

С. О. Шаптала, Т. Ф. Шмельова

Державний університет «Київський авіаційний інститут», Київ, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАВДАННЯ ФОРМУВАННЯ ПОТОКІВ ПОВІТРЯНОГО РУХУ В ІНТЕГРОВАНОМУ ПОВІТРЯНОМУ ПРОСТОРИ

Анотація. Актуальність. Сучасні тенденції розвитку безпілотної авіації, зокрема можливість її експлуатації поза межами прямої видимості, вимагають інтеграції безпілотних систем у загальний повітряний простір. Існуючі системи управління були орієнтовані на пілотовану авіацію, що обмежує ефективність їх використання в нових умовах. **Об'єкт дослідження:** процес формування потоків повітряного руху в умовах інтегрованого повітряного простору. **Мета статті:** визначення напрямків наукових досліджень щодо адаптації, координації та ефективності прийняття рішень в умовах змінної повітряної обстановки, основних принципів планування та організації повітряного простору, розробка математичної моделі постановки задачі оптимізації потоків повітряного руху в інтегрованому повітряному просторі. **Результати дослідження.** У статті визначено основні принципи планування та організації повітряного простору, охарактеризовано роль системи U-space, розроблено математичну модель постановки задачі оптимізації потоків повітряного руху. Запропоновано напрямки наукових досліджень щодо адаптації, координації та ефективності прийняття рішень в умовах змінної повітряної обстановки. **Висновки.** Запропоновані підходи дозволяють забезпечити комплексну автоматизацію процесів формування потоків повітряного руху, моніторингу та навігаційної безпеки в інтегрованому повітряному просторі. **Сфера використання отриманих результатів:** системи управління повітряним рухом, що включають пілотовані та безпілотні літальні апарати, зокрема для національних та міжнародних авіаційних регуляторів.

Ключові слова: транспортні технології, навігація, управління повітряним рухом, безпека, повітряний простір, планування повітряного простору, потоки повітряного простору, адаптація, координація, пілотована авіація, безпілотна авіація, інтеграція.

Вступ

Управління використанням повітряного простору здійснюється за принципами його гнучкого використання, визначеними законодавством Європейського Союзу, документами Євроконтролю [1] та відіграє найважливішу роль в координації і упорядкуванню використання повітряного простору всіх без винятку користувачів не залежно від підпорядкування і належності [1, 2, 3]. Одним із головних видів діяльності при використанні повітряного простору є організація потоків повітряного руху [1], яка призначена для сприяння організації безпечного, упорядкованого та прискореного потоку повітряного руху, забезпечення максимального використання та оптимізації пропускної спроможності європейської мережі організації повітряного руху [4].

Існуюча система використання повітряного простору була розроблена в інтересах і з урахуванням пілотованої авіації. Разом з тим, новий тип споживачів повітряного простору – безпілотна авіація, що впевнено увійшла в наше життя, робить її значною мірою неадекватною для безпілотних операцій як за масштабом так і за розумінням шляхів подальшого розвитку. Сектор безпілотної авіації розвивається швидкими темпами. Широке використання безпілотних літальних апаратів призвело до істотних інновацій, що стало можливим використанням безпілотних літальних апаратів (далі – БПЛА) за межами прямої видимості (далі – BVLOS).

Аналіз літературних джерел. Обсяг світового ринку БПЛА оцінюють у 17,9 млрд доларів 2021 року, і очікується, що середньорічний темп зростання становитиме 11,17%, досягнувши 33,8 млрд доларів до 2027 року [5]. У найбільш динамічно розвинутому ринку БПЛА в Китайській Народній Республіці на тлі

спаду загального обороту авіаційної діяльності пілотованої авіації в період 2020-2022 років на 32,7% спостерігалось зростання кількості польотів БПЛА в 2022 році і в цілому склав 20,67 млн. льотних годин, що на 6,17% більше порівняно з 2021 роком [6].

Завдяки значним інвестиціям і досягнутому прогресу в правовому регулюванні використання повітряного простору [1, 7, 8, 9], безпілотний сектор впевнено займає своє місце в системі повітряних комунікацій, перевезень та обслуговування. Незважаючи на бажання урегулювати незворотній процес зростаючого застосування БПЛА в авіаційній галузі, існуючі методи вже не приводять до бажаного результату. Пошуком нових шляхів подальшого розвитку безпілотної авіації у загальному і організації потоків інтегрованого повітряного руху зокрема займається низка організацій та регуляторів авіаційної діяльності світового рівня [10, 11, 12].

Висновки з аналізу літературних джерел щодо вказують на те, що поділ повітряного простору на застосування пілотованих і безпілотних повітряних суден, є неефективним використанням повітряного простору. Повітряний простір повинен бути повністю інтегрований для того, щоб переваги BVLOS були повністю реалізовані [5].

Таким чином, **метою** роботи є проведення аналізу існуючих систем та методів організації потоків повітряного простору пілотованої авіації та на їх основі визначення основних напрямків наукових досліджень щодо формування потоків пілотованих і безпілотних повітряних суден в інтегрованому (єдиному) повітряному просторі.

Основний матеріал

Планування потоків повітряного руху. Планування потоків повітряного руху є одним із

основних елементів в організації повітряного руху при використанні повітряного простору. Першим міжнародно-правовим документом, що встановив основні принципи використання повітряного простору стала Паризька Конвенція 1919 року. Постійне і динамічне збільшення використання авіаційного транспорту для авіаційних перевезень [13, 14, 15] вимагало удосконалення використання повітряного простору з метою економії коштів і забезпечення безпеки авіаційних перевезень. Не стала виключенням і Чиказька конференція 1944 року, за результатами якої була прийнята Конвенція, де закріплені основні положення, що регулюють відносини держав-учасниць в галузі міжнародної цивільної авіації та створення Міжнародної організації цивільної авіації – ICAO. Положення Чиказької конвенції 1944 р. вплинули на розвиток сучасного міжнародного повітряного права. Інституції, що створилися за її рішенням почали практично втілювати в життя основні положення щодо ефективної організації повітряного простору.

Організація повітряного простору (ПП) як і організація повітряного руху (ПР) – це загальний термін для опису спільної діяльності відповідних повноважних органів, що займаються питаннями планування й організації ПП, планування потоків ПР у межах своїх районів відповідальності з метою найбільш ефективного їхнього використання.

Для визначення основних принципів плануванні організації ПП, що є основою при плануванні потоків ПР були прийняті наступні правила [16]:

1. Виключення переваг одних експлуатантів над іншими.
2. Справедливий поділ використання ПП між всіма експлуатантами.
3. ПП над конкретною державою повинен розглядатися не ізольовано, а як складова частина регіону ICAO.

Грунтуючись на цих міркуваннях були сформовані основні принципи поділу повітряного простору, якими користуються і до сьогодні [16, 17]:

- повний і винятковий суверенітет над повітряним простором (ПП) надає право державі встановлювати правила й процедури виконання польотів;
- виконання положень SARPs ICAO – класифікація ПП, стандарт диспетчерських районів і зон, стандарт маршрутів ОПР, аеронавігаційне оснащення, стандарт позначень;
- розподіл ПП визначається потребою в ОПР (розподіл відповідальності, дотримання принципу CNS/ATM);
- виключення переваг експлуатантів при плануванні ПП і його використанні;
- координація використання ПП (між військовими і цивільними користувачами, а також між органами ОПР суміжних держав регіону).

Кожна країна у встановленому порядку повідомляє в ICAO принципи розподілу свого ПП. Межі районів польотної інформації (РПІ) розглядаються на регіональній нараді суміжних держав і встановлюються з метою забезпечення безперервності ОПР.

Стрімкий розвиток безпілотної авіаційної складової вимагає від регуляторів повітряного простору

постійного пошуку адаптивних підходів для забезпечення юридичної легітимності використання повітряного простору безпілотними літальними апаратами. Розроблено ряд концепцій по правилам застосування БПЛА, однією з яких є виділення окремих зон (районів) для використання виключно БПЛА, так звані U-space [7, 18].

Відповідно до Регламенту [7] повітряний простір U-space означає географічну зону, визначену державами-членами, в якій польоти БПЛА дозволяються лише за підтримки служб U-space, а послуга U-space означає послугу, що спирається на цифрові послуги та автоматизацію функцій, призначених для підтримки безпечного, надійного та ефективного доступу до повітряного простору U-space для великої кількості БПЛА.

U-space – це європейська система [7], яка розробляється для управління рухом та регулювання потоків безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Це набір спеціальних послуг і процедур, призначених для забезпечення безпечного та ефективного доступу до повітряного простору для БПЛА.

Метою U-space є досягнення автоматизованого управління та інтеграції БПЛА, що дозволить виконувати велику кількість операцій, багато з яких є одночасними. Процес має бути інтегрований з існуючою системою управління повітряним рухом.

Першим кроком створення U-space є визначення меж і позначення їх як зон U-space. Це обсяги повітряного простору, в яких, як мінімум, будуть надаватися обов'язкові послуги U-space. Процес виділення повітряного простору для U-space здійснюється регуляторами країн-членів ЄС.

Якщо повітряний простір U-space виділено в межах контрольованого повітряного простору, він повинен підлягати динамічній реконфігурації. Підрозділ управління повітряним рухом може тимчасово обмежити зону, в якій можуть відбуватися операції БПЛА, щоб задовольнити попит на пілотовані перевезення. Це робиться для того, щоб переконатися, що пілотовані повітряні судна, яким надають послуги з управління повітряним рухом (далі – УПР), та БПЛА залишаються відокремленими. Динамічна реконфігурація повітряного простору не є необхідною для експлуатації повітряних суден за правилами візуальних польотів у повітряному просторі класу E і для всіх польотів у класах F і G. У цих випадках інформація про трафік надається відповідним пілотованим рейсам [19].

Послуги в повітряному просторі U-space надаються провайдером послуг U-space. На відміну від надання послуг з управління повітряним рухом, де тільки один провайдер може відповідати за певний обсяг повітряного простору, може існувати декілька провайдерів послуг в U-space, які обслуговують один і той самий повітряний простір.

Процедура розподілу повітряного простору включає в себе крім розподілу на різні категорії зони, ще і формування маршрутів.

В ідеальному випадку, екіпажі повітряних суден бажають виконувати польоти з використанням найбільш прямих маршрутів між точками вильоту й

призначення, крім випадків попадання в складні метеорологічні умови. Однак, через наявність конфліктуючих запитів різних користувачів повітряного простору, звичайно не можливо встановити найбільш спрямлений маршрут, і тому виникає необхідність у знаходженні компромісного рішення між запитами на використання повітряного простору й можливостями їхнього задоволення.

Проведений аналіз тенденцій розвитку системи планування потоків повітряного руху за стандартами ІКАО свідчить, що світова спільнота постійно приділяє велику увагу її розвитку [17]. Постійно вдосконалювалися існуючі й розроблялися нові методи планування потоків повітряного руху, а також знаходилися шляхи підвищення їх ефективного використання з позиції експлуатантів повітряного простору.

Протиріччя між експлуатантами повітряного простору, включаючи тих, хто активно користується безпіотною авіацією, стосовно раціонального використання ресурсів у польотах та належного управління потоками в повітрі, з точки зору забезпечення безпеки повітряної навігації, вимагають знаходження компромісів між ефективністю польотів та їх економічною доцільністю.

Поділ повітряного простору, який розділяє літаки з екіпажем і без екіпажу, є неефективним використанням повітряного простору. Допоки повітряний простір не буде повністю інтегрований, переваги безпілотної авіації не можуть бути реалізованими.

Проте, впровадження інтегрованого повітряного простору на теперішній час, обмежується тільки визначеними зонами через відсутність з практичної точки зору належного обладнання району засобами навігації, що забезпечують необхідну точність польоту; не досконало відпрацьовану систему формування сумісних потоків пілотованої та безпілотної авіації; не відпрацьовану систему координації між суміжними районами в інтегрованому повітряному просторі; не визначену систему динамічного формування області безпеки БПЛА та пілотованих повітряних суден.

Організації потоків повітряного руху. Організація повітряного руху нерозривно пов'язана з такими елементами системи як пропускна здатність ОПР та організації потоків повітряного руху (ОППР).

Пропускна здатність системи ОПР залежить від багатьох факторів, включаючи структуру маршрутів ОПР, навігаційну точність повітряних суден, що використовують даний повітряний простір, метеорологічні фактори і робоче навантаження на диспетчера. Системою ОПР постійно вживаються заходи для забезпечення достатньої пропускної здатності, розрахованої на нормальні та пікові рівні повітряного руху з урахуванням недопущення зниження рівня безпеки польотів. Пропускна здатність ОПР виражається максимальною кількістю повітряних суден, яка може бути прийнята під управління за певний період у даному повітряному просторі або на відповідному аеродромі.

Там, де потреби у русі перевищують пропускну спроможність системи УПР створюється Служба ОППР.

Служба ОППР створюється на основі регіональної аеронавігаційної угоди або, у окремих випадках, багатосторонньої угоди.

Правила організації потоків ОППР здійснюється в три етапи [19]:

а) стратегічне планування, якщо рішення приймається за кілька днів до набуття чинності плану. Стратегічне планування, як правило, здійснюється завчасно за 2-6 міс;

б) передтактичне планування, якщо рішення приймається за день до набуття чинності плану;

с) тактичні операції, якщо рішення приймаються в день набуття чинності плану.

Стратегічне планування

Стратегічне планування здійснюється в координації зі службою УПР та експлуатантами повітряних суден. Воно полягає в аналізі потреб на наступний період, оцінці районів і часу, коли потреби можуть перевищити наявну пропускну здатність системи УПР, і вжиття заходів для усунення незбалансованості за допомогою:

а) вжиття заходів спільно з повноважним органом УПР для забезпечення належної пропускної здатності в необхідному місці і в необхідний час;

б) зміни деяких потоків повітряного руху (орієнтування маршрутів руху);

с) у разі необхідності, планування або перепланування рейсів;

д) визначення необхідності тактичних заходів ОППР.

Там, де вводиться система орієнтації повітряного руху (TOS), маршрути формуються оптимальними за часом і відстанню для відповідних рейсів з допущенням певної гнучкості у виборі маршрутів, зокрема в разі польотів великої протяжності.

У разі узгодження TOS детальна інформація публікується всім відповідним державам у єдиному форматі.

Передтактичне планування

На етапі передтактичного планування стратегічний план приводиться в точну відповідність із поточними потребами. На цьому етапі:

а) можуть бути змінені деякі потоки повітряного руху;

б) можуть бути скоординовані розвантажувальні маршрути;

с) буде прийнято подальше рішення щодо тактичних заходів;

д) для всіх зацікавлених сторін публікуються і надаються докладні дані плану ОППР на наступний день.

Тактичні операції

Тактичні операції ОППР включають:

а) вжиття узгоджених тактичних заходів, для забезпечення розвантажувального і впорядкованого потоку руху, коли потреби можуть перевищити пропускну здатність;

б) контроль за розвитком ситуації в повітряному русі для забезпечення заходів ОППР з метою бажаної віддачі, і для вжиття або ініціювання коригувальних дій, коли повідомляється про тривалі затримки, включаючи зміну маршрутів руху і виділення

ешелонів польоту з метою максимального використання наявної пропускної спроможності УПР.

Якщо потреби в повітряному русі перевищують або передбачається, що перевищать пропускну здатність конкретного сектора або аеродрому, відповідальний орган УПР інформує відповідальний орган ОППР, де такий орган створено, та інші відповідні органи УПР. Льотні екіпажі повітряних суден, які планують політ у цей район, і експлуатанти повинні за можливості негайно інформуватися про очікувані затримки або обмеження, які будуть введені.

Як вже зазначалося вище, формування потоків нерозривно пов'язане з пропускну здатністю управління повітряним рухом. Розробкам методів розрахунку пропускної здатності приділяється постійно висока увага. Особливий інтерес становлять роботи: Директоратом оперативних досліджень та аналізу Сполученого Королівства ("Методика DORATASK для оцінки пропускної спроможності секторів УПР на маршрутах" – проміжна доповідь DORA 8818;

"Застосування методики в існуючих секторах вузлового диспетчерського району Лондона" – проміжна доповідь DORA 8918;

"Калібрування моделі DORATASK в двох секторах на маршруті в Лондонському центрі управління повітряним рухом" – доповідь DORA 8927);

дослідження німецької фірми "Messerschmidt, Bölkow und Blohm (MBB), яке завершилося розробкою методу кількісної оцінки пропускної здатності робочих місць диспетчерів УПР, відомого як "метод MBB". Суть обох методів полягає у вимірюванні часу, необхідного для всіх дій диспетчера, і співвіднесенні його із сумарним наявним часом.

Принципи застосування методики DORATASK для розрахунку пропускної спроможності секторів повітряного простору на маршруті та у вузлового диспетчерському районі (ТМА) по суті однакові. Однак при застосуванні цього методу в секторах ТМА потрібні три істотні зміни. Слід враховувати робоче навантаження, пов'язане із забезпеченням вертикального ешелонування повітряних суден при заході на посадку. Необхідно використовувати інші параметри для визначення потенційних конфліктних ситуацій з урахуванням додаткової складності конкретної структури маршрутів в ТМА. І нарешті, слід застосовувати інший метод моделювання робочого навантаження, пов'язаного з плануванням, з урахуванням того факту, що диспетчер для виявлення конфліктних ситуацій в основному покладається на екран індикатора радіолокатора, а не на табло стрипів.

В основі "методу MBB" для розрахунку пропускної спроможності робочого місця диспетчера УПР лежить кількісна оцінка робочого навантаження на диспетчера радіолокаційного контролю.

Результати досліджень протягом кількох періодів спостереження свідчать про те, що різні умови руху або типи розподілу руху зумовлюють різне робоче навантаження. Таким чином, необхідний час не можна безпосередньо перетворити на кількість повітряних суден, яку можна контролювати. У зв'язку з цим необхідно додатково оцінити кожне повітряне судно з погляду робочого навантаження на

диспетчера і відповідного необхідного йому часу під час керування цими повітряними суднами з урахуванням типу та етапу польоту.

Постановка наукового завдання

Описані вище методи є трудомісткими і, що більш важливо, дають значення пропускної здатності, які застосовні тільки в тих умовах, що визначаються наявністю обладнання, укомплектованістю кадрами, схемами руху тощо, які превалювали під час спостережень. Методи не можуть безпосередньо використовуватися для оцінки пропускної спроможності в умовах майбутньої організації повітряного простору як інтегрованого зі спільним використанням безпілотною та пілотованою авіацією, з різним обладнанням або процедурами, різною інтенсивністю руху або чисельністю кадрів.

Для системи планування повітряних потоків, що є базовою для організації повітряного руху, характерними рисами, що знижують ефективність її функціонування, є велика затратність часу на координацію процесу прийняття рішень, на використання повітряного простору ланок управління різного рівня та виникнення й існування ряду проблемних ситуацій, які виникають при зміні обстановки, що впливає як на необхідне прийняте рішення, так і на вхідні дані першого та наступних етапів планування.

Із проведеного аналізу можна зробити висновок про існування протиріччя між вимогою до системи планування потоків повітряного руху щодо зменшення часу для своєчасного прийняття рішення з одного боку і збільшенням часу на прийняття рішення з іншого через постійну зміну обстановки і збільшення об'єму інформації, яке при введенні в дію інтегрованого повітряного простору буде тільки загострюватися. У такому разі не можливо вирішити це протиріччя без планування потоку повітряного руху як цілісної системи, яка охоплює всі рівні управління, що беруть участь у плануванні.

У кінцевому результаті метою дослідження є забезпечення обґрунтованості планування потоків повітряного руху в умовах впровадження інтегрованого повітряного простору.

Якість функціонування системи планування, ефективність процесу виявлення проблем як при безпосередньому плануванні, так і в системі планування у цілому, а також процесу формування рішень по виявлених проблемах, повинні оцінюватися на основі певної сукупності показників ефективності.

Узагальненими показниками ефективності системи планування потоків повітряного руху вважаємо ефективність прийнятого рішення на застосування та час прийняття рішення через функціонал якості роботи всієї системи планування.

Формалізована постановка завдання щодо синтезу системи планування потоків повітряного руху в інтегрованому повітряному просторі до умов обстановки, що постійно змінюється на основі принципів адаптації та механізму координації за часом різних рівнів управління в умовах інтегрованого повітряного простору буде виглядати наступним чином. Маємо завдання, що стоять перед системою планування потоків повітряного руху на день D . В наявності

директивні значення часу $T_{\text{дир}}$, що відводиться на процес прийняття рішення та величини, що характеризують повітряний рух: щільність повітряного руху $P_S(t)$, інтенсивність повітряного руху $\lambda(t)$, регулярність повітряного руху $p^{(i)}(t_k)$, пропускну здатність системи ОПР $\mu(t_k)$ та коефіцієнт, що характеризує безпеку польотів при управлінні повітряним рухом K . Система огляду повітряного простору постійно надає сукупність інформації h , яка додатково впливає на прийняття рішення. Необхідно визначити таке рішення для кожного із споживачів інтегрованого повітряного руху, яке буде адаптоване до обстановки, що складається на момент прийняття ефективного рішення в мінімально короткі строки.

Математична модель постановки наукового завдання виглядає так:

$$\begin{aligned} \max_{F_{\text{нлППР}}} \min_{t_{\text{ПрР}}} F_{\text{нлППР}} = \\ = f \left[P_S(t), \lambda(t), p^{(i)}(t_k), \mu(t_k), K, h, t_{\text{ПрР}}, P \right] \end{aligned} \quad (1)$$

при таких обмеженнях:

$$P_S(t) \leq P_S(t)_{\text{зад}};$$

$$\lambda(t) \leq \lambda(t)_{\text{зад}};$$

$$t_{\text{ПрР}} \leq T_{\text{дир}};$$

$$p^{(i)}(t_k) \geq p^{(i)}(t_k)_{\text{зад}};$$

$$\mu(t_k) \geq \mu(t_k)_{\text{зад}};$$

$$(\exists_\gamma)(\exists_x) \left[P(x, \overline{D}(\gamma)) \wedge P(\pi_M(x), D) \right].$$

де $F_{\text{нлППР}}$ – функціонал якості планування потоків повітряного руху в інтегрованому повітряному просторі; $P_S(t), P_S(t)_{\text{зад}}$ – відповідно щільність повітряного руху на s -му рівні маршруту та її задана величина; $\lambda(t), \lambda(t)_{\text{зад}}$ – відповідно інтенсивність повітряного руху та її задана величина; $p^{(i)}(t_k), p^{(i)}(t_k)_{\text{зад}}$ – відповідно регулярність повітряного руху в i -й зоні ОПР в період часу $t_1 < t_k < t_2$ та її задана величина; $\mu(t_k), \mu(t_k)_{\text{зад}}$ – відповідно пропускну здатність системи ОПР в період часу $t_1 < t_k < t_2$ та її задана величина; K – коефіцієнт, що характеризує безпеку польотів при управлінні повітряним рухом; h – об'єм інформації, що передається на різні ланки управління щодо обстановки, яка склалася; $t_{\text{ПрР}}, T_{\text{дир}}$ – відповідно час на прийняття рішення та її директивна величина; γ – розпорядження по координаті рішення; x –

рішення, що приймається; P – процес прийняття рішення; $\overline{D}(\gamma)$ – завдання, що вирішується при координаті рішення; $\pi_M(x)$ – розпорядження по управлінню в процесі прийняття рішення; D – завдання, що вирішують при плануванні повітряного простору (глобальне завдання).

Таким чином після вирішення задачі оптимізації буде знайдено рішення щодо плану потоку повітряного руху, що буде задовольняти критерію оптимізації (1) та обмеженням.

Висновки

Таким чином, обґрунтування методів, моделей прийняття рішень при формуванні потоків повітряного руху в інтегрованому повітряному просторі спрямоване на комплексне вирішення завдань автоматизації процесів формування потоків повітряного руху, його моніторингу, забезпечення безпечних умов навігації у широкому спектрі можливих ситуацій повітряного руху.

На першому етапі рекомендується визначити, що формування єдиного повітряного простору для пілотованої і безпілотної авіації є кінцевим станом досягнення інтеграції повітряного простору, включно з перехідними кроками, необхідними для досягнення цієї мети.

На другому етапі, для реалізації цієї мети необхідно вирішити важливе наукове завдання щодо синтезу методів та моделей прийняття рішень при формуванні потоків повітряного руху в інтегрованому повітряному просторі.

Частковими завданнями дослідження для вирішення поставленого наукового завдання визначено таке:

- розробка моделі прийняття рішень з управління польотами пілотованої та безпілотної авіації в системі формування потоків повітряного руху;
- розробка методу координаті в системі прийняття рішень з управління потоками пілотованої та безпілотної авіації;
- розробка методу адаптації до поточної повітряної обстановки в системі формування потоків повітряного руху в інтегрованому повітряному просторі;
- проведення оцінки ефективності методів та моделі прийняття рішень при формуванні потоків повітряного руху;
- розробка рекомендації з реалізації методів та моделі прийняття рішень при формуванні потоків повітряного руху.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Державна авіаційна служба України, Міністерство оборони України, «Наказ № 430/210 Про затвердження Авіаційних правил України «Правила використання повітряного простору України»,» 11 травня 2018. . Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1056-18#Text>
2. Кабінет Міністрів України, «Законодавство України», 06 грудня 2017. . Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/954-2017-%D0%BF#Text>
3. Верховна Рада України, «Законодавство України», 19 травня 2011. . Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3393-17#Text>
4. Державна авіаційна служба України, «Наказ № 567 Про затвердження Авіаційних правил України "Правила організації потоків повітряного руху",» 20 липня 2016. . Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1354-16#n16>

5. P. Nilson, «Integrated airspace: a new UAV vision,» Airport Technology, 20 March 2023. . Available: <https://www.airport-technology.com/features/integrated-airspace-a-new-uav-vision/?cf-view&cf-closed>
6. Civil Aviation Administration of China, «Statistical Bulletin of Civil Aviation Industry Development in 2022,» 25 December 2023. Available: <https://www.caac.gov.cn/English/Research/Reports/Statistical/202312/P020231225495691527532.pdf>.
7. European Union Aviation Safety Agency, «Acceptable Means of Compliance and Guidance Material to Regulation (EU) 2021/664 on a regulatory framework for the U-space,» 16 December 2022. . Available: <https://www.easa.europa.eu/en/document-library/acceptable-means-of-compliance-and-guidance-materials/amc-and-gm-implementing>
8. European Union Aviation Safety Agency, «Easy Access Rules for Unmanned Aircraft Systems,» 28 September 2022. . Available: <https://www.easa.europa.eu/en/document-library/easy-access-rules/easy-access-rules-unmanned-aircraft-systems-regulations-eu#group-publications>
9. Міністерство оборони України, «Наказ «Про затвердження Правил виконання польотів безпілотними авіаційними комплексами державної авіації України» № 661,» 08 Грудня 2016. . Available: https://www.mil.gov.ua/content/yrdday/661_08122016.pdf
10. The UK Drone Association, «BVLOS Operations Forum unites innovators to unlock the next generation of aviation,» ARPAS-UK, 28 July 2022. . Available: <https://www.arpas.uk/bvlos-operations-forum-press-release>
11. European Union Aviation Safety Agency, «Drones & Air Mobility,» . Available: <https://www.easa.europa.eu/en/domains/civil-drones>
12. Federal Aviation Administration, «UAS Information Papers,» Research & Development, . Available: https://www.faa.gov/uas/research_development/information_papers. [Дата звернення: 10 Січня 2024].
13. European Union Aviation Safety Agency, «Annual Safety Review 2022,» 2022. . Available: <https://www.easa.europa.eu/en/document-library/general-publications/annual-safety-review-2022>
14. М. З. Згуровський, «Витоки української авіації,» Київський Політехнік, № 38 (2652), pp. 1-3, 2003.
15. J. G. Leishman, «Introduction to Aerospace Flight Vehicles,» EMBRY-RIDDLE Aeronautical University, January 2024. . Available: <https://eaglepubs.erau.edu/introductiontoaerospaceflightvehicles/chapter/history-of-aircraft-and-aviation>
16. Конвенція про міжнародну цивільну авіацію. Додатки 1-18, Брюссель: Міжнародна організація цивільної авіації, 1990.
17. ICAO, Uniting Aviation a United Nations Specialized Agency, «DOC Series,» . Available: <https://www.icao.int/publications/Pages/doc-series.aspx>.
18. EASA Drones team, «U-space: a quick overview,» 2021. . Available: <https://www.easa.europa.eu/en/what-u-space>
19. Міністерство інфраструктури України, «Наказ № 1009 Про затвердження Класифікації повітряного простору обслуговування повітряного руху України,» 10 грудня 2013. . Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z2203-13#Text>.

Received (Надійшла) 10.12.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 18.03.2025

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Шмельова Тетяна Федорівна – доктор технічних наук, професорка, професор кафедри аеронавігаційних систем, Державне некомерційне підприємство «Державний університет «Київський авіаційний інститут», Київ, Україна;

Tetiana Shmelova – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Department Air Navigation, State Noncommercial Company "State University «Kyiv Aviation Institute», Kyiv, Ukraine;

e-mail: shmelova@ukr.net; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-9737-6906>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57202443723>.

Шаптала Сергій Олександрович – аспірант кафедри аеронавігаційних систем, Державне некомерційне підприємство «Державний університет «Київський авіаційний інститут», Київ, Україна;

Serhii Shaptala – PhD student, Department Air Navigation, State Noncommercial Company "State University «Kyiv Aviation Institute», Kyiv, Ukraine;

e-mail: shaptala128@ukr.net; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-0348-4050>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=58903596200>.

Research on the task of forming air traffic flows in integrated airspace

Serhii Shaptala, Tetiana Shmelova

Abstract. Relevance. Modern trends in the development of unmanned aviation, particularly the ability to operate beyond visual line of sight, require the integration of unmanned systems into general airspace. Existing air traffic management systems were designed primarily for manned aviation, which limits their efficiency under new conditions. **Object of the research:** the process of forming air traffic flows in integrated airspace. **Purpose of the article:** to identify directions of scientific research on adaptation, coordination, and decision-making efficiency in a changing air traffic environment; to define the main principles of airspace planning and organization; and to develop a mathematical model for optimizing air traffic flow in integrated airspace. **Research results.** The article outlines the main principles of airspace planning and organization, highlights the role of the U-space system, and proposes a mathematical model for setting the optimization problem of air traffic flows. Directions for scientific research on adaptation, coordination, and decision-making efficiency under dynamic air conditions are presented. **Conclusions.** The proposed approaches enable comprehensive automation of the processes of forming air traffic flows, monitoring, and ensuring navigational safety in integrated airspace. **Application area of the results:** air traffic management systems incorporating both manned and unmanned aerial vehicles, particularly for national and international aviation regulators.

Keywords: transport technologies, navigation, air traffic control, safety, airspace, airspace planning, airspace flows, adaptation, coordination, manned aviation, unmanned aviation, integration.