптимізації та/або цифрових платформ;

- децентралізоване або гібридне управління – коли рішення можуть прийматися не одним центром прийняття рішень, а розподіленими системами або навіть самими операторами БпЛА;

- активне застосування цифрових сервісів та обміну даними в режимі реального часу – коли використовуються онлайн-платформи планування польотів повітряних об'єктів, геозони та цифрова ідентифікація БпЛА.

Концепція розвитку методів даної групи сфокусована на наступних напрямках:

- стратегічному та тактичному розведенні повітряних об'єктів з метою планування маршрутів по-

льоту та уникнення конфліктів та подій як у реальному часі так і заздалегідь;

- виявлення та уникнення конфліктів з метою автоматичного визначення ризику зіткнення повітряних об'єктів та коригування траєкторій їх руху;

- координації великої кількості учасників повітряного руху з метою одночасного управління сотнями, а то й тисячами БпЛА у спільному повітряному просторі.

Але попри такі переваги як можливість масштабування при великій кількості БпЛА, зменшення навантаження на диспетчерів та ефективне використання низьковисотного повітряного простору, методи четвертої групи мають низку суттєвих недоліків та обмежень, а саме:

- висока щільність повітряного трафіку – адже такий підхід потребує нових алгоритмів управління повітряного руху з метою уникнення конфліктів та оптимізації маршрутів руху;

- повна залежність від цифрової інфраструктури – адже зв'язок, навігація та питання кібербезпеки є критично важливими для стабільного функціонування систем і безпечного виконання польотів повітряних об'єктів;

- регуляторні обмеження – адже законодавство з використання таких спеціалізованих систем управління повітряним рухом ще перебуває на стадії розробки;

- проблеми інтеграції з іншими системами управління повітряним рухом – адже необхідною є взаємодія з працюючими системами традиційного диспетчерського управління та управління потоками повітряного руху.

На сьогоднішній день розвиток методів четвертої групи відбувається в рамках як міжнародних ініціатив (Eurocontrol, International Civil Aviation Organization, European Union Aviation Safety Agency), так і за участю Украерорух.

Отже, методи управління повітряним рухом в умовах інтеграції БпЛА є актуальним та новим етапом розвитку систем управління повітряним рухом, який дозволить в майбутньому ефективно використовувати повітряний простір великої кількості як пілотованої, так і безпілотної авіації. Водночас даний підхід потребує високого рівня технологічної зрілості та узгодженого регулювання.

До наступної п'ятої групи належать *методи динамічного управління повітряним простором (Dynamic Airspace Management, DAM)*. До виокремлення даної групи призвело зростання інтенсивності повітряного руху, необхідність підвищення ефективності використання повітряного простору, а також потреба швидкого реагування на динамічні зміни у повітряному просторі, коли учасниками є як пілотовані, так і безпілотні повітряні об'єкти.

Через ці вимоги виникла нагальна потреба у розробці та впровадженні нових підходів до управління повітряним рухом, які будуть базуватися на принципах гнучкості, адаптивності та роботи у режимі реального часу. Все це закладено в концепції методів динамічного управління повітряним простором, які передбачають динамічну конфігурацію

повітряного простору залежно від поточної повітряної обстановки.

Методи даної групи мають наступні особливості [28, 29]:

- адаптивність повітряного простору – коли секторів повітряного простору змінюються в залежності від інтенсивності повітряного руху та, як результат, навантаження диспетчерів;

- динамічна маршрутизація польотів повітряних об'єктів – коли маршруту польоту оптимізуються в режимі реального часу, враховуючи реальну повітряну обстановку;

- орієнтація на актуальну інформацію – коли управління повітряним рухом базується на постійному моніторингу трафіку, погодних умов тощо;

- оперативне реагування на загрози та обмеження – коли система управління повітряним рухом оперативно змінює конфігурацію повітряного простору у відповідь на виникнення надзвичайних та кризових ситуацій.

Концепція розвитку методів даної групи сфокусована на наступних напрямках:

- динамічній конфігурації секторів обслуговування (Dynamic Airspace Configuration, DAC) з метою оптимального розподілу навантаження між диспетчерськими центрами;

- динамічній перебудові повітряного простору (Dynamic Airspace Reconfiguration, DAR) з метою адаптації до змін інтенсивності руху повітряних об'єктів;

- інтеграції з концепцією гнучкого використання повітряного простору (Flexible Use of Airspace, FUA) з метою ефективного управління повітряним рухом одночасно як цивільною, так і військовою авіацією.

Але попри такі переваги як підвищення пропускну здатності повітряного простору, зниження навантаження на диспетчерські центри, підвищення рівня безпеки, методи п'ятої групи мають низку недоліків та обмежень, які характерні четвертій групі та додатково:

- підвищені вимоги до координації між учасниками повітряного руху – адже необхідна тісна взаємодія між всіма користувачами повітряного простору та різними органами управління повітряним рухом.

Методи динамічного управління повітряним простором є наступним етапом еволюції систем управління повітряним рухом, що дозволяють перейти від статичних до гнучких моделей організації повітряного простору.

До останньої, шостої групи, умовно можна віднести **методи використання цифрових технологій у системах управління повітряним рухом**.

На сьогоднішній день сучасні системи управління повітряним рухом вже активно інтегрують цифрові рішення, які засновані на елементах штучного інтелекту, технологіях великих даних, інтегрованих інформаційно-обчислювальних системах, хмарних обчисленнях і цифрових платформах.

Методи даної групи мають наступні особливості [30, 31]:

- автоматизація процесів управління повітряним рухом – коли більша частина процесів управління повітряним рухом передається автоматизованим системам управління;

- підтримка прийняття рішень – коли цифрові технології допомагають диспетчерам оцінювати обстановку, моделювати сценарії розвитку подій для прийняття рішення;

- забезпечення ситуаційної обізнаності – коли на основі інтеграції інформації з різномірних джерел системи управління повітряним рухом формують "повну картину" про поточний стан повітряної обстановки;

- обробка великих обсягів даних в режимі реального часу – коли цифрові технології допомагають диспетчерам обробляти великі обсяги вхідної інформації.

Концепція розвитку методів даної групи сфокусована на наступних напрямках:

- впровадженні інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень;

- використанні хмарних технологій;

- інтеграції технологій великих даних;

- розвитку єдиних цифрових екосистем управління повітряним рухом.

Особливо необхідно відзначити застосування технологій штучного інтелекту у системах управління повітряним рухом.

Це дозволяє: оптимізувати маршрути польоту, прогнозувати розвиток повітряної обстановки та планувати управління потоками повітряного руху, моделювати та виявляти можливі конфлікти між повітряними об'єктами.

Але попри такі переваги як зменшення навантаження на диспетчерів, підвищення рівня безпеки та ефективності управління повітряним рухом, методи п'ятої групи мають низку та обмежень, а саме [30, 31]:

- залежність результату роботи від якості та повноти вхідних даних;

- складність, а в деяких випадках, неможливість інтеграції з існуючими системами управління повітряним рухом;

- високі вимоги до захисту даних та кіберзахисту;

- складність у підготовці персоналу з питань роботи з новими технологіями.

Отже, методи управління повітряним рухом з використанням цифрових технологій є новим та важливим етапом розвитку систем управління повітряним рухом, що забезпечує перехід від відомих методів управління повітряним рухом до більш ефективних, інтелектуальних та адаптивних методів управління повітряним рухом.

Детальний аналіз методів управління повітряним рухом дозволив провести порівняльну характеристику досліджених сучасних методів, яка наведена в табл. 1.

В таблиці зазначено принцип, за яким працює кожна група методів, їх основні переваги та недоліки та рівень ефективності роботи методів в умовах динамічної повітряної обстановки.

Таблиця 1 – Порівняльна характеристика сучасних методів управління повітряним рухом

| Метод управління | Основний принцип | Переваги | Недоліки | Ефективність у динамічній обстановці |
|-------------------------------------|--|--|---|--------------------------------------|
| Традиційне диспетчерське управління | Централізоване управління, фіксовані маршрути та сектори | Висока надійність, переврені процедури | Низька гнучкість, перевантаження диспетчера | Низька |
| Trajectory-Based Operations (TBO) | Управління на основі 4D-траєкторій | Точність прогнозування, зменшення конфліктів | Залежність від якості даних | Середня |
| Air Traffic Flow Management (ATFM) | Балансування попиту і пропускної здатності | Оптимізація потоків, зменшення затримок | Обмежена реакція в реальному часі | Середня |
| UTM / U-space | Автоматизоване управління БПЛА | Масштабованість, інтеграція дронів | Високі вимоги до цифрової інфраструктури | Висока |
| Dynamic Airspace Management (DAM) | Динамічна конфігурація повітряного простору | Гнучкість, адаптивність, ефективність | Складність реалізації | Висока |
| AI-based, DT-based управління | Використання штучного інтелекту та Big Data | Швидкість аналізу, підтримка рішень | Потреба у великих даних, ризику помилок | Дуже висока |

За результатами аналізу можна зробити такі висновки:

– методи традиційного диспетчерського управління є надійними, але недостатньо адаптивними та гнучкими;

– методи управління повітряним рухом на основі траєкторій забезпечує високу точність прогнозування, але залежить від якості та точності вхідних даних;

– методи управління потоками повітряного руху є ефективними для стратегічного планування, але обмежені у реальному часі;

– методи динамічного управління повітряним

простором та методи використання цифрових технологій у системах управління повітряним рухом в умовах динамічної повітряної обстановки забезпечують найкращу адаптивність та ефективність.

Проведений аналіз показав, що в умовах динамічної зміни повітряної обстановки ефективні методи управління повітряним рухом мають забезпечувати: адаптивність до змін повітряної обстановки, оперативність та масштабованість. Іншим критерієм для оцінки методів управління повітряним рухом є рівень їх автоматизації. В табл. 2 наведено оцінку методів управління повітряним рухом за цими ключовими критеріями.

Таблиця 2 – Оцінка методів управління повітряним рухом за ключовими критеріями

| Метод управління | Адаптивність до змін повітряної обстановки | Оперативність | Масштабованість | Рівень автоматизації |
|-------------------------------------|--|---------------|-----------------|----------------------|
| Традиційне диспетчерське управління | Низька | Середня | Низька | Низький |
| Trajectory-Based Operations (TBO) | Середня | Середня | Середня | Середній |
| Air Traffic Flow Management (ATFM) | Середня | Низька | Висока | Середній |
| UTM / U-space | Висока | Висока | Висока | Високий |
| Dynamic Airspace Management (DAM) | Висока | Висока | Висока | Високий |
| AI-based, DT-based управління | Дуже висока | Дуже висока | Дуже висока | Дуже високий |

Отже, проведений порівняльний аналіз існуючих методів управління повітряним рухом в умовах динамічної повітряної обстановки показав, що на сьогодні сучасні методи перебувають на етапі трансформації, яка спрямована на підвищення адаптивності до змін повітряної обстановки, оперативності їх роботи та можливості до масштабування, а також автоматизації та інтеграції великої кількості повітряних об'єктів.

Висновки

У статті проведено комплексний аналіз сучасних методів управління повітряним рухом в умовах динамічної повітряної обстановки. Виокремлено та розглянуто шість основних груп методів управління

повітряним рухом. Встановлено їх основні принципи роботи, їх основні переваги та недоліки та рівень ефективності роботи методів в умовах динамічної повітряної обстановки. Проведено оцінку виокремлених груп методів управління повітряним рухом за такими ключовими критеріями, як адаптивність до змін повітряної обстановки, оперативність, масштабованість та рівень їх автоматизації.

Встановлено, що методи традиційного диспетчерського управління, попри їх надійність, не відповідають сучасним вимогам щодо гнучкості, адаптивності та ефективності. Натомість перспективними є методи динамічного управління повітряним простором, методи управління повітряним рухом в умовах інтеграції БПЛА та методи використання цифрових

технологій у системах управління повітряним рухом, зокрема штучного інтелекту і великих даних.

Доведено, що подальший розвиток систем управління повітряним рухом має бути спрямований на підвищення рівня автоматизації, забезпечення масштабованості, оперативності прийняття рішень та ефективної інтеграції великої кількості повітряних об'єктів повітряного простору. Це дозволить підвищити безпеку польотів і ефективність використання повітряного простору в умовах його навантаження.

Отримані результати можуть бути використані при розробці та удосконаленні методів повітряного руху. Напрямом подальших досліджень є розробка методу управління повітряним рухом з урахуванням сучасних умов динамічної повітряної обстановки.

Конфлікт інтересів

Автори декларують, що не мають конфлікту інтересів стосовно даного дослідження, в тому числі фінансового, особистісного характеру, авторства чи іншого характеру, що міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в даній статті.

Використання засобів штучного інтелекту

Для початкового пошуку літератури та формування структури огляду був використаний генеративний інструмент штучного інтелекту ChatGPT 5, який допоміг систематизувати приблизно 100 джерел. Остаточний аналіз літератури та написання рукопису були виконані автором самостійно.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Державне підприємство обслуговування повітряного руху України. Річні звіти. URL : <https://uksatse.ua/index.php?act=Part&CODE=376>
2. Wandelt S., Antoniou C., Birolini S., Delahaye D., Dresner M., Fu X., Gössling S., Hong S.-J., Odoni A. R., Zanin M., Zhang A., Zhang H., Zhang Y., Sun X. Status quo and challenges in air transport management research. *Journal of the Air Transport Research Society*. 2024. Vol. 2. Article 10001. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jatrs.2024.100014>
3. Global Air Navigation Plan 2016-2030. Montreal : ICAO, 2016. 142 p. URL: https://www.icao.int/sites/default/files/global-airnavigation/9750_5ed_en.pdf
4. Журід В., Тягній В., Васін І., Яковлев Р. Планування та виконання польотів БПЛА в умовах змінного операційного середовища. *Повітряна міць України*. 2026. № 2 (9). С. 133–144. <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2025-2-9-133-144>
5. Supporting European Aviation. Disruption and crisis management. URL : <https://www.eurocontrol.int/disruption-and-crisis-management>
6. Supporting European Aviation. A practical approach to civil-military interoperability. URL: https://www.eurocontrol.int/article/practical-approach-civil-military-interoperability?utm_source=chatgpt.com
7. Davies L., Vagapov Yu., Grout V., et al. Review of Air Traffic Management Systems for UAV Integration into Urban Airspace. *2021 28th International Workshop on Electric Drives: Improving Reliability of Electric Drives (IWED)*. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1109/IWED52055.2021.9376343>
8. Khadmiry B. Airspace Integration Strategies for Safe and Efficient UAV Operations. *The Journal of Unmanned System Technology*. 2022. Vol. 10. No. 3. URL: <https://ojs.unsysdigital.com/index.php/just/article/view/1210>
9. Case R. P., Hupy J. P. Methods for GIS-Driven Airspace Management: Integrating Unmanned Aircraft Systems, Advanced Air Mobility, and Crewed Aircraft in the NAS. *Drones*. 2026. Vol. 10(2). No. 82. DOI: <https://doi.org/10.3390/drones10020082>
10. Schuchardt B. I., Chan W. N., Swieringa K. A., Uijt de Haag M. Special issue on urban air mobility: research on aircraft, infrastructure, operation, and public acceptance. *CEAS Aeronautical Journal*. 2025. Vol. 16. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13272-025-00875-6>.
11. He Z., Wang Z., Li L. Urban Air Mobility: A Review of Recent Advances in Communication, Management, and Sustainability. *Electrical Engineering and Systems Science. Systems and Control*. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.25.10.18235>
12. ICAO (International Civil Aviation Organization). URL : <https://www.icao.int/safety/UA/Pages/UTM-Guidance.aspx>
13. Supporting European Aviation. New integrated ATM/ U-space services and capabilities will meet the airspace integration challenges of Urban Air Mobility. URL: <https://www.eurocontrol.int/article/>
14. Sesar Joint Undertaking. A new concept of operation to integrate drones with traditional aviation. URL : <https://www.sesarju.eu/sesar-solutions/development-integrated-u-space-atm-conops>
15. Aposporis P. A review of global and regional frameworks for the integration of UAS into air traffic management. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*. 2024. Vol. 24. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trip.2024.101064>.
16. Balázs B., Vicsek T., Somorjai G. et al. Decentralized traffic management of autonomous drones. *Swarm Intell*. 2025. Vol. 19. P. 29–53. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11721-024-00241-y>.
17. Xu Q., Pang Y., Liu Y. Dynamic airspace sectorization with machine learning enhanced workload prediction and clustering. *Journal of Air Transport Management*. 2024. Vol. 121 (1):102683. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2024.102683>
18. Supporting European Aviation. Digitalisation and AI in air traffic control: balancing innovation with the human element. URL : <https://www.eurocontrol.int/article/>
19. NOMMON. Research Projects. BigData4ATM. Aviation. URL : https://www.nommon.es/research-projects/bigdata4atm/?utm_source=chatgpt.com
20. Cook A. European Air Traffic Management: Principles, Practice and Research. 2016. 279 p. ISBN-10: 1138255769. URL: <https://www.routledge.com/European-Air-Traffic-Management-Principles-Practice-and-Research/Cook/p/book/9781138255760>
21. Arblaster M. Air Traffic Management: Economics, Regulation and Governance. 2018. 286 p. URL: <https://www.amazon.com/Air-Traffic-Management-Regulation-Governance/dp/0128111186>
22. Gardi A., Marino M., Ramasamy S., Sabatini R., Kistan T. 4-Dimensional Trajectory Optimization Algorithm for Air Traffic Management Systems. Proceedings of the IEEE/AIAA 35th Digital Avionics Systems Conference (DASC). Sacramento, CA, USA, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1109/DASC.2016.7778083>.
23. Gardi A., Sabatini R., Kistan T. Multi-Objective 4D Trajectory Optimisation for Integrated Avionics and Air Traffic Management Systems. Proc. of the IEEE Trans. on A&ES, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1109/TAES.2018.2849238>

24. Kistan T., Gardi A., Sabatini R., Ramasamy S., Batuwangala E. An evolutionary outlook of air traffic flow management techniques. *Progress in Aerospace Sciences*. 2017. Vol. 88. P. 15–42. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2016.10.001>.
25. Aditya V., Aswin D. S., Dhaneesh S. V., Chakravarthy S., Kumar B. S., Venkadavaran M. A review on air traffic flow management optimization: trends, challenges, and future directions. *Discover Sustainability*. 2024. Vol. 5. № 1. DOI: <https://doi.org/10.1007/s43621-024-00781-7>.
26. Capitán C., Pérez-León H., Capitán J., Castano A., Ollero A. Unmanned aerial traffic management system architecture for U-space in-flight services. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11. № 9. Article 3995. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11093995>.
27. AirHub Knowledge Series: Understanding U-space and UTM for Drone Operators. URL : <https://www.airhub.app/resources/news/understanding-u-space-and-utm-for-drone-operators>
28. Rui G., Peng C. Dynamic air route open-close problem for airspace management. *Tsinghua Science and Technology*. 2007. Vol. 12. No. 6. P. 647–651. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1007-0214\(07\)70169-4](https://doi.org/10.1016/S1007-0214(07)70169-4).
29. Kulkarni S., Ganesan R., Sherry L. Dynamic airspace configuration using approximate dynamic programming: intelligence-based paradigm. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2012. Vol. 2266. No. 1. P. 35–42. DOI: <https://doi.org/10.3141/2266-04>
30. Li L. A review of data science and artificial intelligence applications in air transportation systems. *Artificial Intelligence for Transportation*. 2025. Vol. 2. Art. 100023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ait.2025.100023>.
31. Schier-Morgenthal S., Abdellaoui R., Metz I. C. Introducing digital air-traffic controllers for urban-air mobility to ensure safe and energy-efficient flight operations. *CEAS Aeronautical Journal*. 2015. Vol. 16. P. 339–352. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13272-024-00802-1>

Received (Надійшла) 29.12.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 01.04.2026

Publication date (Дата публікації) 22.05.2026

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Баїстов Юрій Вікторович – викладач кафедри інженерно-авіаційного забезпечення факультету авіаційного транспорту інституту цивільної авіації Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна;

Yurii Baistov – Lecturer of the Department of Engineering and Aviation Support, Faculty of Air Transport, Institute of Civil Aviation, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: Yurii_Baistov@gmail.com; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0009-0007-2356-6532>.

Сальник Олег Вікторович – старший науковий співробітник науково-дослідної лабораторії факультету професійної військової та післядипломної освіти Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна;

Oleh Salnyk – Senior Researcher, Scientific Research Department of Faculty of Professional Military and Postgraduate Education of Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: Oleh_Salnyk@gmail.com; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-2688-1198>.

Дроль Олександр Юрійович – старший викладач кафедри тактики та загальновійськових дисциплін Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна;

Oleksandr Drol – Senior Instructor of Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: Oleksandr_Drol@gmail.com; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-5472-208X>.

Мельник Сергій Вікторович – викладач кафедри бойового застосування радіотехнічного озброєння факультету радіотехнічних військ ППО Харківського національного університету Повітряних Сил імені І. Кожедуба, Харків, Україна;

Serhii Melnyk – Lecturer at the Department of Combat Application of Radio Engineering Weapons, Faculty of Radio Engineering Troops of Air Defense of Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: Serhii_Melnyk@gmail.com; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0009-0006-9107-3169>.

Грушенкова Людмила Володимирівна – старший науковий співробітник НДІ воєнної розвідки, Київ, Україна;

Liudmyla Hrushenkova – Senior Research Scientist of Defence Intelligence Research Institute, Kyiv, Ukraine;
e-mail: Liudmyla_Hrushenkova@gmail.com; ORCID Author ID: ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0005-4339-1376>.

Analysis of existing air traffic management methods in a dynamic air situation

Yurii Baistov, Oleh Salnyk, Oleksandr Drol, Liudmyla Hrushenkova

Abstract. The subject of the article is existing methods of air traffic management. The **aim** is to analyze existing air traffic management methods in dynamic air traffic situations. **Tasks:** to analyze existing approaches to air traffic management; to identify groups of air traffic management methods based on a similar principle of action; to conduct a comparative analysis of modern air traffic management methods; to evaluate air traffic management methods based on key criteria. The **methods** used include analytical and empirical methods of comparative research. The **following results were obtained.** A comprehensive analysis of modern air traffic management methods in dynamic air conditions has been carried out. Six main groups of air traffic management methods have been identified and considered. Their basic principles of operation, their main advantages and disadvantages, and the level of efficiency of the methods in dynamic air conditions have been established. The identified groups of air traffic management methods have been assessed according to such key criteria as adaptability to changes in the air situation, efficiency, scalability, and the level of their automation. It has been proven that further development of air traffic management systems should be aimed at increasing the level of automation, ensuring scalability, speed of decision-making, and effective integration of a large number of air objects in the airspace. **Conclusions.** The results obtained can be used to develop and improve air traffic methods. The direction of further research is the development of an air traffic management method that takes into account modern conditions in the dynamic air environment.

Keywords: aviation technology, air object, air traffic management, air traffic management method, dynamic air situation.