

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УКРАЇНСЬКА ДЕРЖАВНА ЛЬОТНА АКАДЕМІЯ

Факультет авіаційного менеджменту
Кафедра аеронавігації, метеорології та організації повітряного руху

Ставертій Анастасія Станіславівна

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
**РОЗРОБКА ВІРТУАЛЬНОГО НАВЧАЛЬНОГО СЕРЕДОВИЩА ДЛЯ
ТРЕНУВАННЯ НАВИЧОК КОМАНДНОЇ ВЗАЄМОДІЇ ДИСПЕТЧЕРІВ
УПРАВЛІННЯ ПОВІТРЯНИМ РУХОМ**

Спеціальність 272 «Авіаційний транспорт»

ОПП «Авіаційний транспорт»

Освітній ступінь – магістр

«Допустити до захисту»

Т.в.о. завідувача кафедри

к.т.н., доцент _____ А.С. Пальоний

«_____» _____ 2025 р.

Науковий керівник:

к.т.н., доцент _____ А.С. Пальоний

Робота захищена:

«_____» _____ 2025 р.

з оцінкою _____

Голова ЕК

д.т.н., професор _____ Т.Ф. Шмельова

Кропивницький 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Отримання завдання на кваліфікаційну роботу	15.06.2024-24.06.2024	Вик.
2	Визначення об'єкту, предмету, мети та завдань дослідження	24.06.2024-10.07.2024	Вик.
3	Інформаційний пошук, аналіз літературних джерел з теми дослідження, складання робочого плану кваліфікаційної роботи	11.07.2024-20.07.2024	Вик.
4	Виконання теоретико-методологічного розділу	24.06.2024-04.07.2024	Вик.
5	Виконання дослідницько-аналітичного розділу	05.07.2024-20.07.2024	Вик.
6	Виконання проєктно-рекомендаційного розділу	02.09.2024-13.10.2024	Вик.
7	Підготовка вступу	14.10.2024-20.10.2024	Вик.
8	Підготовка висновків та додатків	21.10.2024-16.11.2024	Вик.
9	Підготовка списку літератури	17.11.2024-25.11.2024	Вик.
10	Оформлення кваліфікаційної роботи	26.11.2024-26.12.2024	Вик.
11	Перевірка кваліфікаційної роботи на плагіат	27.12.2024-07.01.2025	Вик.
12	Отримання висновку про роботу наукового керівника і допуску на захист від кафедри	08.01.2025-10.01.2025	Вик.
13	Зовнішнє рецензування кваліфікаційної роботи	11.01.2025-13.01.2025	Вик.
14	Підготовка кваліфікаційної роботи до захисту	14.01.2025-20.01.2025	Вик.

Здобувач вищої освіти _____ (підпис) _____ (прізвище та ініціали)

«__» _____ 2025 р.

АНОТАЦІЯ

Ставертій А.С. Розробка віртуального навчального середовища для тренування навичок командної взаємодії диспетчерів управління повітряним рухом. – Рукопис.

Дослідження на здобуття освітнього ступеня «магістр» за спеціальністю 272 «Авіаційний транспорт». – Українська державна льотна академія, Кропивницький, 2025.

У роботі досліджено теоретичні засади та практичні аспекти розробки адаптивного віртуального навчального середовища для формування навичок командної взаємодії авіадиспетчерів. Проаналізовано сучасний стан підготовки диспетчерів УПР та можливості застосування інноваційних інформаційно-комунікаційних технологій для підвищення її ефективності. Обґрунтовано концептуальні засади побудови віртуального навчального середовища на основі принципів системної інтеграції, динамічної адаптації та проактивного забезпечення безпеки польотів. Розроблено мультиагентну модель CRAFT та структуру адаптивного віртуального середовища, що забезпечує комплексний розвиток індивідуальних навичок та командної компетентності авіадиспетчерів через персоналізовані навчальні сценарії та моніторинг ефективності навчальної діяльності.

Ключові слова: авіадиспетчер, віртуальне навчальне середовище, командна взаємодія, адаптивне навчання, мультиагентна система, професійна підготовка, безпека польотів.

ABSTRACT

Stavertii A.S. Development of a Virtual Learning Environment for Training Team Interaction Skills of Air Traffic Controllers. – Manuscript.

Research for obtaining the educational degree "Master" in specialty 272 "Aviation Transport". – Ukrainian State Flight Academy, Kropyvnytskyi, 2025.

The research investigates theoretical foundations and practical aspects of developing an adaptive virtual learning environment for forming air traffic controllers' team interaction skills. The current state of ATC training and opportunities for implementing innovative information and communication technologies to enhance its effectiveness are analyzed. The conceptual framework for building a virtual learning environment based on principles of system integration, dynamic adaptation, and proactive flight safety assurance is substantiated. The CRAFT multi-agent model and structure of the adaptive virtual environment have been developed, providing comprehensive development of individual skills and team competency of air traffic controllers through personalized learning scenarios and monitoring the effectiveness of training.

Keywords: air traffic controller, virtual learning environment, team interaction, adaptive learning, multi-agent system, professional training, flight safety.

ЗМІСТ

Умовні скорочення.....	11
Вступ.....	12
Розділ 1. Аналіз теоретичних засад розробки віртуальних навчальних середовищ для підготовки авіадиспетчерів.....	18
1.1. Дослідження сучасного стану, проблем і тенденцій в сфері підготовки авіадиспетчерів.....	19
1.2. Аналіз сучасних інформаційно-комунікаційних і освітніх технологій для створення адаптивних віртуальних навчальних середовищ.....	25
1.3. Аналіз особливостей комунікації та спільного прийняття рішень в колективах диспетчерських змін та ключових складових командної компетентності авіадиспетчерів.....	35
1.4. Аналіз можливостей застосування адаптивного підходу до навчання для формування навичок командної роботи авіадиспетчерів.....	40
Висновки по розділу 1.....	44
Розділ 2. Аналіз концептуальних засад побудови інтерактивного віртуального навчального середовища з розвитку командної компетентності авіадиспетчерів.....	46
2.1 Формулювання принципів проектування віртуального навчального середовища для розвитку командної компетентності авіадиспетчерів та сценаріїв їх застосування.....	46
2.2 Визначення структурних компонент і типів інтелектуальних агентів підтримки процесу навчання віртуального навчального середовища для розвитку навичок комунікації, координації та спільного прийняття рішень авіадиспетчерів.....	54
Висновки по розділу 2.....	60
Розділ 3. Моделювання адаптивного віртуального навчального середовища з розвитку навичок командної взаємодії авіадиспетчерів....	62

3.1 Розробка мультиагентної моделі адаптивного віртуального навчального середовища з розвитку командної компетенції авіадиспетчерів.....	62
3.2 Розробка структури адаптивного віртуального навчального середовища з розвитку навичок командної взаємодії авіадиспетчерів.....	74
Висновки до розділу 3.....	82
Загальні висновки.....	84
Список використаних джерел.....	86

УМОВНІ СКОРОЧЕННЯ

ABHC – Адаптивне віртуальне навчальне середовища

ІКТ – інформаційно-комунікаційні технології

ОПР – Обслуговування повітряного руху

ОрПР – організація повітряного руху

УПР – управління повітряним рухом

AI – Artificial Intelligence (Штучний інтелект)

LLM – Large Language Model

PTP – Part-Task Trainers

TRM – Team Resource Management

VR/AR – Virtual Reality/Augmented Reality (Віртуальна реальність/Доповнена реальність)

ВСТУП

Актуальність дослідження. Трансформація системи управління повітряним рухом в епоху цифровізації створює нові виклики для авіаційної галузі. Впровадження технологій NextGen разом зі зростанням кількості польотів підвищує когнітивне навантаження на диспетчерів управління повітряним рухом (УПР), що вимагає вдосконалення їхньої професійної підготовки для гарантування безпеки польотів.

Ключовим аспектом підготовки стає розвиток навичок командної роботи, оскільки ефективна взаємодія в диспетчерських змінах безпосередньо впливає на безпеку польотів, оптимізацію потоків повітряного руху та раціональне використання повітряного простору. Командне навчання в галузі УПР передбачає тісну співпрацю між диспетчерами та іншими фахівцями авіаційної сфери. Такий підхід сприяє вдосконаленню комунікативних навичок, полегшує вирішення конфліктних ситуацій та покращує розуміння розподілу обов'язків у команді. Важливо зазначити, що командне навчання підвищує загальну ефективність роботи через розвиток спільної ситуаційної обізнаності та зміцнення довіри між учасниками. Проте варто враховувати, що при значному когнітивному навантаженні та часових обмеженнях ефективність командної взаємодії під час тренувань може знижуватися.

Управління ресурсами команди (TRM) визнано ICAO та іншими міжнародними авіаційними регуляторами фундаментальним елементом безпеки в авіації. TRM базується на успішному досвіді програм CRM для підготовки екіпажів, що значно зменшило кількість інцидентів, пов'язаних з людським фактором. Вимоги ICAO та EUROCONTROL передбачають навчання диспетчерів УПР управлінню ризиками, стресом та втомою як на особистому, так і на командному рівні. Модель компетенцій ICAO для диспетчерів УПР включає навички командної роботи, комунікації, лідерства та ситуаційної обізнаності, які розвиваються через TRM-тренінги з урахуванням специфіки різних країн.

Адаптивне віртуальне навчальне середовище (АВНС) є ефективним інструментом для вирішення цих завдань. Головна перевага АВНС полягає в можливості відпрацювання взаємодії диспетчерів різних підрозділів у єдиному віртуальному просторі незалежно від їх місцезнаходження. Автоматизація створення навчальних сценаріїв та оцінювання командної роботи за допомогою інтелектуальних агентів підвищує ефективність навчання, економить ресурси та забезпечує об'єктивність оцінювання.

Мета та задачі роботи. Метою кваліфікаційної роботи є підвищення ефективності формування навичок командної взаємодії диспетчерів УПР шляхом розробки інтерактивного віртуального навчального середовища на основі адаптивного навчання з використанням сучасних інформаційно-комунікаційних технологій.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні **задачі**:

1. Проаналізувати сучасний стан, проблеми і тенденції в сфері підготовки диспетчерів УПР та використання адаптивного підходу до навчання. Визначити потенційні можливості та переваги його використання в сфері формування навичок командної взаємодії диспетчерів УПР.

2. Проаналізувати можливості та принципи використання сучасних технологій: генеративного AI та машинного навчання, LLM (нейросіток), великих даних (Big Data) та навчальної аналітики (Learning Analytics), VR і AR, розподіленого реєстру та смарт-контрактів, гейміфікації та ігрового дизайну, мобільного навчання (M-learning) та мікронавчання (Microlearning), афективних обчислень, кооперативного навчання (Collaborative learning) та хмарних технологій для створення оптимального адаптивного віртуального середовища навчання.

3. Обґрунтувати концептуальні засади та принципи побудови АВНС для відпрацювання навичок командної взаємодії диспетчерів УПР

4. Розробити мультиагентну модель і структуру АВНС для формування командної компетенції диспетчерів УПР, ґрунтуючись на принципах персоналізованого і адаптивного навчання у форматі адаптивної співпраці

(для вирішення командних тренувальних проблемних завдань) із використанням інноваційних інформаційно-комунікаційних та освітніх технологій.

Об'єктом дослідження є процеси розвитку навичок командної роботи диспетчерів УПР.

Предметом дослідження є віртуальне адаптивне навчальне середовище для тренування навичок командної взаємодії авіадиспетчерів на засадах інтерактивного навчання.

Методи дослідження. В ході виконання роботи для вирішення поставлених завдань дослідження застосовувалися такі наукові методи:

1. Системний аналіз та порівняльний аналіз застосовувалися:

а. При вивченні наукової літератури та нормативних документів, що стосуються сучасного стану підготовки диспетчерів УПР в сфері розвитку командної компетентності.

б. При дослідженні різних методик підготовки з розвитку навичок командної взаємодії авіаційних операторів та відповідних інноваційних інформаційно-комунікаційних інструментів, застосовні в сфері вищої освіти і професійного навчання.

2. Системно-структурний підхід застосовувався при розробці принципів та концептуальних засад побудови АВНС для формування й розвитку навичок командної взаємодії авіадиспетчерів.

3. Об'єктно-орієнтоване проєктування та структурно-функціональне моделювання при розробці архітектури АВНС для тренування навичок командної взаємодії авіадиспетчерів та мультиагентної моделі АВНС «CRAFT».

Теоретичною та методологічною основою дослідження є наукові роботи в сфері безпеки польотів, управління повітряним рухом, людського фактору в цивільній авіації та інноваційних підходів до професійної підготовки. Важливе місце в методологічному фундаменті нашого дослідження займають концепції командного навчання та теорія соціального

конструктивізму, що пояснюють механізми формування знань та навичок через взаємодію в групі. Технологічний аспект дослідження спирається на теорію AI та машинного навчання, що забезпечує основу для створення АВНС. Концепції VR і AR, разом з теорією імерсивного навчання, формують базис для розробки інтерактивного навчального середовища.

Наукова новизна дослідження. Вперше обґрунтовано та розроблено концептуальну модель інтерактивного АВНС для розвитку навичок командної взаємодії диспетчерів УПР, що базується на інтеграції підходів адаптивного та колаборативного навчання. Запропонований підхід використовує віртуальних інтелектуальних агентів для підтримки процесу формування навичок командної роботи. Агенти використовуватимуть технологію AI для формування адаптивних стратегій тренування та генерації змісту тренувальних вправ, а також надання персоналізованих інструкцій, рекомендацій і зворотного зв'язку щодо ефективності взаємодії кожного авіадиспетчера в командних сценаріях. Застосування зазначеного підходу до формування адаптивних навчальних стратегій забезпечуватиме умови для формулювання, важливих для безперервної професійної підготовки авіадиспетчерів, навичок саморегульованого і самоспрямованого навчання.

Практична значимість дослідження. Реалізація запропонованого комплексного підходу до побудови АВНС дозволить майбутнім та діючим авіадиспетчерам набути досвіду ефективної командної взаємодії у позаштатних та аварійних сценаріях. Занурення авіадиспетчерів у сценарії командної взаємодії в умовах віртуального навчального середовища, що відтворює загальну професійну специфіку та конкретні проблемні завдання, сприятиме цілеспрямованому формуванню потрібних навичок прийняття командних рішень та їх спільного виконання. АВНС має автоматично збирати та аналізувати дані про дії учнів під час тренувальних сесій (наприклад, час реакції, правильність рішень, дотримання процедур УПР тощо). На основі цих даних система може забезпечувати об'єктивний зворотний зв'язок щодо ефективності дій учнів, вказувати на помилки та надавати рекомендації щодо

вдосконалення навичок. Це дозволить авіадиспетчерам отримувати більш точну та неупереджену оцінку своїх навичок, ніж при використанні реальних тренажерів, при роботі на яких оцінювання часто базується на суб'єктивних судженнях інструкторів. Все це сприятиме зниженню кількості помилок, зумовлених людським чинником, спричинених недостатньо сформованими компетентностями, пов'язаних з комунікативною та командною складовою роботи авіадиспетчерів. Інтегровані в таке навчальне середовище інструменти забезпечення спільного доступу та зворотного зв'язку дозволять акумулювати, аналізувати та поширювати кращий досвід та ефективні практики навчальної діяльності авіадиспетчерів. АВНС, на відміну від застосування повноцінних тренажерів, що використовують фіксовані характеристики, дозволить швидко змінювати сценарії, умови та рівень складності тренувальних вправ залежно від індивідуального прогресу та потреб авіадиспетчерів. Адаптивність навчального процесу та застосування РТР-симуляторів в межах АВНС дозволить скоротити час та фінансові витрати на підготовку диспетчерів УПР. Все це дасть змогу частково замінити використання високовартісних реалістичних тренажерів та скоротити витрати на відрядження для працюючих авіадиспетчерів, забезпечуючи більшу часову гнучкість і доступність процесу підготовки диспетчерів УПР.

Апробація результатів кваліфікаційної роботи. Основні теоретичні положення магістерського дослідження оприлюднено та обговорено на 1-й міжнародній науково-практичній конференції «Modern Trends in the Development of Economy, Technology and Industry» (Toronto, Canada, January 15-17, 2025).

За результатами проведених наукових досліджень опубліковано **тези доповідей**: Пальоний А. С., Ставертій А. С. Адаптивне віртуальне навчальне середовище як засіб удосконалення командної компетенції авіадиспетчерів. *Modern Trends in the Development of Economy, Technology and Industry: I International scientific and practical conference* (January 15-17, 2025). Toronto, Canada, International Scientific Unity. 2025. С. 106-111.

Структура, зміст та обсяг кваліфікаційної роботи. Кваліфікаційна робота складається з вступу, трьох розділів, висновків та списку використаних джерел (64 найменування). Загальний обсяг роботи становить 93 сторінки друкованого тексту, в тому числі 85 сторінок основного тексту та 9 сторінок списку використаних джерел. Кваліфікаційна робота містить 1 таблицю, 2 рисунки.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ТЕОРЕТИЧНИХ ЗАСАД РОЗРОБКИ ВІРТУАЛЬНИХ НАВЧАЛЬНИХ СЕРЕДОВИЩ ДЛЯ ПІДГОТОВКИ АВІАДИСПЕТЧЕРІВ

Робоче місце диспетчера УПР – це місце, на якому зосереджене управління повітряним рухом, коли кожна секунда має значення, а кожне рішення впливає на безпеку сотень людей. Від чіткої координації авіадиспетчерів та миттєвої реакції на проблемні ситуації залежить злагоджена робота всієї системи ОрПР, а отже, і безпека польотів [1].

Навчання цієї професії завжди було складним процесом, адже стандартні методи, що базуються на теоретичних заняттях і практиці під наглядом досвідчених наставників, не можуть повністю підготувати майбутнього диспетчера до реальних викликів. Ситуації, з якими він може зіткнутися під час роботи, надто різноманітні: від щоденної рутини до екстремальних обставин, коли кожна секунда може змінити хід подій. Традиційні методи навчання не завжди дозволяють змоделювати критичні умови, у яких диспетчер повинен діяти швидко, чітко й безпомилково [2]. Саме тому віртуальні навчальні середовища стали важливим кроком у підготовці авіадиспетчерів. Це технологічний інструмент, що дає можливість відтворювати реальні сценарії у безпечному середовищі, дозволяючи студентам отримати цінний досвід без ризику для життя. У віртуальній реальності створюються точні копії диспетчерських центрів, оснащених усіма необхідними системами управління. Студент працює в умовах, максимально наближених до реальних: перед ним – екрани радарів, він чує команди пілотів і колег, аналізує ситуацію та ухвалює рішення [3].

Перевагою таких тренувань є можливість відпрацювання будь-яких сценаріїв. У стандартних умовах стажер навряд чи отримає досвід роботи під час технічних збоїв, складних погодних умов або надзвичайних ситуацій. Віртуальне середовище ж дозволяє змоделювати ситуацію, у якій диспетчер

змушений діяти в умовах невизначеності, приймати рішення під тиском та зберігати контроль над ситуацією навіть у найкритичніші моменти [4]. Окрім розвитку технічних навичок, такі тренування допомагають удосконалювати командну взаємодію. УПР – це не індивідуальна робота, а злагоджений механізм, у якому авіадиспетчери взаємодіють один з одним, передаючи інформацію та координуючи дії. Навчальні симуляції дозволяють студентам працювати у змодельованих групах, розподіляти обов’язки, навчатися комунікації та оперативному обміну інформацією [5].

Важливою особливістю сучасних віртуальних систем є їхня адаптивність. Завдяки штучному інтелекту програми можуть аналізувати помилки студента та підлаштовувати сценарії відповідно до його рівня підготовки. Якщо він демонструє труднощі у роботі з високим трафіком або в екстрених умовах, система збільшить кількість таких завдань, допомагаючи йому поступово адаптуватися до складніших викликів [6].

Запровадження віртуальних навчальних середовищ у підготовку диспетчерів УПР є не просто технологічним удосконаленням, а необхідною зміною підходу до навчання. Це можливість ще до початку реальної роботи зануритися у професійне середовище, набути критично важливих навичок та навчитися діяти швидко, впевнено й безпомилково. У світі, в якому повітряний рух стає дедалі інтенсивнішим, а ризики – більш непередбачуваними, якість підготовки авіадиспетчерів визначає не лише ефективність повітряного простору, а й рівень безпеки всіх, хто довіряє своє життя авіації.

1.1 Дослідження сучасного стану, проблем і тенденцій в сфері підготовки авіадиспетчерів

Підготовка авіадиспетчерів є невід’ємною частиною авіаційної освіти, яка визначає рівень безпеки повітряного руху. З огляду на швидке зростання авіаційної галузі – збільшення кількості рейсів, зростання інтенсивності

трафіку, удосконалення літаків та інфраструктури аеропортів – роль диспетчерів УПР стає ще більш важливою. Вони відповідають за координацію польотів, взаємодію з пілотами та управління повітряним рухом у реальному часі. Висока кваліфікація авіадиспетчерів дозволяє забезпечувати безпеку та оперативно реагувати на зміну обставин, зберігаючи контроль над ситуацією навіть у критичних умовах [7].

Насьогодні система підготовки авіадиспетчерів вийшла далеко за межі звичайного навчання. Традиційні теоретичні курси доповнюються сучасними технологіями, що дозволяють максимально наблизити процес навчання до реальних умов. Симулятори польотів дають змогу студентам відчувати себе в центрі подій, працюючи в режимі реального часу. Автоматизовані навчальні платформи на основі штучного інтелекту аналізують дії майбутніх диспетчерів і підлаштовують тренування відповідно до їхніх сильних та слабких сторін. Віртуальна реальність відкриває можливість імітувати складні та нестандартні ситуації, які рідко трапляються у звичайній практиці, але можуть стати вирішальними у реальному житті. Згідно з дослідженням Міжнародної організації цивільної авіації (ICAO), «використання синтетичних засобів тренажу УПР під час навчання може скоротити час, необхідний диспетчеру для повної готовності до 30% [8].

Окрему увагу приділяють відповідності міжнародним стандартам. Міжнародна організація цивільної авіації (ICAO) та Європейська організація з безпеки аеронавігації (EUROCONTROL) встановлюють чіткі вимоги до підготовки диспетчерів, що дозволяє їм ефективно працювати в будь-якій точці світу. [9] Одним із ключових аспектів навчання є також мовна підготовка, адже англійська мова – це універсальна мова авіації. Диспетчер повинен чітко та швидко передавати інформацію пілотам із різних країн, не допускаючи двозначностей або помилок, адже в авіації навіть незначне непорозуміння може мати серйозні наслідки, ці ж стандарти використовуються для правильного та насиченого тренування

авіадиспетчерів, з урахуванням викликів сучасності та новітності технологій, саме сучасний стан [10].

На сьогоднішній день підготовка авіадиспетчерів включає не лише теоретичні курси, а й інтеграцію сучасних технологій, що дозволяють створювати умови, наближені до реальних. Одним із важливих аспектів є впровадження симуляторів польотів, автоматизованих навчальних платформ, що базуються на штучному інтелекті, а також новітніх технологій віртуальної реальності (VR). Це дозволяє студентам здобувати практичні навички в умовах, максимально наближених до реальних. Так, за допомогою віртуальних тренажерів можна моделювати надзвичайні ситуації, що дозволяє тренувати диспетчерів до дій в умовах стресу, що є критичним для безпеки [11].

У табл. 1.1 порівнюються функціональні можливості базових і удосконалених тренажерів УПР, а саме з використанням технологій VR.

Таблиця 1.1 Порівняльна характеристика базових та удосконалених диспетчерських тренажерів

Функція	Базовий тренажер	Удосконалений тренажер
Підтримка 3D- візуалізації	Обмежена	Повна, високоякісна
Кількість ПС, що можуть брати участь у тренуванні	до 50	200+
Імітація відмов	Базова	Удосконалена
Інтеграція з реальними системами	Ні	Так
Можливість командного тренування	Обмежена	Повна

Використання тренажерів УПР в навчальному процесі приносить ряд відчутних переваг, як для кандидатів, так і для всієї системи організації повітряного руху. Надаючи передові рішення для моделювання, сприяє підвищенню стандартів безпеки в авіації.

До ключових переваг застосування тренажерів УПР відносяться :

1. Підвищення безпеки польотів шляхом кращої підготовки диспетчерів.
2. Оптимізація витрат на навчання.
3. Можливість тренуватися в екстремальних умовах без ризику.
4. Гнучкість у створенні сценаріїв навчання.
5. Постійне підвищення кваліфікації досвідчених авіадиспетчерів.

Дослідження Eurocontrol показало, що «диспетчери, навчені за допомогою передових тренажерів, демонструють на 25% вищу ефективність в управлінні надзвичайними ситуаціями порівняно з групами, навченими традиційними методами». GB Aircraft, як постачальник систем EDDA, активно сприяє впровадженню цих переваг у систему підготовки авіадиспетчерів Польщі [9]. Однак активне впровадження сучасних технологій та міжнародних стандартів, навчання авіадиспетчерів стикається з низкою критичних проблем:

1. Психологічна готовність і стресостійкість. Робота авіадиспетчера – це постійна робота в умовах високого навантаження, де кожне рішення має значення для безпеки польотів. Необхідність швидкого аналізу складних ситуацій, координації трафіку в умовах обмеженого часу та управління нестандартними ситуаціями вимагає виняткової психологічної витривалості. Однак традиційні навчальні методики не завжди здатні імітувати реальні стресові умови, що потребує більш глибокого підходу до психологічної підготовки диспетчерів [12].

2. Недостатнє технічне оснащення. Високоякісне навчання авіадиспетчерів неможливе без сучасних симуляторів і тренажерних комплексів, які здатні відтворювати сценарії реального трафіку, екстремальні умови та нестандартні ситуації. Проте обмежене фінансування у деяких навчальних закладах призводить до нестачі сучасних технологій, що негативно впливає на рівень підготовки майбутніх диспетчерів. Саме на Маракешській міжнародній науково-практичній конференції 2000 року розглядалось це питання [13].

3. Розрив між теорією та практикою. Навчальні програми часто зосереджені на вивченні процедур, регламентів і теоретичних аспектів управління повітряним рухом. Однак недостатня кількість годин, проведених за пультом в умовах, максимально наближених до реальних, призводить до того, що випускники можуть мати обмежені навички оперативного керування трафіком.

4. Англійська мова як обов'язковий елемент професії Авіаційна англійська є стандартом ІКАО, і диспетчери мають володіти нею на рівні, достатньому для чіткої та безпомилкової комунікації з екіпажами з усього світу [14]. Однак рівень мовної підготовки студентів часто не відповідає реальним вимогам, що створює потенційні ризики під час міжнародних операцій [15].

5. Інтенсивне навантаження на тренувальні програми З кожним роком зростає обсяг авіарейсів і збільшується складність повітряного руху. Це ставить підвищені вимоги до тренувальних програм, які мають адаптувати майбутніх диспетчерів до роботи в умовах високого трафіку, з мінімальним часом на прийняття рішень та необхідністю одночасно контролювати велику кількість повітряних суден [16].

6. Для забезпечення стабільного рівня безпеки в авіації підготовка авіадиспетчерів має розвиватися відповідно до реальних викликів галузі, інтегруючи сучасні технології, адаптовані методи навчання та практичний досвід, максимально наближений до умов реальної роботи.

Сучасні виклики в авіації вимагають оновлених підходів до навчання диспетчерів, що дозволяє адаптувати їх до зростаючих навантажень і технологічних змін у повітряному русі. Віртуальна реальність (VR) та передові симулятори дедалі активніше використовуються у навчанні [17]. Це дає змогу відтворювати максимально реалістичні сценарії, починаючи від штатного управління трафіком до критичних ситуацій, таких як відмова систем повітряного судна чи раптове погіршення метеоумов [18]. Значна увага приділяється взаємодії диспетчерів з іншими учасниками авіаційного процесу. Окрім роботи з пілотами, все більше часу відводиться на координацію дій із метеорологічними службами, операторами аеропортів, службами аварійного реагування та військовими структурами. Синхронізація роботи всіх підрозділів є критичною для підвищення рівня безпеки польотів [19].

AI відіграє ключову роль у персоналізації навчання [20]. Аналітичні алгоритми аналізують дії диспетчерів під час тренувань, визначають їхні сильні та слабкі сторони і формують індивідуальні програми розвитку. Це дозволяє зосередити увагу на критичних навичках і підвищити ефективність підготовки [21].

Автоматизація та цифровізація навчального процесу також набирають обертів. Використання спеціалізованих платформ скорочує час підготовки, знижує вплив людського фактора та створює адаптивне навчальне середовище, яке може підлаштовуватися під зміну авіаційних стандартів та технологій [22].

Глобалізація авіаційної галузі вимагає уніфікації стандартів підготовки диспетчерів відповідно до вимог ICAO та Eurocontrol. Це дозволяє випускникам швидко адаптуватися до роботи в міжнародних аеропортах та забезпечує єдиний рівень компетентності незалежно від країни чи регіону.

Інтеграція сучасних технологій у навчальний процес дає змогу готувати диспетчерів УПР до реальних викликів у повітряному русі, підвищуючи якість управління та загальний рівень безпеки авіації [23].

1.2 Аналіз сучасних інформаційно-комунікаційних і освітніх технологій для створення адаптивних віртуальних навчальних середовищ

Сучасні інформаційно-комунікаційні технології (ІКТ) значно трансформували підходи до освіти, відкриваючи нові можливості для створення АВНС. Такі середовища забезпечують персоналізований навчальний процес, враховуючи індивідуальні особливості студентів та їхню динаміку успішності.

АВНС є програмними платформами, що дозволяють організовувати дистанційне навчання, автоматизувати оцінювання, забезпечувати інтерактивну взаємодію між викладачами та студентами, а також аналізувати навчальні досягнення. Відмінною особливістю таких систем є можливість налаштування контенту та завдань відповідно до рівня знань, інтересів і темпу навчання кожного користувача.

Основними компонентами АВНС є системи управління навчанням (LMS) – платформи, що забезпечують організацію навчального процесу, збереження та доступ до навчальних матеріалів, оцінювання знань та зворотний зв'язок. Популярні рішення, такі як Moodle, Blackboard, Canvas і Google Classroom, дозволяють автоматизувати процес навчання, що зменшує навантаження на викладачів і підвищує ефективність засвоєння матеріалу. Розглянемо тепер ці системи детальніше.

LMS включають такі основні можливості:

- Організація навчального процесу. LMS забезпечують створення курсів, реєстрацію студентів, розподіл навчальних матеріалів та контроль за виконанням завдань.
- Доступ до навчальних матеріалів. Викладачі можуть завантажувати лекції, презентації, відеоуроки та інші освітні ресурси, а студенти отримують можливість їх перегляду в будь-який зручний час.

– Оцінювання знань. LMS підтримують різні форми оцінювання, зокрема тести, письмові роботи, інтерактивні вправи, а також автоматичне виставлення оцінок.

– Зворотний зв'язок. Студенти можуть отримувати коментарі від викладачів, брати участь у форумах, чатах, відеоконференціях та інших формах взаємодії.

Серед найпоширеніших LMS можна виділити наступні платформи:

Moodle – одна з найпопулярніших платформ з відкритим кодом, що використовується у вищих навчальних закладах у всьому світі. Вона підтримує персоналізоване навчання, різноманітні інструменти для взаємодії та модульну систему курсів [24].

Blackboard – комерційна LMS, яка пропонує розширені можливості з управління навчанням, інтеграцію з аналітичними інструментами та засоби для створення персоналізованих навчальних траєкторій [25].

Canvas – сучасна LMS із зручним інтерфейсом, що підтримує інтеграцію з великою кількістю зовнішніх додатків та дозволяє створювати адаптивні курси [26].

Google Classroom – безкоштовна LMS від Google, яка спрощує організацію дистанційного навчання, інтегрується з іншими сервісами Google (Docs, Drive, Meet) та є популярною серед закладів середньої освіти (Google, 2023) [27].

Використання LMS дозволяє зменшити навантаження на викладачів за рахунок автоматизації рутинних процесів, таких як перевірка тестів, ведення журналу оцінок, розсилка повідомлень студентам. Завдяки цьому викладачі можуть більше уваги приділяти методичному вдосконаленню курсів та індивідуальній роботі з учнями. Окрім того, LMS підвищують ефективність навчання за рахунок персоналізації. Наприклад, система може адаптувати контент відповідно до рівня знань студента, рекомендувати додаткові матеріали та генерувати аналітичні звіти про успішність.

Системи управління навчанням відіграють важливу роль у сучасній освіті, забезпечуючи ефективну організацію навчального процесу, спрощення адміністративних процедур та підвищення якості освітнього контенту. Впровадження LMS дозволяє не лише оптимізувати навчальні процеси, а й покращити взаємодію між студентами та викладачами, зробити навчання більш адаптивним та інтерактивним.

Штучний інтелект (AI) використовується для персоналізації навчального процесу. Алгоритми аналізують успішність студентів, визначають їхні сильні та слабкі сторони, пропонують індивідуальні завдання та оптимальні навчальні траєкторії [28].

VR та AR відкривають нові можливості для практичного навчання, забезпечуючи занурення в інтерактивне середовище та відтворення реальних умов. VR дозволяє студентам занурюватися в змодельовані ситуації, що відображають реальні робочі процеси. Наприклад, студенти-авіадиспетчери можуть проводити віртуальні операції без ризику для життя та цілісності літака (Авіасимулятори Prepar 3D та доповнення IVAO та VATSIM [29]). AR-технології дозволяють вивчати складні об'єкти у 3D-форматі. Завдяки VR-курсам студенти можуть взаємодіяти з навчальним матеріалом більш активно, що покращує засвоєння інформації [30]. Використання VR у дистанційному навчанні дозволяє студентам відвідувати віртуальні лабораторії та аудиторії. Наприклад, платформа Engage VR надає можливість відвідувати лекції у форматі 3D-простору.

Навчання авіадиспетчерів – складний процес, що потребує відпрацювання реакцій на нестандартні ситуації, швидкого аналізу даних та точності у прийнятті рішень. Використання VR та AR у цій сфері значно підвищує ефективність підготовки, дозволяючи імітувати роботу в реальному аеропорту без ризиків для авіації [31].

ATC VR Simulators (Air Traffic Control VR). VR-тренажери дозволяють авіадиспетчерам навчатися в реалістичних умовах, імітуючи роботу в диспетчерській вежі чи центрі управління повітряним рухом.

Так, **Adacel MaxSim** та **Micro Nav BEST (Beginning to End for Simulation & Training)** пропонують VR-симуляції, що відтворюють повітряний рух, роботу з радарми та координацію польотів [32].

Microsoft HoloLens для диспетчерів. AR-гарнітура використовується для інтеграції віртуальних елементів у навчальний процес. Авіадиспетчери можуть переглядати 3D-моделі аеропортів, повітряних потоків і прогнозів погоди, що допомагає розуміти складні сценарії роботи.

Tern Systems VR ATC Training. Розроблена для навчання авіадиспетчерів у реальному часі, ця VR-система дозволяє відпрацьовувати управління трафіком у різних умовах: густий туман, аварійні ситуації, високий рівень трафіку.

NATS 3D Tower Simulation. Використовується британською компанією **NATS (National Air Traffic Services)**. Диспетчери УПП проходять навчання у віртуальних 3D-вежах, що імітують реальні аеропорти, що дозволяє швидше адаптуватися до реальної роботи.

NASA ATC VR Training. NASA розробляє VR-симуляції для диспетчерів майбутнього, що працюватимуть із безпілотними літальними апаратами та урбаністичними аеровузлами.

До переваг використання VR/AR для авіадиспетчерів слід віднести:

1. Безпечне моделювання кризових ситуацій – можливість навчатися здійснювати УПП в аварійних ситуаціях або у складних метеоумовах.

2. Прискорене навчання – авіадиспетчери можуть швидше адаптуватися до реальних умов роботи.

3. Висока реалістичність – тренування відбувається у змодельованих умовах аеропортів із використанням реальних сценаріїв.

4. Можливість дистанційного навчання – VR дозволяє навчатися без фізичної присутності в центрі підготовки.

Завдяки цим технологіям підготовка авіадиспетчерів стає більш ефективною, що сприяє безпеці та точності управління повітряним рухом [33]

Також існують технології аналізу навчальних даних (Learning Analytics).

Learning Analytics – це технологія, що використовує великі дані (Big Data), штучний інтелект та статистичні методи для аналізу навчального процесу. Технологія дозволяє:

1. Відстежувати прогрес студентів у реальному часі, аналізуючи їхні результати, активність у навчальному середовищі та рівень взаємодії з матеріалами.

2. Прогнозувати успішність, ідентифікуючи студентів, які потребують додаткової підтримки, та своєчасно надаючи їм персоналізовані рекомендації.

3. Адаптувати навчальні програми відповідно до індивідуальних особливостей студентів, налаштовуючи темп подачі матеріалу та рівень складності завдань.

Використання Learning Analytics дозволяє покращити ефективність навчального процесу, зменшити кількість студентів, що відраховуються, та підвищити мотивацію до навчання.

Адаптивні ВНС постійно вдосконалюються завдяки інтеграції передових технологій, що робить їх ще ефективнішими та персоналізованішими. У майбутньому можна очікувати їх активне використання [34].

Застосування технологій глибокого навчання (Deep Learning) та нейронних мереж дозволяє створювати інтелектуальні системи, що аналізуватимуть стиль навчання кожного студента та автоматично підбиратимуть відповідні матеріали. Нейронні мережі зможуть прогнозувати успішність студентів, виявляти прогалини в знаннях і пропонувати оптимальні шляхи їх заповнення.

Застосування інтернет речей (IoT) у навчанні дозволить автоматизувати збір даних про навчальну діяльність студентів та рівень їхньої залученості через підключені до IoT освітні пристрої. Наприклад, розумні дошки, сенсори уваги та адаптивні навчальні платформи будуть допомагати викладачам оперативно реагувати на потреби студентів.

Блокчейн-технологія здатна забезпечити прозоре та захищене зберігання академічних досягнень студентів, виключаючи можливість їх підробки чи втрати. Освітні установи зможуть створювати цифрові дипломи та сертифікати, що будуть легко перевірятися роботодавцями та іншими організаціями [35].

Впровадження інтелектуальних технологій в АВНС дозволить створити більш гнучкі та ефективні системи освіти, орієнтовані на потреби кожного студента. Це сприятиме підвищенню якості знань, розвитку персоналізованого підходу до навчання та підготовці конкурентоспроможних фахівців з ОПР.

1.3 Аналіз особливостей комунікації та спільного прийняття рішень в колективах диспетчерських змін та ключових складових командної компетентності авіадиспетчерів

Комунікація та спільне прийняття рішень є основними аспектами роботи авіадиспетчерів, що дозволяють забезпечити ефективне управління повітряним рухом і гарантувати безпеку польотів. Робота в диспетчерській зміні потребує злагодженості, швидкої реакції та здатності до адаптації в умовах постійних змін і високого психологічного навантаження. У цьому процесі кожне слово, кожне рішення і кожна дія є критично важливими, оскільки вони безпосередньо впливають на ефективність командної роботи та загальну авіаційну безпеку [36].

Комунікація авіадиспетчерів характеризується високою стандартизацією та лаконічністю. Це зумовлено необхідністю зменшення ризику неправильного розуміння між диспетчерами та пілотами, а також між самими диспетчерами. Використання стандартизованої фразеології англійською мовою, яка рекомендована ІКАО, є ключовим елементом роботи [37].

Під час роботи диспетчери постійно обмінюються інформацією про поточний стан польотів, зміни погодних умов, затримки або аварійні ситуації.

Усе це потребує чіткої та зрозумілої комунікації, адже помилка в передачі або сприйнятті інформації може призвести до катастрофічних наслідків.

Диспетчери УПР також мають вміти працювати з інформаційними потоками в умовах перевантаження. Наприклад, коли одночасно кілька літаків потребують інструкцій, важливо швидко визначити пріоритети, не втрачаючи фокус і забезпечуючи зв'язок із пілотами.

Диспетчерська зміна – це складний механізм, у якому кожен член команди виконує свою роль, але всі разом працюють для досягнення спільної мети. У команді зазвичай є кілька авіадиспетчерів, кожен із яких відповідає за певний сектор або етап польоту (зліт, крейсерський етап, посадка).

Успішна командна робота залежить від:

1. Чіткого розподілу ролей: кожен авіадиспетчер має знати свої завдання, але бути готовим підстрахувати колегу в разі потреби.

2. Взаємної підтримки: в умовах надзвичайних ситуацій (наприклад, технічна несправність ПС або несприятливі метеоумови) важливо, щоб диспетчери допомагали одне одному, розподіляючи навантаження.

3. Єдиної стратегії дій: у складних ситуаціях команда має діяти злагоджено, ухвалюючи рішення, які враховують інтереси всіх учасників повітряного руху.

Одним із найважливіших елементів командної взаємодії є довіра. Кожен авіадиспетчер має бути впевненим, що колеги якісно виконають свою частину роботи, і в разі необхідності зможуть надати підтримку. Довіра базується на високій кваліфікації, досвіді та ефективному спілкуванні між членами команди [38].

Робота авіадиспетчерів є однією з найскладніших і найвідповідальніших у сфері авіації. Щоденна діяльність цих фахівців вимагає концентрації, швидкого прийняття рішень, координації багатьох процесів одночасно та взаємодії з численними учасниками авіаційного руху. Особливо це стосується диспетчерів, які працюють у великих міжнародних аеропортах, таких як

Міжнародний аеропорт Хартсфілд-Джексон в Атланті (США), Міжнародний аеропорт Пекін-Столичний (Китай) чи Міжнародний аеропорт Дубай (ОАЕ).

Однією з основних причин стресу є **висока інтенсивність роботи**. Наприклад, у пікові години в найбільш завантажених аеропортах світу диспетчери можуть одночасно координувати понад 20-30 ПС. Це включає управління їхніми маршрутами, забезпечення безпеки під час зльотів і посадок, а також контроль над повітряним простором у зоні аеропорту. Таке навантаження супроводжується:

1. Інтенсивною багатозадачністю. Кожен авіадиспетчер відповідає за кілька рейсів, одночасно враховуючи змінні погодні умови, технічні особливості літаків і графік роботи аеропорту. Навіть невеликі помилки можуть мати серйозні наслідки.

2. Часовим тиском. У години пікових навантажень у таких аеропортах, як Атланта або Пекін, диспетчери УПР обслуговують до 1000 рейсів на день. Це змушує їх приймати миттєві рішення, нерідко в умовах недостатньої інформації або зовнішніх перешкод.

3. Високим рівнем відповідальності. Кожен авіадиспетчер відповідає за безпеку сотень пасажирів, що перебувають у літаку. Від його рішень залежить, чи буде рейс виконаний безпечно і вчасно.

4. Необхідністю постійної комунікації. Комунікація з пілотами, іншими диспетчерами та наземними службами є постійною. У міжнародних аеропортах, таких як Дубай, часто виникають ситуації, коли диспетчер змушений одночасно комунікувати англійською мовою з пілотами з різних країн.

Навантаження такого рівня може призвести до емоційного вигорання, тривожності та фізичного виснаження. Робота в умовах постійного стресу також підвищує ризик помилок через зниження когнітивних здібностей у критичних ситуаціях [39]

Для підготовки до роботи в умовах підвищеної інтенсивності польотів авіадиспетчери проходять навчання, що включає моделювання надзвичайних

ситуацій. Наприклад, тренажери створюють сценарії, коли диспетчер має одночасно координувати десятки літаків у складних погодних умовах або за умови відмови одного з ключових систем літального апарата. Спеціальні курси з розвитку емоційної стійкості навчають диспетчерів розслаблятися, зберігати спокій у стресових ситуаціях і швидко відновлюватися після робочих змін.

У найбільших міжнародних аеропортах, таких як Чикаго-О'Хара, впроваджено програми психологічного консультування. Вони включають групові сесії, де авіадиспетчери діляться досвідом, а також індивідуальні консультації з психологами.

У диспетчерських центрах великих аеропортів розробляються програми спільного прийняття рішень, що зменшують навантаження на окремих фахівців. Наприклад, у Дубаї диспетчери працюють у командах, де кожен спеціалізується на окремому аспекті управління трафіком. Це сприяє розподілу відповідальності та підвищує ефективність роботи.

Для зниження рівня стресу диспетчери працюють за чітко визначеним графіком, що включає регулярні перерви та відпочинок. Приклад: Міжнародний аеропорт Хартсфілд-Джексон (Атланта, США). Цей аеропорт є найбільш завантаженим у світі за кількістю рейсів. У годину пік диспетчери керують одночасно до 30 літаків, забезпечуючи їхню безпечну посадку, зліт і транзит. Робота диспетчерів у таких умовах вимагає не лише високої концентрації, але й швидкого прийняття рішень, особливо за умов несприятливої погоди чи позапланових ситуацій.

Саме тому стресостійкість і психологічна готовність є ключовими компетенціями авіадиспетчерів, особливо тих, хто працює в найбільш завантажених аеропортах світу. Розвиток цих навичок забезпечується завдяки спеціальним тренуванням, підтримці психологів і впровадженню командної роботи. Лише поєднання технологій, особистих якостей і ефективного навчання дозволяє диспетчерам виконувати свої обов'язки на найвищому рівні навіть у найкритичніших умовах [40].

Робота авіадиспетчерів у великих міжнародних аеропортах, таких як Лондон-Хітроу чи Лос-Анджелес (LAX), вимагає від них не лише високого рівня професійної підготовки, але й виняткової командної компетентності. Диспетчерські пункти таких аеропортів нагадують «мозковий центр», де кожна секунда має значення. У цій атмосфері, що поєднує напругу та необхідність прийняття блискавичних рішень, кожен диспетчер є частиною складної системи, яка працює як злагоджений механізм.

Командна компетентність – це основа успішної роботи авіадиспетчерів. Вона включає цілу низку навичок, від точного обміну інформацією до адаптації в критичних ситуаціях, і забезпечує ефективність навіть у найскладніших умовах [41]. У години пік у повітряному просторі одночасно можуть перебувати десятки літаків, кожен з яких має свій маршрут, свою швидкість і свою мету. Один лайнер потрапив у зону сильної турбулентності, інший вже на підході до посадкової смуги, а третій змушений змінити курс через технічну несправність. У цих умовах авіадиспетчери – єдина ланка, що забезпечує порядок та безпеку в повітряному просторі. Комунікація між диспетчером і пілотами тут не просто важлива – вона життєво необхідна. Кожна команда має бути короткою, чіткою та зрозумілою, адже в екстремальних умовах немає місця для неточностей чи двозначностей. Проте важливо не лише говорити, а й слухати. Диспетчер УПР має уважно вловлювати тон голосу пілота, відчувати його емоційний стан, адже навіть легка напруга або невпевненість у голосі можуть свідчити про потенційну проблему, що потребує негайного вирішення. Уміння «читати між рядків» та своєчасно реагувати на приховані сигнали — це справжнє мистецтво, яке формується роками практики.

Робота авіадиспетчерів — це не індивідуальний марафон, а командний спорт, де кожен учасник має діяти в ідеальній синхронності з іншими. Уявімо аеропорт Лондон-Хітроу в години найбільшого навантаження [42] Тут одночасно працюють десятки диспетчерів, кожен з яких відповідає за свій сектор повітряного простору. Однак, їхня робота не ізольована – кожен має

бути в курсі загальної ситуації, щоб у будь-який момент підстрахувати колегу або передати управління без найменших затримок.

Взаємодія в команді має бути настільки точною, що передача літака з одного сектора в інший відбувається майже непомітно для самого екіпажу. Відсутність злагодженості або навіть секунда затримки може створити небезпечну ситуацію. У таких умовах між диспетчерами формується особлива довіра: кожен повинен бути впевнений у професіоналізмі своїх колег, знаючи, що у критичний момент отримає необхідну підтримку.

Коден день авіадиспетчера не схожий на попередній. Погода, технічні збої, зміни маршрутів – усе це вимагає миттєвої реакції та прийняття нестандартних рішень. Наприклад, густий туман у Лос-Анджелесі [43] різко знижує видимість, ускладнюючи посадку. Диспетчери не можуть чекати, поки ситуація покращиться – їм потрібно діяти негайно. Вони приймають рішення про зміну схем заходу на посадку, перенаправлення літаків до інших аеропортів, узгоджуючи це з пілотами, наземними службами та іншими авіадиспетчерами. Але головне – це зберігати спокій. Диспетчер не може дозволити собі паніку або сумніви, адже будь-яке його рішення має бути виваженим і точним. Саме ця здатність швидко адаптуватися та мислити раціонально в умовах високого стресу робить авіадиспетчерів незамінними у своїй сфері.

Коли ситуація виходить за рамки стандартних процедур, роль лідера стає ключовою. Наприклад, уявімо снігову бурю в аеропорту Чикаго [44]. Десятки рейсів затримуються, екіпажі в напрузі, пасажери чекають інформації. Саме диспетчер, який бере на себе роль лідера, визначає пріоритетність рейсів, координує роботу команди та підтримує зв'язок із наземними службами. Лідерство в диспетчерській роботі — це не лише про управління процесом, а й про підтримку команди. У кризові моменти моральний дух відіграє важливу роль: впевнений та зібраний керівник здатний мотивувати колег працювати ефективно навіть у найскладніших умовах.

У стресових умовах можуть виникати конфлікти – як між диспетчерами, так і з пілотами чи іншими службами. Уміння швидко і конструктивно вирішувати подібні ситуації є критично важливим. Наприклад, двоє диспетчерів можуть мати різні погляди на оптимальний маршрут літака, що може призвести до напруженої дискусії. Але у диспетчерській роботі немає місця для довгих суперечок – рішення потрібно ухвалювати миттєво. Тут важливо не лише опиратися на факти та правила, але й демонструвати гнучкість, знаходячи компроміс, який забезпечить безпеку та ефективність роботи.

Рівень емоційного інтелекту авіадиспетчера відіграє величезну роль. Здатність зберігати спокій, знаходити спільну мову з колегами та уникати конфліктів у напружених ситуаціях – це навичка, що відточується з досвідом і стає запорукою успішної кар'єри.

Робота авіадиспетчерів – це не лише технічні навички та знання авіаційних процедур. Це мистецтво взаємодії, яке поєднує в собі комунікацію, командну синхронність, адаптивність, лідерство та емоційну стійкість. У світі, де кожна секунда має значення, диспетчери стають невидимими героями неба, які щодня забезпечують безпеку тисяч пасажирів, зберігаючи абсолютну концентрацію навіть у найскладніших умовах.

Розглянемо практичний приклад: робота в аеропорту Лос-Анджелеса. Міжнародний аеропорт Лос-Анджелеса щодня обслуговує понад 700 рейсів. У години пік диспетчери змушені одночасно спілкуватися з більш ніж 20 пілотами. Наприклад, один літак потребує аварійної посадки, інші очікують на дозвіл на зліт, а деякі літаки змінюють маршрут через погоду. У таких умовах кожен член команди має працювати максимально злагоджено. Один диспетчер вирішує питання з пілотом аварійного літака, інший контролює порядок зльоту, третій — взаємодіє з сусідніми аеропортами для перенаправлення рейсів. Лідер визначає пріоритети, а вся команда діє як єдиний механізм. Тому командна компетентність авіадиспетчерів — це складний комплекс навичок, що охоплює комунікацію, адаптивність,

лідерство, координацію дій і вміння вирішувати конфлікти. Завдяки злагодженій роботі команди вдається забезпечувати безпеку повітряного руху навіть у найекстремальніших умовах. Ця компетентність — запорука стабільності, ефективності та високого рівня довіри до професії авіадиспетчера [43].

Диспетчерські центри найбільших аеропортів світу працюють у режимі надвисокої інтенсивності, де кожна секунда на рахунку. Десятки диспетчерів працюють одночасно, координуючи рухи літаків у небі та на землі, взаємодіючи з пілотами, наземними службами та іншими диспетчерами. У таких умовах забезпечення злагодженої роботи команди є основою безпеки та ефективності всієї авіаційної системи. Саме сучасні технології стали ключовими інструментами, що дозволяють диспетчерам не лише ефективно управляти потоком повітряних суден, але й вчасно реагувати на будь-які непередбачувані ситуації.

Одним із найважливіших досягнень у розвитку авіадиспетчерських служб є впровадження автоматизованих систем, що забезпечують оперативний доступ до величезної кількості даних. Вони дозволяють диспетчерам працювати більш ефективно та з високим рівнем точності, усуваючи людський фактор у багатьох процесах управління [45]. Уявіть, що диспетчер працює в умовах сильного дощу, коли видимість обмежена, а кілька літаків готуються до посадки одночасно. Автоматизовані системи в таких умовах надають в реальному часі інформацію про погодні умови, стан злітно-посадкових смуг, прогнозують можливі проблеми, що можуть виникнути через погану видимість або перенавантаження аеропорту. Ці дані допомагають приймати швидкі і правильні рішення, оптимізуючи розподіл повітряного простору, що дозволяє уникнути будь-яких конфліктів між літаками. Такі технології також використовують алгоритми для прогнозування можливих затримок рейсів через погодні умови або технічні проблеми, а також для управління трафіком в умовах високої інтенсивності. Наприклад, якщо два літаки наближаються до однієї зони одночасно, система може заздалегідь

попередити диспетчера та запропонувати оптимальні корективи для уникнення зіткнень [46].

Уявіть собі кабінку авіадиспетчера, де все відбувається, як у реальному житті: перед ним монітори, на яких відображається повітряний простір, пілоти виходять на зв'язок, обговорюються маршрути. Різниця лише в тому, що це не справжній аеропорт, а високотехнологічний симулятор, створений для відпрацювання надзвичайних ситуацій.

Тренажери стали невід'ємною частиною підготовки авіадиспетчерів, дозволяючи їм практикувати складні сценарії без ризику для реальних польотів. Наприклад, на тренуваннях можна опинитися в ситуації, коли в літака відмовила гідравлічна система, або ж через сильний шторм доводиться негайно змінювати схему посадки для десятків літаків. Диспетчери змушені швидко ухвалювати рішення, аналізуючи ситуацію в реальному часі та координуючи свої дії з іншими членами команди.

Однією з ключових переваг симуляторів є можливість моделювати командну роботу. Уявіть ситуацію: один диспетчер перенаправляє літак на альтернативну смугу, водночас інший контролює рух на землі, а третій забезпечує безпечне розведення повітряного потоку. Всі вони працюють разом, як єдиний механізм, і будь-яка помилка чи затримка можуть спричинити серйозні наслідки. Саме завдяки подібним тренуванням диспетчери вчаться діяти злагоджено навіть у найскладніших обставинах [48].

Якщо симулятори наближують диспетчерів до реальності, то технології віртуальної реальності (VR) буквально занурюють їх у неї. За допомогою VR можна відтворити диспетчерську вежу аеропорту до найменших деталей: монітори, радіозв'язок, звуки турбін літаків, шум радіоефіру. Усе це створює повне відчуття присутності, що дає можливість відпрацьовувати складні ситуації в умовах, максимально наближених до реальних [47]. Так, авіадиспетчер, одягнувши VR-гарнітуру, потрапляє в умовний аеропорт, де раптово погіршуються погодні умови: небо затягує густий туман, злітно-посадкові смуги стають майже невидимими. Його завдання — швидко оцінити

ситуацію, ухвалити рішення про зміну маршрутів та перенаправити літаки на запасні аеропорти. Важливо не тільки розуміти кожен крок, але й залишатися спокійним, бо в реальній роботі паніка може призвести до катастрофічних наслідків.

Ще одна перевага VR — можливість створювати командні тренування. Диспетчери, перебуваючи в різних точках, можуть спільно вирішувати кризові ситуації, відпрацьовуючи комунікацію та координацію. Це допомагає підготуватися до реальних умов, де злагоджена робота всіх учасників є критично важливою.

Окрім симуляторів і VR, сучасні диспетчерські центри оснащені спеціалізованими програмними комплексами, що дозволяють в режимі реального часу обмінюватися інформацією та оптимізувати роботу команди.

Такі системи виконують кілька важливих функцій. По-перше, вони дозволяють аналізувати продуктивність кожного диспетчера, виявляючи сильні та слабкі місця в роботі. По-друге, ці платформи забезпечують швидке розповсюдження критично важливої інформації. Наприклад, якщо один диспетчер отримав оновлені дані про зміни у погоді, він миттєво передає їх усій команді, що допомагає уникнути помилок і затримок.

Також ці платформи дозволяють рівномірно розподіляти навантаження між диспетчерами. Якщо хтось із них уже перевантажений запитами від пілотів, система може автоматично перенаправити частину роботи на іншого диспетчера, що допомагає уникати перевтоми і зниження концентрації [49].

Розглянемо інший практичний приклад – Лондон-Хітроу. Лондон-Хітроу — один із найбільш завантажених аеропортів світу, де щодня здійснюється понад 1 300 рейсів. Тут робота диспетчерів нагадує добре налаштований механізм, у якому кожен учасник виконує свою роль із високою точністю. Щоб досягти такого рівня ефективності, у Хітроу широко використовують симулятори та VR-тренування. Нові диспетчери проходять сотні годин на симуляторах, перш ніж отримати право працювати з реальними рейсами. Досвідчені фахівці також регулярно проходять тренування, щоб

підтримувати навички в умовах постійного стресу та змінних обставин. Окрім цього, в аеропорту впроваджені автоматизовані системи прогнозування, які дозволяють диспетчерам швидше реагувати на можливі затримки та оптимізувати використання злітно-посадкових смуг. Це значно покращує ефективність роботи, зменшує навантаження на авіадиспетчерів та підвищує рівень безпеки польотів.

Технології симуляції та віртуальної реальності радикально змінили підготовку авіадиспетчерів. Вони дають змогу відпрацьовувати надзвичайні ситуації без ризику для реальних польотів, покращують командну взаємодію та допомагають диспетчерам розвивати навички ухвалення швидких і точних рішень. У сучасних аеропортах, таких як Лондон-Хітроу, ці технології вже стали частиною щоденної роботи, допомагаючи диспетчерам залишатися ефективними навіть у найскладніших умовах. Завдяки цьому небо стає безпечнішим, а робота авіадиспетчерів — ще більш професійною та злагодженою.

1.4 Аналіз можливостей застосування адаптивного підходу до навчання для формування навичок командної роботи авіадиспетчерів

Сучасні технології навчання докорінно змінили підхід до підготовки фахівців у різних сферах, і сфера управління повітряним рухом не стала винятком. Авіадиспетчери – це фахівці, від рішень яких залежить злагоджена робота всієї авіаційної системи, а головне – безпека тисяч пасажирів щодня. Їхня робота вимагає високої концентрації, вміння швидко аналізувати ситуацію та приймати миттєві рішення, адже навіть одна помилка може мати критичні наслідки. Саме тому процес їхнього навчання повинен бути не лише інтенсивним, а й максимально ефективним.

Одним із найважливіших аспектів підготовки авіадиспетчерів є розвиток навичок командної роботи. Оскільки УПР – це процес, що вимагає злагодженої взаємодії між авіадиспетчерами різних секторів, пілотами та

наземними службами, майбутні диспетчери повинні навчитися працювати в команді ще під час навчання. Вони повинні не тільки володіти чіткими комунікативними навичками, а й уміти швидко реагувати на зміну ситуації, узгоджувати свої дії з колегами та оперативно приймати спільні рішення в умовах стресу. Саме тут на допомогу приходить **адаптивний підхід до навчання**, який дозволяє зробити процес підготовки більш гнучким та індивідуалізованим. На відміну від традиційних методів, де всі навчаються за однаковою програмою та в однаковому темпі, адаптивне навчання підлаштовується під рівень знань, навичок і особливостей кожного диспетчера. Сучасні технології, такі як штучний інтелект, аналіз навчальних даних і віртуальна реальність, дозволяють створювати персоналізовані навчальні траєкторії, що дають можливість кожному студенту працювати над своїми слабкими місцями та вдосконалювати сильні сторони [50]. Наприклад, якщо курсант має труднощі з координацією дій у команді або прийняттям рішень у стресових ситуаціях, система навчання може надавати йому додаткові симуляції, що імітують критичні умови реального робочого середовища. Якщо ж студент добре справляється з основними завданнями, йому пропонуються більш складні сценарії, які змушують працювати на межі своїх можливостей. Таким чином, кожен диспетчер отримує саме той рівень підготовки, який відповідає його поточним навичкам і дозволяє вдосконалювати їх у найбільш ефективний спосіб.

Адаптивний підхід також забезпечує постійний зворотний зв'язок: система аналізує результати студента, відстежує його прогрес і автоматично коригує програму навчання. Це дозволяє не тільки підвищити ефективність підготовки, а й зробити навчальний процес більш захопливим і мотивуючим. У результаті диспетчери не просто механічно засвоюють інформацію, а стають висококваліфікованими фахівцями, здатними працювати в команді, ефективно комунікувати та швидко ухвалювати рішення в умовах динамічного авіаційного середовища [50].

Адаптивний підхід до навчання базується на використанні технологій, що дозволяють підлаштовувати освітній процес відповідно до потреб та можливостей кожного учня. Це досягається за допомогою аналізу даних про рівень знань, швидкість освоєння матеріалу, стиль навчання та рівень стресостійкості. У випадку авіадиспетчерів, які працюють в умовах високого психологічного навантаження, адаптивне навчання сприяє покращенню ефективності тренувань та підвищенню рівня підготовленості до реальних ситуацій [51].

Індивідуалізовані симуляції Використання симуляторів для навчання авіадиспетчерів є стандартною практикою. Адаптивний підхід дозволяє змінювати рівень складності завдань у реальному часі, враховуючи поточний рівень підготовки диспетчера. Наприклад, якщо учень легко справляється з базовими сценаріями, система автоматично пропонує йому складніші ситуації, такі як керування трафіком під час екстремальних погодних умов або взаємодія з декількома екстремними рейсами одночасно.

Аналіз психологічної стійкості та стресових реакцій Навчальні системи можуть інтегрувати сенсори біометричних даних (серцебиття, рівень стресу) для оцінки реакції диспетчера на різні ситуації. Якщо система визначає, що диспетчер піддається сильному стресу під час складних сценаріїв, вона може тимчасово знизити рівень складності, дозволяючи учню адаптуватися, а потім поступово нарощувати навантаження [52].

Змішане навчання (Blended Learning) Комбінування традиційного інструкторського навчання з адаптивними цифровими платформами дозволяє оптимізувати процес підготовки. Наприклад, диспетчери можуть проходити онлайн-тренування з аналізу реальних авіаційних інцидентів, після чого брати участь у групових обговореннях або симуляціях для закріплення матеріалу. [53].

Розвиток командної взаємодії Одним із важливих аспектів роботи авіадиспетчера є взаємодія з іншими диспетчерами, пілотами та наземними службами. Адаптивне навчання може включати сценарії командної роботи, де

рівень складності змінюється залежно від успішності групи. Це сприяє розвитку комунікативних навичок, взаємної підтримки та координації дій [54].

Приклад впровадження: Європейський центр авіаційної підготовки (EASA). У Європі деякі навчальні центри вже впроваджують адаптивні технології у підготовку авіадиспетчерів. Наприклад, Європейське агентство з авіаційної безпеки (EASA) використовує інтерактивні симуляційні платформи, що аналізують реакції диспетчерів і адаптують сценарії відповідно до їхньої продуктивності. Це дозволяє зменшити ризики помилок у реальних умовах та покращити командну взаємодію [55].

Eurocontrol — організація, що займається управлінням повітряним рухом у Європі, активно використовує адаптивні симулятори для навчання диспетчерів. Вони автоматично змінюють складність завдань залежно від рівня підготовки студента [56]. **NASA** досліджує використання штучного інтелекту для створення персоналізованих навчальних програм у сфері авіаційної безпеки [57]. **NAV CANADA** впроваджує систему тренажерів, що підлаштовуються під індивідуальні характеристики диспетчерів, допомагаючи їм швидше освоювати навички роботи в екстремальних ситуаціях [58].

Адаптивний підхід до навчання авіадиспетчерів є перспективним напрямком, що дозволяє підвищити якість підготовки за рахунок індивідуалізації тренувань, аналізу стресостійкості та вдосконалення командної взаємодії. Використання інноваційних методів навчання, таких як інтелектуальні симулятори та біометричні сенсори, сприяє підготовці висококваліфікованих диспетчерів, здатних ефективно працювати у складних умовах. Це, у свою чергу, підвищує рівень безпеки польотів та оптимізує роботу диспетчерських служб.

Висновки до розділу 1

Підготовка авіадиспетчерів є надзвичайно складним та відповідальним процесом, що вимагає використання передових технологій та інноваційних методів навчання. У першому розділі було здійснено детальний аналіз сучасного стану системи підготовки авіадиспетчерів, виявлено основні проблеми, визначено ключові тенденції, а також розглянуто перспективи впровадження віртуальних навчальних середовищ та адаптивного підходу до навчання.

На сучасному етапі професійна підготовка авіадиспетчерів стикається з низкою викликів. По-перше, зростає інтенсивність повітряного руху, що вимагає від авіадиспетчерів ще більшої швидкості та точності у прийнятті рішень. По-друге, традиційні методи навчання, які базуються на лекційних заняттях та практичній підготовці в умовах стажування, вже не можуть повною мірою забезпечити необхідний рівень компетентності. Виникає необхідність інтеграції новітніх освітніх технологій, які дозволять покращити засвоєння матеріалу, підвищити рівень практичних навичок і забезпечити безперервне навчання протягом професійної кар'єри.

Одним із найбільш перспективних рішень є **впровадження АВНС**, які поєднують у собі передові інформаційно-комунікаційні технології, штучний інтелект, аналітику навчальних даних і методи віртуальної реальності. Такі середовища дозволяють створювати реалістичні сценарії для навчання диспетчерів у безпечних умовах, що значно покращує якість підготовки та мінімізує ризики, пов'язані зі стажуванням у реальному робочому середовищі.

У даному розділі було розглянуто основні аспекти командної компетентності, такі як координація дій, розподіл відповідальності, комунікативні навички та вміння діяти в екстремальних ситуаціях. Для того, щоб сформувати ці навички на найвищому рівні, доцільно застосовувати **адаптивний підхід до навчання**. Він дає змогу підлаштовувати програму навчання під рівень підготовки кожного диспетчера, зосереджуючи увагу на

його індивідуальних сильних та слабких сторонах. За допомогою аналізу навчальних даних, персоналізованих сценаріїв у віртуальній реальності та автоматизованого моніторингу прогресу можна значно підвищити ефективність навчального процесу.

Таким чином, результати аналізу доводять, що сучасні технології здатні суттєво покращити підготовку авіадиспетчерів. Інтеграція АВНС сприятиме підвищенню професійної компетентності фахівців з ОПР, допоможе їм краще взаємодіяти в команді та швидко приймати рішення в умовах високого навантаження. Використання таких методів навчання дозволить створити систему підготовки, яка відповідатиме сучасним викликам та забезпечить безпеку повітряного руху на найвищому рівні.

РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ КОНЦЕПТУАЛЬНИХ ЗАСАД ПОБУДОВИ ІНТЕРАКТИВНОГО ВІРТУАЛЬНОГО НАВЧАЛЬНОГО СЕРЕДОВИЩА З РОЗВИТКУ КОМАНДНОЇ КОМПЕТЕНТНОСТІ АВІАДИСПЕТЧЕРІВ

2.1 Формулювання принципів проєктування віртуального навчального середовища для розвитку командної компетентності авіадиспетчерів та сценаріїв їх застосування

Створення інтерактивного АВНС для підготовки авіадиспетчерів є складним і багатокомпонентним процесом, який базується на трьох ключових складових: технологічній, педагогічній та соціальній. Кожен із цих аспектів відіграє важливу роль у формуванні фахівців, які зможуть ефективно працювати в динамічному та відповідальному середовищі управління повітряним рухом.

Технологічний аспект забезпечує використання інноваційних рішень, таких як системи віртуальної реальності (VR), адаптивні симулятори, алгоритми штучного інтелекту (ШІ) та автоматизовані системи оцінювання. Ці інструменти створюють можливості для реалістичного моделювання ситуацій, з якими авіадиспетчери стикаються у своїй повсякденній роботі, дозволяючи тренувати їх у максимально наближених до реальності умовах.

Педагогічний аспект фокусується на адаптивності навчальних програм, що дозволяє індивідуалізувати підхід до кожного курсанта. Використання інтерактивних методів навчання, моделювання критичних ситуацій та кейс-методів сприяє формуванню навичок оперативного прийняття рішень, управління повітряним рухом у складних ситуаціях та ефективної взаємодії з іншими учасниками процесу.

Соціальний аспект охоплює створення умов для формування ефективної комунікації та взаємодії в команді. Робота авіадиспетчера передбачає постійний контакт із пілотами, іншими диспетчерами, службами аеропортів та

рятувальними командами. Віртуальне середовище дозволяє відпрацьовувати командну роботу у стресових умовах, що є критично важливим для забезпечення безпеки польотів.

Поєднання технологічного, педагогічного та соціального аспектів сприяє формуванню висококваліфікованих спеціалістів, здатних працювати у складних і стресових умовах сучасної авіації.

АВНС з розвитку командної компетенції авіадиспетчерів являє собою **інтелектуальну мультиагентну систему командної підготовки авіадиспетчерів**, що базується на взаємодії декількох груп спеціалізованих програмних агентів, які забезпечують налаштування навчального простору, діагностику, варіативну адаптацію, підтримку та моніторинг тренувального процесу для розвитку індивідуальних та командних компетенцій авіадиспетчерів в умовах реалістичного моделювання професійного середовища УПР.

На нашу думку, методологічну основу для розробки ефективної АВНС, що створює можливості для розвитку командної компетенції диспетчерів УПР, має складати наступна **система базових принципів**:

1. Принцип системної інтеграції забезпечує комплексне врахування всіх аспектів командної роботи авіадиспетчерів через взаємопов'язану структуру теоретичної та практичної підготовки. Цей принцип реалізується через модульну архітектуру навчального середовища та послідовне ускладнення тренувальних завдань, що дозволяє формувати цілісну систему командних субкомпетенцій.

2. Принцип цільової орієнтації визначає чітку спрямованість на розвиток конкретних командних субкомпетенцій та їх відповідність реальним професійним завданням, що відбувається через структурування сценаріїв за цільовими складовими командної компетенції з впровадженням системи автоматизованої оцінки дій та відстеження прогресу навчання.

3. Принцип багаторівневого зворотного зв'язку передбачає комплексну оцінку індивідуальних результатів виконання групових завдань,

якості самого процесу взаємодії та продуктивності роботи навчальної диспетчерської зміни у попарному або груповому режимі роботи. Важливість застосування цього принципу обумовлена потребою у постійному моніторингу ефективності командної роботи та своєчасної корекції навчального процесу.

4. Принцип активної взаємодії створює умови для інтенсивної командної взаємодії між учасниками навчальної групи авіадиспетчерів через різноманітні канали і протоколи зв'язку та спільні робочі інструменти, що сприятиме розвитку ефективних моделей і стилів професійної комунікації та координації дій органів ОПР.

5. Принцип динамічної адаптації забезпечує гнучке налаштування навчального середовища відповідно до індивідуальних особливостей студентів-авіадиспетчерів, з урахуванням вікової, компетентнісної, досвідної та психологічної сумісності членів навчальної команди, а також рівня її синергії, як за результатами проходження попередньої тренувальної сесії з урахуванням прогресу тренажу, так і в реальному форматі часу. Реалізація цього принципу включає регулювання складності тренувальних завдань, формування індивідуальних навчальних траєкторій та адаптацію рівня складності командної взаємодії.

6. Принцип автономного навчання надає можливості для самостійного моніторингу та регулювання процесу навчання при застосуванні саморегульованого або самоспрямованого режимів навчання, що важливо для розвитку в авіадиспетчерів стійких технічних (процедурних) навичок за рахунок формування нетехнічних навичок з самоаналізу, самокритичності та розвитку професійної рефлексії.

7. Принцип професійної автентичності гарантує максимальну наближеність віртуального навчального середовища авіадиспетчерів до реальних умов роботи шляхом їх високоякісної візуалізації, задіяння існуючих каналів й засобів наземного зв'язку для проведення міжсекторної координації та достовірне відтворення типових, позаштатних і аварійних ситуацій.

8. Принцип когнітивної зваженості передбачає оптимальне розподілення когнітивного навантаження між авіадиспетчерами під час попарного або групового навчання, що особливо важливо при відпрацюванні складних сценаріїв командної взаємодії в умовах підвищеної інтенсивності польотів, щільності виникнення міжсекторних проблемних ситуацій, конфліктів між ПС на межі секторів УПР. Виконання даного принципу забезпечується адаптивним регулюванням складності завдань та підтримкою оптимального рівня професійного стресу шляхом налаштування рівня робочого навантаження, що здебільшого залежить від суміжних секторів УПР, генерування подієвих стресорів і створення стресових умов роботи (в залежності від уподобань і поточних можливостей авіадиспетчера).

9. Принцип культурної адаптивності ґрунтується на врахуванні особливостей міжкультурної комунікації авіадиспетчерів, які працюють в секторах УПР, що належать до зон відповідальності різних держав через моделювання ситуацій, що потребують командної взаємодії з представниками різних культур, адаптацію комунікативних зразків та способів забезпечення безпеки польотів.

10. Принцип безперервної валідації тренувальних завдань і вправ передбачає постійний моніторинг відповідності навчального процесу актуальним міжнародним, європейським і національним вимогам до функціонування системи організації повітряного руху та стандартам в сфері управління безпекою польотів через систему контролю ефективності навчання та оновлення його змісту.

11. Принцип проактивного забезпечення безпеки польотів передбачає формування навичок прогнозування та запобігання загрозам безпеці польотів і управління помилками на командному рівні за рахунок включення в навчальні сценарії елементів управління загрозами, помилками і небажаними станами в сфері ОрПР.

12. Принцип професійної резильєнтності спрямований на розвиток здатності навчальної диспетчерської команди ефективно взаємодіяти в умовах

невизначеності та професійного стресу. Даний принцип виконується шляхом поступового впровадження стресорів різного походження у навчальні сценарії та відпрацювання механізмів командної підтримки.

Одним з базових методів сценарної реалізації тренувальних вправ на базі АВНС може виступати **метод кейсів**, який є одним із найбільш ефективних підходів до навчання авіадиспетчерів, адже він дозволяє моделювати реальні авіаційні інциденти та катастрофи у імітаційному середовищі АВНС, аналізувати їх, розбираючи їхні причини, наслідки та можливі способи запобігання подібним ситуаціям у майбутньому. Завдяки такому підходу курсанти не лише вчаться уникати критичних помилок, а й набувають навичок швидкого аналізу ситуації, прийняття рішень під тиском та ефективної комунікації з екіпажами та іншими диспетчерами. Однією з головних переваг кейс-методу є його наближеність до реальних умов роботи диспетчерів [59]. Кожна розглянута ситуація – це можливість поставити себе на місце фахівця, який змушений діяти в екстремальних умовах, коли кожна секунда має значення. Розглянемо кілька найвідоміших авіаційних інцидентів, що стали навчальним матеріалом для багатьох поколінь диспетчерів.

Один із найбільш відомих випадків, що вивчається в курсах підготовки авіадиспетчерів, – це катастрофа над Уберлінгеном, яка сталася 1 липня 2002 року. У той день через помилки диспетчерської служби компанії *Skyguide* зіткнулися два літаки – пасажирський Ту-154 та вантажний Boeing 757 [60]. Диспетчер, який працював у зоні відповідальності, залишався на зміні сам, без підстраховки колеги. Він координував кілька рейсів одночасно, а система оповіщення про небезпечне зближення літаків була тимчасово відключена на обслуговування. Через перевантаженість і технічні обмеження диспетчер не встиг вчасно попередити екіпажі про небезпеку. Врешті-решт, він дав суперечливі команди: одному екіпажу порадив знижуватися, а автоматична система на борту наказала набирати висоту. Льотчики розгубилися, і сталося зіткнення. Головні висновки, які можна зробити з цього прикладу:

1. Диспетчери мають працювати в умовах, коли є резервний контроль і колеги, готові підстрахувати в разі перевантаження.
2. Автоматичні системи попередження конфліктів мають працювати безперервно, без відключень навіть на короткий час.
3. Екіпажі мають вміти швидко реагувати на сигнали TCAS (автоматичної системи уникнення зіткнень), навіть якщо диспетчер дає інші інструкції [61].

Другий приклад – зіткнення в аеропорту Лос-Родос (1977) – найбільша авіакатастрофа в історії, коли сталося зіткнення двох літаків Boeing 747 в аеропорту Тенеріфе (Лос-Родос) 27 березня 1977 року. Через туман і перенавантаженість аеропорту один з екіпажів неправильно зрозумів команду диспетчера. Коли диспетчер давав дозвіл одному літаку рухатися по злітній смузі, пілоти іншого сприйняли це як дозвіл на зліт. В умовах поганої видимості екіпажі не бачили один одного, і в результаті обидва літаки зіткнулися [62]. Головні висновки, які можна зробити з цього прикладу:

1. Диспетчери і пілоти мають використовувати стандартизовані команди без двозначностей.
2. У майбутньому було розроблено сучасні системи наземного контролю для запобігання таким ситуаціям.
3. Пілоти повинні отримувати чітке підтвердження перед початком маневру.

Один із найсвіжіших випадків, що викликав резонанс у світі авіації, стався у січні 2023 року. Літак Boeing 777 готувався до зльоту, коли несподівано на тій самій смузі опинився інший літак. Диспетчер вчасно помітив проблему та скасував зліт. Завдяки його швидкій реакції вдалося уникнути катастрофи, але цей інцидент показав серйозні проблеми в організації повітряного руху в умовах високого завантаження [63].

19 липня 1989 року пасажирський літак McDonnell Douglas DC-10 авіакомпанії *United Airlines*, що виконував рейс 232 з Денвера до Чикаго, опинився в ситуації, яка здавалася безвихідною [64]. Під час польоту в літака

відмовили всі три гідравлічні системи – а це означало повну втрату можливості керувати аеродинамічними поверхнями. Для екіпажу та диспетчерів це стало справжнім випробуванням на межі можливостей. Все почалося з вибуху у хвостовій частині літака. Центральний двигун, розташований у хвостовій балці, розлетівся на шматки через конструктивний дефект вентилятора. Уламки пробили обшивку та пошкодили всі три незалежні гідравлічні системи. Це був унікальний випадок, адже DC-10 був спроектований так, щоб жодна несправність не могла вивести з ладу всі три системи одночасно. Але цього разу сталося неможливе – літак залишився без жодного робочого механізму керування. Капітан Альфред Хейнс і його екіпаж опинилися перед страшною реальністю: штурвал не реагував, закрилки та елерони не працювали, а літак почав неконтрольоване зниження. Єдиним способом хоч якось впливати на його поведінку залишалося регулювання тяги двигунів на крилах. Рейс 232 негайно вийшов на зв'язок із диспетчерами Центру УПР. В таких випадках кожна секунда «на вагу золота» – диспетчери швидко визначили, що найближчим аеропортом був Су-Сіті в штаті Айова. Вони оперативно розчистили повітряний простір і підготували злітно-посадкову смугу для екстреної посадки. У той час, коли екіпаж намагався хоч трохи стабілізувати політ, диспетчери координували всі наземні служби – пожежні бригади, рятувальників і медиків. Було зрозуміло, що посадка буде важкою. Пілоти підвели літак до аеропорту, але без можливості точного контролю наближення. Літак знижувався занадто швидко і зайшов на посадку з сильним креном. Коли він торкнувся смуги, його праве крило зачепило землю, і літак перевернувся. Страшний вибух охопив фюзеляж. Але попри катастрофічний удар, сталося диво – з 296 осіб на борту вижили 185. Це було неймовірним результатом, враховуючи повну втрату керування.

Висновки та уроки, які можна винести з цього прикладу (ця аварія стала важливим кейсом у навчанні як пілотів, так і диспетчерів).

1. Критична роль комунікації: злагоджена робота між екіпажем та диспетчерами дозволила максимально підготуватися до аварійної посадки.

2. Навички та досвід: командир ПС і його команда діяли без будь-якого попереднього сценарію – їхні рішення стали унікальним прикладом імпровізації в екстремальних умовах.

Після цього випадку у програму підготовки екіпажів було додано тренування аварійних сценаріїв із втратою гідравліки, а диспетчери отримали додаткові інструкції з роботи в умовах критичних ситуацій. Аварія рейсу 232 стала класичним прикладом того, як професіоналізм, холонокровність і координація між диспетчерами та екіпажем можуть зробити неможливе – врятувати життя навіть у ситуації, яка, здавалося б, не залишала шансів.

Аналіз розглянутих ситуацій допомагає студентам навчитися діяти в екстремальних умовах, коли будь-яка помилка може коштувати життя сотням людей. Кейс-методи дають змогу не лише запам'ятовувати помилки минулого, а й розвивати такі важливі навички:

1. **Швидкий аналіз ситуації.** Студенти вчаться оцінювати різні фактори ризику, від технічних несправностей до операторських помилок.

2. **Оперативне ухвалення рішень.** Часові обмеження є ключовим аспектом у роботі диспетчера. В межах кейс-завдань студенти моделюють ситуації, що вимагають миттєвих рішень.

3. **Командна взаємодія.** Взаємодія з пілотами, іншими диспетчерами та рятувальними службами має бути бездоганною.

4. **Використання сучасних технологій.** Кейси допомагають зрозуміти, як автоматизовані системи можуть підтримувати роботу диспетчерів та які ризики пов'язані з їхньою відмовою.

Завдяки такому підходу курсанти отримують не просто теоретичні знання, а й практичний досвід, що готує їх до роботи в реальному світі, в якому немає місця для помилок.

2.2 Визначення структурних компонент і типів інтелектуальних агентів підтримки процесу навчання віртуального навчального середовища для розвитку навичок комунікації, координації та спільного прийняття рішень авіадиспетчерів

Після розгляду значення віртуальних тренажерів для розвитку командних компетентностей авіадиспетчерів, що включають навички управління складними ситуаціями в умовах стресу, координації та ефективної комунікації, неможливо не звернути увагу на важливу складову такого навчання – **інтелектуальних агентів**. У віртуальних навчальних середовищах, орієнтованих на підготовку авіадиспетчерів, інтелектуальні агенти виступають не тільки як засоби автоматизованої підтримки, а й як важлива частина інтерактивного навчання, здатна забезпечити високий рівень персоналізації і адаптивності в процесі тренувань. Інтелектуальні агенти, як складові частини віртуального середовища, можуть бути використані для моделювання різних аспектів навчання, таких як адаптація складності завдань, моніторинг прогресу учнів і надання рекомендацій, що дозволяє більш точно налаштувати навчання під індивідуальні потреби кожного студента. А для того, щоб досягти максимального ефекту, потрібно чітко визначити, які структурні компоненти та типи агентів підтримки найбільше відповідають вимогам навчання авіадиспетчерів. Зважаючи на специфіку роботи авіадиспетчерів, важливою є їх здатність до швидкої і точної комунікації в умовах стресу, а також здатність ефективно працювати в команді, приймати спільні рішення в реальному часі. Тому роль інтелектуальних агентів в такому середовищі полягає не тільки у моделюванні фізичних і технічних аспектів, але й у відтворенні соціальних та психологічних аспектів взаємодії між диспетчерами, пілотами та іншими учасниками авіаційного процесу.

Таким чином, для побудови ефективної системи навчання віртуальним середовищем, необхідно детально визначити основні структурні компоненти і типи інтелектуальних агентів, що беруть участь у процесах комунікації,

координації та прийняття рішень. Це дозволить забезпечити гнучкість і персоналізацію навчання, сприяти розвитку необхідних навичок і підвищити якість підготовки авіадиспетчерів. Розглянемо структурні компоненти, що мають бути застосовані у мультиагентній АВНС.

Система інтелектуальних агентів, які підтримують навчання у АВНС, мають складну структуру, що включає кілька взаємопов'язаних компонентів. Кожен з них має важливу роль у процесі навчання, сприяючи розвитку професійних навичок студентів, адаптації до нових ситуацій і підвищенню ефективності комунікації та координації в умовах стресу.

У цьому підрозділі розглянемо три ключові компоненти АВНС, які суттєво впливають на процес підготовки авіадиспетчерів.

Модуль адаптації навчання – це один з найбільш важливих компонентів, що дозволяє персоналізувати навчальний процес, підлаштовуючи завдання під рівень підготовки кожного курсанта. Цей модуль визначає складність навчальних завдань і відповідно до цього коригує їх в реальному часі. Він активно взаємодіє з результатами діяльності курсантів, здійснюючи аналіз виконаних завдань, оцінюючи час, який був витрачений на виконання завдань, які рішення приймалися, а також помилки, що виникали. Ключовим аспектом цього модуля є його здатність змінювати складність ситуацій, вводячи нові елементи на основі досягнень курсанта. Наприклад, якщо студент успішно справляється з базовими завданнями щодо координації руху літаків, система може поступово вводити більш складні умови, додаючи стресові фактори: незвичні погодні умови, необхідність оперативно змінювати маршрут через технічну несправність, множинні літаки, що потребують уваги в один час. Інтелектуальний агент на основі цих змін може також додавати або збільшувати інтенсивність взаємодії з іншими диспетчерами або пілотами. Наприклад, якщо курсант демонструє високий рівень комунікаційних навичок, агент може збільшити навантаження на зв'язок, додаючи додаткові комунікаційні потоки, що вимагають швидкої реакції, або одночасну координацію з декількома пілотами. З таким підходом, система не лише

забезпечує поступовий розвиток навичок, а й стимулює розвиток стресостійкості, коли диспетчер має адаптуватися до змінюваних умов. Додатково, цей модуль враховує психологічні характеристики учнів, спостерігаючи за тим, як вони реагують на стресові фактори, і в разі необхідності може «знижити» рівень складності, щоб уникнути перевантаження учня. Така адаптація є критично важливою для підтримки мотивації студента на всіх етапах навчання.

Модуль моніторингу та зворотного зв'язку має важливе значення для оцінки прогресу студентів і забезпечення їх ефективного навчання. Цей компонент займається збором даних про діяльність учасників в реальному часі. Він здійснює постійний моніторинг кожної взаємодії, фіксуючи моменти, коли курсант стикнувся з проблемою або допустив помилку в комунікації чи прийнятті рішень. За допомогою цього модуля можна здійснити детальний аналіз кожної ситуації і надати студентам детальне зворотне інформування. Наприклад, якщо студент затримав прийняття важливого рішення або допустив помилку в координації літаків, агент надає негайний зворотний зв'язок, вказуючи на помилки або затримки та пропонуючи рекомендації для покращення результатів. Агент може пояснити, чому певне рішення було неефективним і які інші варіанти могли б бути більш оптимальними в цій ситуації. Таким чином, студент не тільки отримує вказівки щодо своїх помилок, але й може отримати рекомендації по вдосконаленню своїх рішень у майбутньому.

Особливо важливим аспектом цього компонента є його здатність допомогти студенту розвинути аналітичні навички. Адже лише усвідомлення причин своїх помилок і аналіз альтернативних варіантів дій допомагає значно поліпшити процес навчання. Інтелектуальні агенти здатні відображати корисну статистику, що дозволяє студенту оцінити свої дії з різних точок зору: час реагування, точність рішень, кількість помилок і т. д. Таке зворотне відображення є важливим для подальшого коригування стратегії навчання. Цей компонент також допомагає розвивати у студентів навички саморегуляції

і рефлексії. Студент, отримуючи детальну інформацію про свої дії, може з'ясувати, де були допущені помилки, і на основі цього внести корективи у свою подальшу поведінку. Це є важливим для розвитку професіоналізму і самостійності, що критично важливо для роботи авіадиспетчера в реальних умовах. У результаті, модуль моніторингу та зворотного зв'язку не тільки фіксує результати дій студентів, але й забезпечує можливість для їхнього самостійного вдосконалення і розвитку навичок, що сприяють підвищенню ефективності командної роботи, комунікації та прийняття рішень в екстремальних ситуаціях.

Модуль координації та комунікації є одним із найважливіших елементів у навчальному середовищі для авіадиспетчерів. Цей компонент забезпечує правильну та ефективну взаємодію між студентами, а також між диспетчерами і іншими учасниками навчання, наприклад, пілотами або колегами-диспетчерами. У реальній авіаційній практиці навіть незначна помилка в обміні інформацією може призвести до серйозних наслідків, тому віртуальне середовище повинно створити умови для точної та своєчасної комунікації. Цей модуль допомагає студенту освоїти основи правильної взаємодії з іншими учасниками навчання, особливо в складних або екстремальних ситуаціях. Наприклад, коли диспетчер координує кілька літаків, що перебувають у складних погодних умовах, він повинен бути в постійному контакті з іншими диспетчерами для забезпечення безпеки польотів. Це вимагає чіткої та зрозумілої комунікації, де кожне повідомлення повинно бути передано точно і без помилок. Модуль також активно контролює процес передачі інформації, виявляючи можливі непорозуміння чи затримки в зворотному зв'язку. Якщо комунікація порушується, система надає сигнал для коригування дій. Важливим аспектом є те, що студент повинен навчитися ефективно спілкуватися навіть у стресових ситуаціях, коли на прийняття рішень є мало часу або емоційний стан учасників погіршується. Це важливо для розвитку стресостійкості, адже в реальних умовах будь-яка затримка або неправильне слово можуть мати серйозні наслідки для безпеки польоту.

Модуль рішень та підтримки командної роботи сприяє розвитку навичок спільного прийняття рішень у команді диспетчерів. У реальній авіаційній практиці часто трапляються ситуації, коли кілька диспетчерів працюють разом для забезпечення безпеки польотів, особливо у складних умовах, таких як технічні несправності, сильний повітряний трафік чи екстремальні погодні умови. У таких ситуаціях важливо, щоб усі учасники команди могли швидко і ефективно приймати рішення, працюючи злагоджено. Цей модуль дозволяє інтелектуальним агентам допомогти диспетчерам, аналізуючи ситуацію в реальному часі і пропонуючи варіанти дій. Агент може оцінити обстановку, порівнюючи різні сценарії розвитку подій і рекомендувати оптимальні шляхи для забезпечення безпеки польотів. Крім того, модуль сприяє колективному обговоренню та допомагає вирішувати суперечливі ситуації, пропонуючи різні стратегії для обговорення та прийняття рішення. Однією з ключових функцій цього модуля є можливість моделювати стресові ситуації, де диспетчерам доводиться ухвалювати рішення під тиском. Інтелектуальна система може збільшувати складність завдань, наприклад, вводячи додаткові літаки, що потребують термінової координації, або створюючи аварійні ситуації, коли рішення повинні бути ухвалені без зволікань і з максимальною точністю. В таких умовах диспетчери не тільки повинні знайти правильне рішення, а й працювати разом як єдина команда, підтримуючи один одного і зберігаючи спокій. Підтримка командної роботи в цьому модулі полягає не лише в аналізі ситуацій, а й у наданні необхідних інструментів для ефективної комунікації та координації між диспетчерами. Інтелектуальний агент може пропонувати рекомендації щодо оптимального розподілу обов'язків серед диспетчерів і допомогти організувати ефективне обговорення в умовах багатозадачності, коли кожен диспетчер має свою роль у вирішенні загальної задачі. Завдяки цьому компоненту студенти мають змогу не тільки вдосконалювати технічні навички, а й розвивати важливі риси для роботи в команді — лідерство, здатність до співпраці, стресостійкість і здатність приймати колективні рішення.

Розглянемо базові класи агентів, що можуть бути застосовані у АВНС з розвитку командної компетентності авіадиспетчерів

Агенти-менеджери – організатори навчального процесу. Агенти-менеджери – цифрові "куратори", які контролюють навчальний процес. Вони аналізують, наскільки ефективно студент виконує завдання, як швидко засвоює нові знання і чи не виникають у нього труднощі. Якщо система бачить, що учень впевнено справляється із базовими завданнями, агент автоматично підвищує складність – додає нові фактори, такі як несприятливі погодні умови або збільшення кількості літаків у секторі. Але якщо студент стикається з труднощами, агент може запропонувати додаткові пояснення, вправи або навіть трохи спростити завдання, щоб учень не втрачав мотивацію. Отже, це не просто алгоритм, а персональний помічник, який створює індивідуальну траєкторію навчання, підлаштовуючи програму під можливості кожного студента. У результаті навчання стає ефективнішим, а головне – більш реалістичним.

Агенти-симулятори створюють реалістичні сценарії, змушуючи курсантів приймати складні рішення в умовах, максимально наближених до реальності. Так, під час тренування студент може отримати екстрене повідомлення про те, що ПС, який заходить на посадку, має проблеми з шасі. Або ж агент може раптово змінити погодні умови – сильний туман, грозу чи шквальний вітер, – що змусить студента швидко переглянути план польотів і змінити маршрути повітряного руху. Агенти-симулятори також можуть відтворювати поведінку пілотів, інших диспетчерів та авіаційних систем, що працюють у реальному режимі. Вони можуть зімітувати ситуацію, коли один із пілотів неправильно розуміє команду диспетчера або коли бортовий комп'ютер ПС видає помилку. Завдяки таким сценаріям студенти вчаться діяти швидко, злагоджено та без паніки, що критично важливо для безпеки в небі.

Агенти-наставники забезпечують індивідуальну підтримку та позитивну мотивацію. Ці цифрові помічники працюють як індивідуальні

ментори. Вони не просто виправляють помилки, а й пояснюють, чому так сталося і як можна діяти краще наступного разу. Якщо студент неправильно передав команду пілоту або допустив затримку в прийнятті рішення, агент не просто вкаже на помилку, а й розбере її детально, запропонує альтернативні варіанти дій і пояснить, як уникнути подібних ситуацій у майбутньому. Крім цього, агенти-наставники виконують ще одну важливу роль – вони підтримують мотивацію. Якщо студент переживає через невдачі або відчуває, що не справляється, агент може дати позитивний зворотний зв'язок, підкресливши, що складнощі – це нормальна частина навчання. Наприклад, якщо учню важко одночасно контролювати кілька ПС у секторі, агент може запропонувати поступове збільшення навантаження, щоб допомогти йому адаптуватися без зайвого стресу.

Таким чином, впровадження інтелектуальних агентів у підготовку авіадиспетчерів не просто робить навчальний процес сучаснішим – воно наближає його до реальних умов роботи. Агенти-менеджери адаптують навчання під кожного курсанта, агенти-симулятори створюють ситуації, які вимагають швидких і точних рішень, а агенти-наставники допомагають аналізувати помилки та підтримують мотивацію. Завдяки такому підходу майбутні та діючі авіадиспетчери отримують не просто знання, а практичний досвід, який допомагає їм бути готовими до будь-яких викликів.

Висновки по розділу 2

Розроблені та представлені в даному розділі принципи проєктування АВНС охоплюють адаптивність навчального процесу, реалістичність змодельованих ситуацій, інтерактивну взаємодію між студентами, навчання на основі реальних кейсів та постійний зворотний зв'язок для вдосконалення командних навичок взаємодії авіадиспетчерів. Структура середовища, як мінімум, має включати навчальну платформу, комунікаційну систему та модулі для оцінювання й моделювання тренувальних сценаріїв.

Важливим елементом системи виступають інтелектуальні агенти трьох класів: менеджери, які адаптують навчальний процес; симулятори для створення реалістичних сценаріїв; наставники, які аналізують помилки та надають підтримку курсантам. Таке комплексне віртуальне середовище дозволяє ефективно формувати навички командної роботи, необхідні для безпечного та ефективного УПР у стресових умовах.

РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ АДАПТИВНОГО ВІРТУАЛЬНОГО НАВЧАЛЬНОГО СЕРЕДОВИЩА З РОЗВИТКУ НАВИЧОК КОМАНДНОЇ ВЗАЄМОДІЇ АВІАДИСПЕТЧЕРІВ

3.1 Розробка мультиагентної моделі адаптивного віртуального навчального середовища з розвитку командної компетенції авіадиспетчерів

Архітектура АВНС для підготовки авіадиспетчерів представляє собою складну багаторівневу мультиагентну систему, що реалізує модель **CRAFT** («**Calibration**» – «Налаштування», «**Review**» – «Аналіз», «**Adaptation**» – «Адаптація навчання», «**Facilitation**» – «Навчальна підтримка», «**Tracking**» – «**Моніторинг**»). Розглянемо кожен рівень мультиагентної моделі АВНС та функціонал відповідних агентів.

На базовому рівні системи функціонують **агенти налаштування й підтримки командної роботи (АНПКР)**, що забезпечують фундаментальну конфігурацію АВНС:

АНПКР 1.1 – «Агент моделювання навчальної зони/навчального аеродрому» формує структуру повітряного простору та конфігурацію аеродрому, диспетчерської аеродромної зони, сектору УПР, що відповідає реальному аеродрому / диспетчерського сектору згідно цільової навчальної групи диспетчерів та вимог замовника, з введенням обмежень, яких потребує відпрацювання планованих навчальних завдань.

Для моделювання повітряного простору агент забезпечує:

- 1) побудову меж секторів УПР з урахуванням їх вертикальних та горизонтальних меж та відтворення внутрішньої структури повітряного простору;
- 2) формування схеми маршрутів ОПР, умовних маршрутів (CDR) і стандартних маршрутів вильоту та прибуття (SID/STAR);

3) моделювання зон обмеження польотів, заборонених зон та небезпечних зон а також гнучких елементів повітряного простору, крім CDR;

4) встановлення суміжних секторів та центрів ОПП і налаштування точок передачі управління між секторами УПП.

При моделюванні аеродромної інфраструктури агент забезпечує:

1) відтворення геометрії злітно-посадкових смуг (ЗПС) з їх фізичними характеристиками;

2) моделювання руліжних доріжок, місць стоянок та перонів;

3) створення схем розташування радіотехнічних засобів забезпечення польотів;

4) відтворення зон очікування та зон початкового набору висоти, налаштування процедур заходу на посадку, включаючи схеми точного та неточного заходу.

Для забезпечення реалістичності віртуального навчального середовища агент має враховувати:

1) особливості рельєфу місцевості та штучні перешкоди в районі аеродрому;

2) метеорологічні умови та їх вплив на використання злітно-посадкових смуг;

3) сезонні особливості експлуатації аеродрому і добові зміни інтенсивності повітряного руху;

4) експлуатаційні обмеження аеродромного обладнання.

В контексті формування навчальних завдань агент забезпечує умови для:

1) модифікації конфігурації повітряного простору для створення потрібних навчальних ситуацій;

2) введення тимчасових обмежень використання окремих елементів повітряного простору сектору УПП і аеродромної інфраструктури;

3) моделювання нестандартних експлуатаційних умов та відмов навігаційного обладнання.

АНПКР 1.2 – «Агент визначення та розподілу рольових функцій»

виступає «архітектором навчальних команд» в АВНС авіадиспетчерів, здійснюючи комплексний аналіз профілів учнів. Він враховує їх вік, професійний досвід в різних секторах/органах ОНР (РДЦ, ДОП, АДВ) та рівень підготовки, включаючи наявні рейтинги авіадиспетчерів, для формування оптимального складу навчальної диспетчерської зміни або парної взаємодії. При цьому значна увага приділяється досвіду роботи в позаштатних ситуаціях, що є важливим для формування збалансованих навчальних команд з урахуванням психологічної сумісності їх членів. Агент оцінює рівень стресостійкості учнів; ступінь сформованості в них комунікативних навичок, лідерських якостей та здатності оперативно приймати рішення в складних ситуаціях при ОНР. Важливим аспектом є також врахування індивідуального темпераменту та стилю прийняття рішень кожного учня-авіадиспетчера, що дозволяє прогнозувати ефективність їх взаємодії в команді. Таким чином, на основі зібраної інформації, агент формує оптимальні склади навчальних диспетчерських змін, в яких досвідчені фахівців з ОНР працюють пліч-о-пліч зі своїми молодшими колегами. Крім того, агент балансує розподіл навантаження між всіма учасниками диспетчерської команди, враховуючи їх індивідуальну витривалість і уподобання, так і рівень професійної підготовки, що допомагає запобігти перевантаженню окремих членів команди та забезпечити ефективне навчання для всіх учасників.

АНПКР 1.3 – «Агент налаштування каналів (засобів і протоколів) зв'язку для проведення координації (зокрема, міжвідомчої), передачі управління і зв'язку» відповідає за конфігурацію технічних засобів зв'язку та систем передачі даних, забезпечуючи реалістичне моделювання комунікаційного середовища органу ОНР, що моделюється, а саме системи телефонного зв'язку для координації між суміжними секторами відповідного центру ОНР, зовнішньої координації з іншими центрами ОНР, взаємодії з військовими органами УНР, комунікації з аеродромною, пошуково-рятувальною та іншими службами. Крім того, реалізується платформа для

застосування систем передачі даних, таких як OLDI (On-Line Data Interchange) – для автоматизованого обміну польотними даними між європейськими центрами ОПП; AIDC (ATS Interfacility Data Communications) – для обміну даними відповідно до стандартів ICAO; AFTN/AMHS для передачі повідомлень, що стосуються ОПП (зокрема, планів польотів) і координаційних повідомлень.

Агент також відповідає за *налаштування протоколів взаємодії*, що включає:

- 1) встановлення правил ведення радіообміну згідно міжнародних вимог з урахуванням місцевих процедур;
- 2) налаштування форматів та шаблонів повідомлень для проведення координації між суміжними центрами УПП;
- 3) визначення часових параметрів для відповідних процедур координації;
- 4) моделювання процедур передачі управління між суміжними секторами/центрами УПП;
- 5) впровадження аварійних процедур зв'язку.

При цьому особлива увага приділяється *міжвідомчій координації*, для повноцінного забезпечення якої агент забезпечує:

- 1) моделювання специфічних протоколів взаємодії з військовими органами ОПП;
- 2) налаштування процедур координації при використанні умовних маршрутів (CDR) та інших гнучких елементів повітряного простору – тимчасово зарезервованих зон (TRA), тимчасово відокремлених зон (TSA), повітряного простору спрощеної координації (RCA);
- 3) можливість виконання процедур взаємодії при виникненні аварійних та непередбачених ситуацій в польоті;
- 4) можливість проведення координації при забезпеченні (сприянні) виконанню пошуково-рятувальних робіт.

Крім того, важливою функцією агента є *адаптивне управління якістю наземного зв'язку*, що дозволяє забезпечити імітацію збоїв та відмов засобів наземного зв'язку, створення перешкод та погіршення якості сигналу та імітації затримок при передачі даних і непроходження переданих повідомлень.

Для забезпечення навчальних цілей агент забезпечує можливості для формування специфічних сценаріїв відмов наземного зв'язку для відпрацювання особливих процедур; моделювання ситуацій з підвищеним навантаженням на канали наземного зв'язку; імітації позаштатних ситуацій, що вимагають складної координації та відтворення особливостей зв'язку при роботі за різних умов та характеру обмежень використання повітряного простору.

АНПКР 1.4 – «Агент конфігурування робочого середовища» відповідає за створення та налаштування віртуального робочого простору авіадиспетчера відповідного органу ОПр, що точно відтворює реальне робоче місце. Це включає в себе налаштування дисплею повітряної обстановки, конфігурацію панелі управління зв'язком, налаштування системи обробки польотних даних, конфігурація системи електронних стрипів тощо. Агент надає можливості для функціональної адаптації робочого місця відповідно до типу органу ОПр з можливостями персоналізації інтерфейсів.

АНПКР 1.5 – «Визначення характеру тренування і типу взаємодії» є ключовим компонентом АВНС, який визначає специфіку навчального процесу та формат взаємодії його учасників. Агент налаштовує режими тренування: індивідуальне навчання один на один з «еталонним цифровим авіадиспетчером» (входить до складу АВНС) для відпрацювання часткових навичок внутрішньосекторної («виконавчий диспетчер – диспетчер планувальник») та міжсекторної взаємодії (координація, передача контролю і зв'язку, вирішення конфліктів між ПС тощо), проведення міжвідомчої координації; парна взаємодія; групове тренування або повномасштабне моделювання роботи диспетчерської зміни.

АНПКР 1.6 – «Налаштування режиму тренування» є відповідає за конфігурацію та адаптацію навчального процесу відповідно до обраного режиму тренування, а саме: традиційного середовища навчання (під керівництвом інструктора), розвитку навичок саморегульованого навчання (СРН) та більш його просунутого формату – самоспрямованого навчання (ССН).

Другий рівень архітектури формують **діагностичні агенти (ДА)**, що здійснюють всебічну оцінку ефективності навчального процесу:

ДА 2.1 – «Агент-аналізатор» проводить багатокритеріальний аналіз дій авіадиспетчерів, визначаючи помилки і порушення в навчальній діяльності авіадиспетчерів за показниками своєчасності, точності та послідовності виконання процедур координації, передачі управління та вирішення сумісних проблемних ситуацій.

ДА 2.2 – «Агент-оцінювач» формує часткові і загальні оцінки результативності тренажу на індивідуальному, парному або груповому рівнях навчальної діяльності (в залежності від типу взаємодії учнів під час тренування), визначаючи ступінь досягнення навчальних цілей.

Варіаційно-адаптаційні агенти (ВАА) третього рівня забезпечують динамічну адаптацію навчального процесу. Розглянемо призначення і функціонал кожного з них нижче.

ВАА 3.1 – «Агент регулювання складності виконання тренувальної вправи для відпрацювання навичок командної роботи» здійснює адаптацію інтенсивності повітряного руху та модифікацію умов виконання тренувальних вправ відповідно до успішності попередньої тренувальної сесії з врахуванням як індивідуальних, так і командних показників роботи авіадиспетчерів (крім індивідуального режиму тренажу з цифровим диспетчером) та припущених ними помилок відповідного типу.

ВАА 3.2 – «Агент модифікації планів польоту ПС» представляє собою інтелектуальну модель для динамічного формування та адаптації планів польотів ПС, що дозволяє створювати різноманітні навчальні ситуації

потрібного типу і складності, пристосовуючи їх до минулого досвіду учнів і зроблених при цьому ними помилок. На *базовому рівні* даний агент займається формуванням типових планів польоту, визначаючи основні параметри руху ПС: маршрути, ешелони, швидкості та часові характеристики. При цьому агент враховує введені обмеження повітряного простору та льотно-експлуатаційні характеристики різних типів ПС. На *оперативному рівні* агент здійснює динамічну модифікацію планів польоту відповідно до розвитку навчальної ситуації, що включає зміни маршрутів польоту, ешелонів та швидкостей, оновлення часових параметрів руху ПС. Важливий акцент робиться на створенні реалістичних ситуацій, що вимагають активної взаємодії між авіадиспетчерами різних секторів УПР. На *стратегічному рівні* внесенням змін до планів польоту ПС відбувається оптимізація розподілу навантаження між зонами відповідальності авіадиспетчерів. При цьому агент регулює інтенсивність та складність повітряного руху, створює конфліктні ситуації, моделює затримки та обмеження, характерні для реальної роботи системи ОрПР з урахуванням навчальних цілей та рівня підготовки авіадиспетчерів.

ВАА 3.3 – «Агент інтеграції стресових подій» – агент інтеграції стресових подій виступає ключовим компонентом АВНС, що відповідає за створення та управління реалістичними стресовими ситуаціями в процесі групової підготовки авіадиспетчерів: раптових змін повітряної обстановки, виникнення складних міжсекторних конфліктів за участі декількох ПС, погіршення метеорологічних умов, відмов бортових і наземних технічних засобів. Кожна така ситуація налаштовується агентом для створення оптимального рівня стресового навантаження. Крім того, агент моделює ситуації з ускладненим радіозв'язком, мовними бар'єрами, проблемами міжсекторної координації, що дозволяє розвивати навички ефективної комунікації в умовах підвищеного рівня стресу. Система безперервно відслідковує психологічний стан учнів, вносячи зміни у рівень складності та темп стресогенних проблемних ситуацій з врахуванням індивідуальних

особливостей кожного авіадиспетчера та загальний рівень стресостійкості диспетчерської команди/пари авіадиспетчерів.

ВАА 3.4 – «Агент регулювання потреб в комунікації та координації дій» призначений для створення ситуацій, що вимагають активної комунікації та координації між учасниками повітряного руху, що включає моделювання стандартних технологічних процедур зі взаємодії між секторами УПР, координацію з військовим сектором та взаємодію з різними наземними службами. Важливим аспектом роботи агента є регулювання комунікаційного навантаження на авіадиспетчерів шляхом динамічної зміни кількості та складності комунікаційних завдань з урахуванням поточних навчальних цілей та результатів попередніх тренувальних сесій. Значна увага приділяється забезпеченню балансу між різними типами взаємодії – від координації у штатних ситуаціях до складних багатосторонніх комунікацій в позаштатних і аварійних ситуаціях.

На четвертому рівні діють **агенти підтримки (АП)**, що забезпечують необхідний супровід навчального процесу. Розглянемо склад агентів, що функціонують на цьому рівні:

АП 4.1 – «Агент-помічник, який надає контекстну довідкову інформацію та рекомендації щодо корегувальних дій», завдяки якому АВНС аналізує навчальну ситуацію у реальному форматі часу, надаючи релевантну довідкову інформацію та рекомендації саме тоді, коли вони найбільш потрібні конкретному учню. При цьому агент враховує як загальний контекст навчального процесу, так і поточний рівень підготовки авіадиспетчера включно зі специфікою навчальних завдань. Агент функціонує як у реактивному, та і в проактивному режимах, адаптуючи форму та обсяг наданої інформації/консультацій відповідно до поточного контексту та індивідуальних особливостей учня. При цьому рівень та характер підтримки залежить від прогресу навчання: з набуттям досвіду рівень прямої допомоги адаптивно знижується, змінюючись на більш загальні рекомендації та

підказки. Застосування такої адаптивної підтримки стимулює розвиток самостійності та професійної впевненості авіадиспетчерів.

АП 4.2 – «Агент підтримки психологічного стану» здійснює моніторинг рівня втоми та зміни в концентрації уваги авіадиспетчерів, надаючи рекомендації з оптимізації темпу і режиму навчання, впровадження оптимальних перерв та зміну рівня складності завдань з врахуванням індивідуальних особливостей відновлення та поточних навчальних цілей. При цьому особлива увага приділяється раннім ознакам професійного стресу та виснаження. Агент аналізує поведінкові шаблони авіадиспетчера, включаючи швидкість реакції на події у повітряному русі, точність виконання технологічних операцій, характер допущених помилок та особливості інформаційного обміну, потім порівнюючи їх зі значеннями індивідуальних базових показників.

АП 4.3 – Агент зворотного зв'язку в рамках саморегульованого навчання (СРН) функціонує на принципах адаптивного навчання та розвитку навичок професійного самовдосконалення, здатності до самокритичності та саморефлексії. При цьому АВНС не просто надає готові оцінки, але й стимулює самоаналіз власної діяльності, розвиваючи здатність до об'єктивного самоаналізу. АВНС допомагає учням встановлювати поточні цілі навчання, робити їх перегляд та відстежувати прогрес в ступені їх досягненні, розробляти ефективні стратегії професійного самовдосконалення. Забезпечується поступовий перехід від зовнішньої підтримки з боку системи до самостійного менеджменту навчального процесу в усіх його процесах.

Завершальний п'ятий рівень представлений **агентами моніторингу навчального прогресу (АМНП)**.

АМНП 5.1 – «Агент моніторингу показників опанування командної компетенції» відстежує ключові індикатори розвитку командних субкомпетенцій, таких як ефективність комунікації між членами диспетчерської команди, якість прийняття спільних рішень, лідерські якості, рівень ситуаційної обізнаності та здатність до пристосування до змінних умов

роботи, координації дій в напружливих умовах роботи та у стресових ситуаціях. На основі зібраних даних АВНС формує динамічні індивідуальні профілі учнів, що пов'язані з розвитком командних компетенцій. Це дозволяє відстежувати прогрес навчання спорідненим інтелектуальним агентом та виявляти ті місця, що потребують особливої уваги. У подальшому, на етапі адаптації, ці дані використовуються для адаптації тренувальних сценаріїв та оптимізації процесу підготовки диспетчерських команд.

АМНП 5.2 – «Агент відстеження динаміки навчального процесу» аналізує довгострокові тренди навчання та прогнозує його результати в найближчому майбутньому із застосуванням прогностичних моделей навчального прогресу. АВНС проводить систематичний аналіз показників навчання, відстежуючи темпи розвитку навичок командної взаємодії, стійкість набутих командних субкомпетенцій та ефективність застосування отриманих знань в практичних сценаріях групової підготовки.

АМНП 5.3 – «Агент статистики» здійснює накопичення та обробку навчальних даних, формуючи аналітичні звіти та прогностичні моделі. Його функцією є формуванні комплексної статистичної бази по кожному учню для оцінки ефективності навчання та прийняття обґрунтованих рішень з його адаптації та оптимізації.

Методологія Gaia, обрана для реалізації взаємодії між агентами, забезпечує чітку структуру та формалізовані протоколи комунікації. Вищерозглянутий комплекс з п'яти рівнів агентів представляє собою цілісну систему, в якій кожен рівень забезпечує виконання своїх специфічних функцій, але працює у тісній взаємодії з іншими для досягнення спільної мети – реалізації комплексного індивідуального-командного адаптивного підходу до навчання (рис. 3.1).

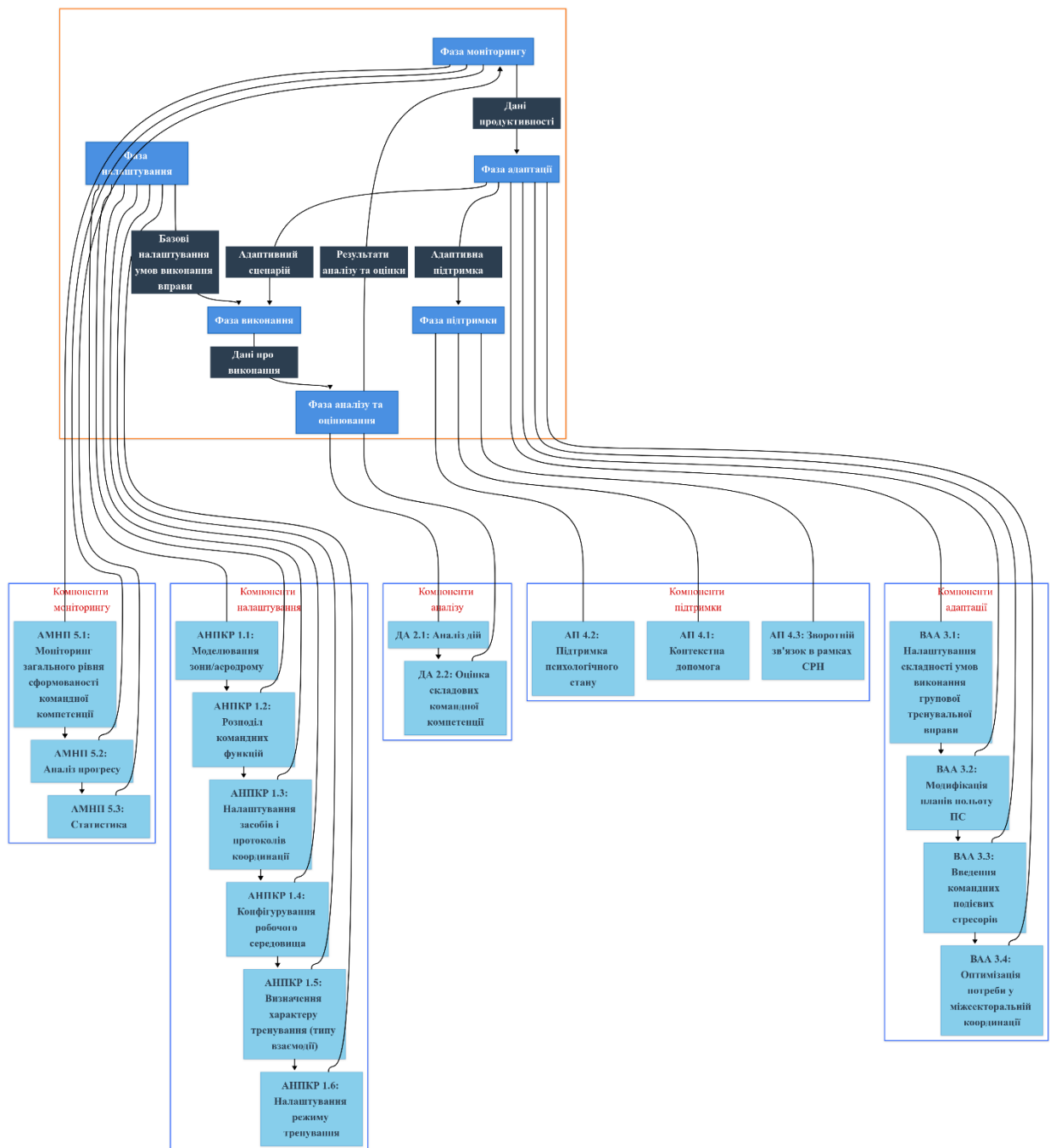


Рисунок 3.1 – Мультиагентна модель АВНС з розвитку командної компетенції авіадиспетчерів («CRAFT»)

Розглянемо принцип роботи АВНС на основі представленої моделі. Система функціонує як цілісна система, що складається з п'яти взаємопов'язаних фаз, кожна з яких має особливе призначення та взаємодіє з

іншими елементами моделі через потоки даних та керуючі впливи. Розглянемо послідовно кожен етап та їх взаємозв'язки.

Фаза налаштування є відправною точкою тренувального процесу. На цьому етапі АВНС здійснює початкове налаштування умов виконання тренувальної вправи, враховуючи поточний рівень підготовки авіадиспетчерів та специфіку навчальних завдань. Компоненти налаштування включають моделювання зони та аеродрому, розподіл командних функцій, налаштування засобів і протоколів координації, конфігурування робочого середовища та визначення характеру тренування. Результатом цієї фази є сформовані базові налаштування для виконання тренувальної вправи.

Фаза виконання активується після завершення базових налаштувань. Під час цієї фази авіадиспетчери безпосередньо працюють у змодельованому середовищі, виконуючи поставлені завдання, у той час як АВНС збирає дані про виконання, що включають всі дії учнів, їхню взаємодію, прийняті рішення та результативність цих рішень. Потім зазначені дані передаються до фази аналізу та оцінювання.

Фаза аналізу та оцінювання обробляє отримані первинні дані про результати виконання вправи та здійснює оцінку складових командної компетенції. Зведені дані про припущенні помилки та оцінки використовуються для адаптації навчального процесу.

Фаза підтримки працює паралельно з фазою виконання та забезпечує необхідну допомогу авіадиспетчерам. Вона включає три ключові складові: контекстну допомогу, підтримку психологічного стану учнів та зворотний зв'язок в рамках СРН. Дана фаза отримує дані про успішність тренувальної сесії авіадиспетчерів від фази аналізу та використовує їх для налаштування рівня та характеру навчальної підтримки.

Фаза адаптації використовує результати аналізу для коригування параметрів адаптивного навчального середовища. Складові адаптації включають налаштування складності умов виконання наступної групової

тренувальної вправи, модифікацію планів польоту ПС, введення командних подієвих стресорів та оптимізацію потреб у міжсекторальній координації.

Фаза моніторингу здійснює безперервне спостереження за всім процесом навчання. Компоненти моніторингу включають відстеження загального рівня сформованості командної компетенції, аналіз прогресу та накопичення статистичних даних. Ця фаза забезпечує постійний потік даних для оцінки ефективності навчального процесу та його вдосконалення.

Всі фази взаємопов'язані потоками даних, що забезпечує безперервну адаптацію та оптимізацію навчального процесу з розвитку командної компетенції авіадиспетчерів. Базові налаштування умов виконання вправи визначають фазу виконання, а дані про відпрацювання тренувальної сесії передаються до фази аналізу та оцінювання. Потім результати аналізу використовуються фазами підтримки та адаптації для коригування тренувального процесу. Фаза моніторингу збирає дані з усіх інших фаз для формування цілісної картини навчального процесу. Розглянутий циклічний характер взаємодії п'яти фаз забезпечує персоналізовано-командну адаптацію. АВНС оперативно й гнучко враховує прогрес учнів для оптимізації ступеня складності та адаптивної підтримки з метою ефективного розвитку командних субкомпетенцій авіадиспетчерів. Система забезпечує точне налаштування параметрів групового навчання та індивідуалізований підхід до кожного авіадиспетчера при збереженні цілісності командної підготовки. Така архітектура створює ефективне середовище для розвитку як індивідуальних навичок, так і здатності до командної взаємодії в складних умовах УПР.

3.2 Розробка структури адаптивного віртуального навчального середовища з розвитку навичок командної взаємодії авіадиспетчерів

В структурі багаторівневої АВНС слід виділити чотири фундаментальні системи, що забезпечують комплексну реалізацію навчального процесу з розвитку командної компетенції авіадиспетчерів (рис. 3.2).

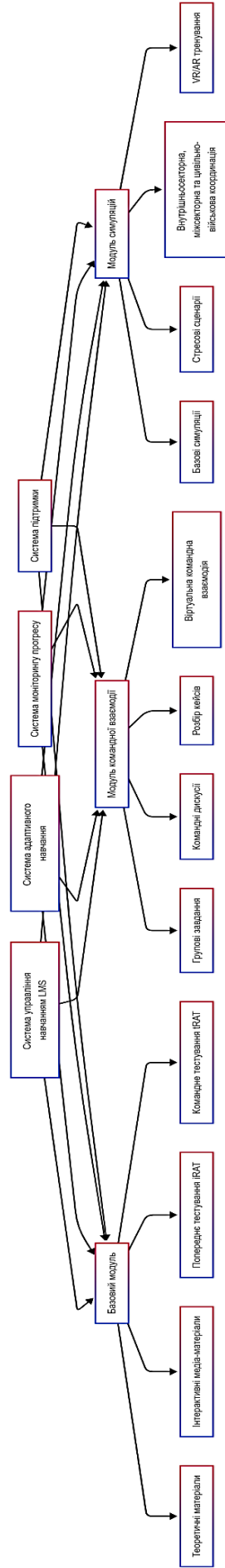


Рисунок 3.2 – Структура АВНС з розвитку командної компетенції авіадиспетчерів

Система управління навчанням функціонує як базовий координуючий механізм всього навчального процесу, забезпечуючи структуровану подачу навчального матеріалу через інтеграцію різноманітних форматів контенту – від інтерактивних лекцій до повноцінних парних/групових симуляцій. Важливим аспектом системи управління навчанням є механізм формування індивідуальних траєкторій навчання. На основі початкового оцінювання та отриманих поточних результатів система автоматично вибудовує оптимальну послідовність навчальних модулів, забезпечуючи поступове нарощування складності при збереженні високої залученості учнів до навчального процесу.

Система адаптивного навчання реалізує принцип динамічної індивідуально-групової адаптації навчального процесу з розвитку навичок командної взаємодії авіадиспетчерів. В її основі лежить комплексний аналіз множини параметрів навчальної діяльності, включаючи швидкість засвоєння матеріалу, індивідуальні й командні типові помилки, стратегії вирішення завдань та показники стресостійкості. На основі цього аналізу система здійснює автоматичне налаштування складності завдань, темпу подання матеріалу й відпрацювання практичних тренувальних сценаріїв та форм контролю. Особливе значення в системі адаптивного навчання має механізм прогнозування вузьких місць у формуванні окремих командних субкомпетенцій авіадиспетчерів. Із застосуванням методів машинного навчання система аналізує поточні результати та передбачає потенційні проблеми у засвоєнні матеріалу, що дозволяє превентивно модифікувати індивідуальну навчальну траєкторію.

Система моніторингу навчального прогресу забезпечує безперервне відстеження та аналіз процесу формування всіх складових командної компетенції авіадиспетчерів. Вона реалізує багаторівневий підхід до оцінювання, що охоплює як теоретичні знання, так і практичні навички УПР. В реальному часі система відстежує множинні параметри навчальної діяльності, включаючи точність виконання технологічних процедур і окремих операцій з УПР, що стосуються внутрішньосекторної, міжсекторної та

міжвідомчої взаємодії, швидкість прийняття рішень та якість професійної комунікації. Важливою функцією системи моніторингу є формування детальної аналітики, що відображає не лише кількісні показники успішності, але й якісні характеристики навчального процесу. Це створює основу для прийняття обґрунтованих рішень з оптимізації навчальних програм та надання цільової підтримки учням.

Система навчальної підтримки реалізує принцип безперервного педагогічного супроводу шляхом надання своєчасної конструктивної допомоги, включаючи механізми контекстної допомоги, що надає релевантну інформацію саме в той момент, коли вона найбільш необхідна учню. Система також забезпечує психологічну підтримку, відстежуючи рівень стресу та адаптуючи навчальне навантаження для підтримки оптимального психоемоційного стану з використанням адаптивних алгоритмів формування зворотного зв'язку. Кожне оціночне судження супроводжується конкретними рекомендаціями з вдосконалення навичок командної взаємодії, при цьому їх форма та зміст адаптуються відповідно до індивідуальних особливостей сприйняття інформації.

Комплексне застосування цих 4 систем створює цілісне навчальне середовище, що забезпечує високу ефективність професійної підготовки авіадиспетчерів при збереженні індивідуального підходу до кожного учня. Їх взаємодія реалізується через єдині протоколи обміну даними, що забезпечує синхронізацію всіх компонентів АВНС та формування цілісної картини навчального процесу.

Структурна організація **базового модуля** реалізується через чотири взаємопов'язані компоненти, кожен з яких виконує специфічні дидактичні функції. Теоретичний компонент забезпечує системне засвоєння фундаментальних знань через використання коротких відеолекцій тривалістю до 6 хв., що відповідає сучасним дослідженням когнітивної психології щодо оптимальної тривалості концентрації уваги. Особливу роль в структурі модуля відіграє система інтерактивних медіа-матеріалів, що використовує принципи

когнітивної візуалізації для представлення складних професійних концепцій. Кожен навчальний елемент супроводжується вбудованими механізмами самоперевірки, що дозволяють учням оцінювати рівень засвоєння матеріалу та коригувати власну освітню траєкторію.

Важливим елементом модуля є електронна бібліотека професійних знань, що містить структуровану інформацію про процедури УПР, нормативні документи та кращі практики в сфері ОрПР. Особливістю даного компоненту є використання семантичних зв'язків між елементами контенту, що забезпечує формування цілісного розуміння предметної області.

Система оцінювання в базовому модулі реалізує принципи формуючого оцінювання через комбінацію індивідуального та командного тестування. Важливим компонентом формуючого оцінювання виступає система індивідуального відстеження прогресу, що базується на порівнянні поточних результатів з попередніми досягненнями учня, що дозволяє визначати індивідуальну динаміку навчання та своєчасно виявляти проблемні зони в знаннях. Принципи формуючого оцінювання в системі професійної підготовки авіадиспетчерів являють собою комплексний підхід до моніторингу та розвитку професійних компетенцій (зокрема, командної), що базується на концепції безперервного відстеження навчального прогресу та своєчасної корекції траєкторій навчання. Індивідуальні тести по типу iRAT (Individual Readiness Assurance Test – тест визначення індивідуальної готовності) використовують адаптивні алгоритми підбору завдань, що дозволяє точно визначити рівень компетентності кожного учня. Командне тестування у форматі tRAT (Team Readiness Assurance Test – тест на підтвердження готовності команди) дозволяє моделювати реальні ситуації командної взаємодії при вирішенні професійних завдань з УПР. Процедура виконання tRAT реалізується в декілька послідовних етапів. На першому етапі члени команди індивідуально вирішують набір професійних завдань, формуючи власне бачення можливих рішень. Другий етап включає колективне обговорення індивідуальних рішень з метою прийняття консенсусного

колективного рішення. Його специфіка полягає у необхідності аргументації власної позиції та критичному аналізі пропозицій колег-авіадиспетчерів. Технологічна реалізація tRAT передбачає використання спеціалізованого програмного забезпечення, що забезпечує синхронізацію роботи членів команди авіадиспетчерів в реальному часі, фіксацію та аналіз процесу обговорення, автоматичну оцінку індивідуального внеску кожного учня і формування детальної аналітики командної взаємодії. Завдання для tRAT розробляються на основі реальних професійних ситуацій в сфері УПР та вимагають застосування комплексу знань і навичок командної взаємодії. Завдання організовані таким чином, щоб стимулювати активну дискусію учнів та виявляти різні аспекти їх командної роботи. Тест складається з 5 блоків по 4 питання або твердження, з якими учень може погодитися або не погодитися. iRAT та tRAT мають форму закритого іспиту (тестування) тривалістю 20 хв., потім здійснюється порівняння результатів iRAT і tRAT для об'єктивної оцінки ефекту синергії командної взаємодії. Так, якщо результати tRAT стабільно перевищують середні показники iRAT, це свідчить про ефективність командної роботи та здатність групи досягати кращих результатів через колективне обговорення та прийняття рішень. Крім того, порівняння результатів дозволяє виявити, наскільки ефективно окремі авіадиспетчери адаптуються до командної роботи. Це особливо важливо для формування збалансованих навчальних диспетчерських змін, в якій кожен член команди повинен ефективно виконувати свою роль.

Модуль командної взаємодії, як ключовий компонент віртуального тренувального курсу авіадиспетчерів, реалізує системний підхід до формування ними командної компетенції через поєднане застосування технологічних та методологічних інновацій. Архітектурно модуль складається з 4 взаємопов'язаних компонентів: модулю базових імітаційних вправ, модулю професійної комунікації у груповому навчальному середовищі, аналітичної платформи кейс-стаді та віртуального простору командної взаємодії. Кожна з цих сфер функціонує як автономна підсистема, забезпечуючи розвиток

специфічних професійних якостей авіадиспетчерів, пов'язаних з командною роботою.

Комплекс базових групових імітаційних вправ, що ґрунтується на методології Team-Based Learning (залучає знання учнів через індивідуальне тестування та групову співпрацю), інтегрує масив адаптивних тренувальних сценаріїв, що репрезентують різні аспекти діяльності диспетчерської зміни. Зміни в складності завдань корелюються з прогресом команди та індивідуальними траєкторіями розвитку її членів, забезпечуючи оптимальний баланс між викликом та досяжністю навчальних цілей.

Модуль професійної комунікації у груповому навчальному середовищі функціонує як багатовимірна платформа синхронної та асинхронної взаємодії, інтегруючи інструментарій для проведення віртуальних брифінгів і дебрифінгів, групових дискусій та експертних консультацій. Система групового аналізу комунікативних моделей підвищує об'єктивність оцінки ефективності командної взаємодії та надає можливість формувати індивідуальні рекомендації щодо її оптимізації.

Аналітична платформа кейс-стаді представляє собою структурований репозиторій реальних робочих ситуацій, категоризованих за типологією командної взаємодії та рівнем складності. Кожен кейс супроводжується багаторівневим аналітичним апаратом, що включає контекстуальний опис, декомпозицію прийнятих рішень та їх наслідків, систему інтерактивних завдань для розвитку командних субкомпетенцій.

Відпрацювання серії групових імітаційних вправ переважно фокусується на окремих аспектах командної роботи, дозволяючи розвивати специфічні навички в ізольованому контексті виконання технологічних процедур та алгоритмів взаємодії різного типу: внутрішньосекторної, міжсекторної та міжвідомчої координації дій. Натомість віртуальний простір командної взаємодії створює цілісне навчальне середовище, в якому всі аспекти роботи диспетчерської зміни відтворюються одночасно у їх взаємозв'язку. Тривимірне занурення в навчальне середовище забезпечується

використанням VR/AR технологій, що дозволяє учням відчувати присутність у реалістично імітованому робочому середовищі. Архітектура віртуального навчального простору включає моделювання різнорівневих сценаріїв роботи диспетчерської зміни, охоплюючи весь спектр робочих ситуацій – від штатної координації до управління критичними подіями в умовах підвищеної складності повітряного руху та інформаційної невизначеності.

Модуль симуляції представляє собою комплексне навчальне середовище, що забезпечує поетапне формування командної та інших фахових компетенцій авіадиспетчерів через реалістичне моделювання проблемних ситуацій різного типу і рівня складності. Архітектура модулю симуляції включає компоненти базової симуляції, стресових сценаріїв, міжсекторної координації та повноцінних групових тренувань з використанням технологій віртуальної та доповненої реальності. *Компонент базової симуляції* створює фундамент для формування навичок командної взаємодії через відтворення штатних робочих ситуацій. Особливістю цього рівня є можливість багаторазового повторення типових технологічних процедур з поступовим збільшенням темпу роботи та кількості одночасно контрольованих ПС. Система адаптивного контролю забезпечує оптимальне навантаження, не допускаючи як надмірний стрес, так і втрату концентрації через монотонність навчальної діяльності. *Рівень стресових сценаріїв* вводить елементи невизначеності та ускладнення з моделюванням нестандартних ситуацій, що вимагають швидкого прийняття рішень в умовах обмеженого часу та інформаційної невизначеності. Система динамічно генерує сценарії на основі аналізу попередніх результатів, забезпечуючи оптимальний рівень складності для кожного авіадиспетчера. *Компонент відпрацювання різних видів координації* забезпечує відпрацювання навичок взаємодії між виконавчим диспетчером і диспетчером-планувальником, диспетчерами суміжних секторів УПР, цивільними і військовими диспетчерами. Цей рівень симуляції відтворює реальні комунікаційні протоколи та процедури передачі управління, дозволяючи формувати цілісне розуміння процесів координації в системі УПР.

Використання VR/AR технологій дозволить досягти високого рівня занурення у процес навчальної діяльності, що особливо важливо при відпрацюванні складних ситуацій при УПР, для яких просторова орієнтація та командна ситуаційна обізнаність мають важливе значення.

Висновки до розділу 3

У даному розділі роботи представлено комплексний опис адаптивного віртуального навчального середовища для розвитку командної компетенції авіадиспетчерів. Система базується на мультиагентному підході та реалізує модель CRAFT, що забезпечує налаштування, аналіз, адаптацію, підтримку та моніторинг навчального процесу.

Методологічною основою розробленої системи виступають дванадцять базових принципів, серед яких ключовими є системна інтеграція, цільова орієнтація, багаторівневий зворотний зв'язок, активна взаємодія та динамічна адаптація. Особлива увага приділяється принципам професійної автентичності, когнітивної зваженості та проактивного забезпечення безпеки польотів, що відображає специфіку професійної діяльності авіадиспетчерів.

Архітектура системи представлена п'ятьма взаємопов'язаними рівнями агентів, кожен з яких виконує специфічні функції. На базовому рівні функціонують агенти налаштування й підтримки командної роботи, що забезпечують фундаментальну конфігурацію середовища. Другий рівень формують діагностичні агенти, які здійснюють оцінку ефективності навчального процесу. Третій рівень представлений варіаційно-адаптаційними агентами, що забезпечують динамічну адаптацію навчання. Четвертий рівень включає агентів підтримки, які надають необхідний супровід. Завершальний п'ятий рівень представлений агентами моніторингу навчального прогресу.

Важливим аспектом розробленої системи є її модульна структура, що включає базовий модуль, модуль командної взаємодії та модуль симуляції. Кожен модуль реалізує специфічні дидактичні функції та забезпечує

формування відповідних професійних компетенцій. Особливу роль відіграє застосування технологій віртуальної та доповненої реальності, що дозволяє досягти високого рівня занурення у процес навчальної діяльності.

Система реалізує комплексний підхід до оцінювання, що включає як індивідуальне (iRAT), так і командне (tRAT) тестування, що дозволяє об'єктивно оцінювати ефект синергії командної взаємодії. Важливим елементом є також аналітична платформа кейс-стаді, що містить структурований репозиторій реальних робочих ситуацій.

Таким чином, запропонована система створює адаптивне навчальне середовище для розвитку як індивідуальних навичок, так і здатності до командної взаємодії в складних умовах УПР, що відповідає сучасним вимогам до професійної підготовки авіадиспетчерів.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

На основі проведеного дослідження та відповідно до поставлених задач можна сформулювати наступні загальні висновки:

1. Аналіз сучасного стану підготовки диспетчерів УПР виявив суттєві виклики, пов'язані з обмеженнями традиційних методів навчання. Застосування АВНС у поєднанні з сучасними інформаційно-комунікаційними технологіями здатні значно підвищити ефективність формування навичок командної взаємодії авіадиспетчерів. Встановлено, що застосування адаптивного підходу до навчання дозволяє створити оптимальні умови для розвитку як індивідуальних навичок, так і здатності до командної взаємодії в складних умовах УПР.

2. У результаті дослідження визначено оптимальні шляхи впровадження сучасних технологій у підготовку диспетчерів УПР. Виявлено, що генеративний штучний інтелект та машинне навчання мають значний потенціал в забезпеченні автоматизованого створення командних сценаріїв та оцінювання результатів групової навчальної діяльності авіадиспетчерів. Великі мовні моделі продемонстрували ефективність у тренуванні комунікативних навичок, тоді як технології віртуальної та доповненої реальності довели свою результативність у створенні імерсивних навчальних середовищ. Афективні обчислення та навчальна аналітика є критично важливими для моніторингу рівня психоемоційного стану учнів та рівня стресу під час тренувань та адаптації складності вправ.

3. На основі системного аналізу обґрунтовано концептуальні засади побудови АВНС для розвитку командної компетенції авіадиспетчерів. Розроблені принципи наголошують на системній інтеграції, цільовій орієнтації, багаторівневому зворотному зв'язку, активній взаємодії та динамічній адаптації. Ці принципи забезпечують максимальну наближеність навчального середовища до реальних умов роботи при збереженні когнітивної зваженості та культурної адаптивності.

4. У результаті дослідження розроблено мультиагентну модель і структуру АВНС на основі авторської моделі CRAFT (Calibration, Review, Adaptation, Facilitation, Tracking). Система включає п'ять взаємопов'язаних рівнів інтелектуальних агентів, що керують різними аспектами навчального процесу. Запропонована структура АВНС складається з чотирьох систем: системи управління навчанням, системи адаптивного навчання, системи моніторингу навчального прогресу і системи навчальної підтримки та містить три ключові модулі: базовий модуль, модуль командної взаємодії та модуль симуляції з використанням технологій VR/AR для підвищення рівня занурення у процес тренування. Система забезпечує як розвиток індивідуальних навичок, так і формування командної компетенції авіадиспетчерів через застосування адаптивних навчальних сценаріїв, моніторинг ефективності навчання та адаптивну навчальну підтримку з урахуванням режиму тренажу і рівня сформованості в авіадиспетчерів навичок саморегульованого навчання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Air Traffic Controller Job Description : website. URL: <https://www.prospects.ac.uk/job-profiles/air-traffic-controller> (Last Accessed: 12.10.2024).
2. Manual on Air Traffic Controller Competency-based Training and Assessment. Doc 10056 AN/519. URL: https://www.icao.int/SAM/Documents/2016-CBT/10056_draft_en.pdf (Last Accessed: 10.10.2024).
3. Development of the ATC Simulators: Virtual Reality implementation. IEEE Xplore. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4089268> (Last Accessed: 12.10.2024).
4. Allsop J., Keeling R. On Approach to Reality: The Impact of a Simulated Air Traffic Control Environment (SATCE) on Workload and Situational Awareness in Military Aviators. 2023. URL: <https://www.researchgate.net/profile/Jon-Allsop/publication/379957057> (Last Accessed: 14.10.2024).
5. Oberhauser M., Dreyer D., Braunstingl R., Koglbauer I. What's Real About Virtual Reality Flight Simulation? Comparing the Fidelity of a Virtual Reality With a Conventional Flight Simulation Environment. URL: <https://doi.org/10.1027/2192-0923/a000134>.
6. EUROCONTROL. Digitalisation and AI in air traffic control: balancing innovation with the human element : website. URL: <https://www.eurocontrol.int/article/digitalisation-and-ai-air-traffic-control-balancing-innovation-human-element> (Last Accessed: 17.10.2024).
7. Easy Access Rules for Air Traffic Controllers' Licensing and Certification: ANNEX I – PART ATCO. URL: <https://www.easa.europa.eu/en/document-library/easy-access-rules/online-publications/easy-access-rules-air-traffic-controllers> (Last Accessed: 18.10.2024).

8. ATC simulators – what does air traffic controller training look like? : website. URL: <https://gbaircraft.pl/en/atc-simulators-what-does-air-traffic-controller-training-look-like/> (Last Accessed: 19.10.2024).

9. Managing Compliance with ICAO SARPs (MCIS EN) : website. URL: <https://www.icao.tv/videos/civil-aviation-authority-senior-and-middle-managers-course> (Last Accessed: 22.10.2024).

10. Standards and Recommended Practices (SARPS). Skybrary : website. URL: <https://skybrary.aero/articles/standards-and-recommended-practices-sarps> (Last Accessed: 22.10.2024).

11. Operational Efficiency: VR for Air Traffic Control Training and Visualization : website. URL: <https://gbaircraft.pl/en/atc-simulators-what-does-air-traffic-controller-training-look-like/> (Last Accessed: 22.10.2024).

12. Antoško M., Sabo J., Hovanec M., Korba P., Sekelová M. How to Evaluate the Actual Psychological Readiness of ATCO. *Proceedings of 20th International Scientific Conference. Transport Means 2017*. URL: <https://idoaba.eu/567/pub17/lf/185526.pdf> (Last Accessed: 23.10.2024).

13. Working with Unserviceable or Inadequate Equipment in ATC : 39TH ANNUAL CONFERENCE, Marrakech, Morocco, 6-10 March 2000 WP No. 161. URL: <https://ifatca.wiki/kb/wp-2000-161/> (Last Accessed: 24.10.2024).

14. English Language Proficiency for Aeronautical Communication. ELPAC. URL: <https://elpac.eurocontrol.int> (Last Accessed: 25.10.2024).

15. Real and Required level of English, miscommunication and misinterpretation, ICAO ELP GRADE SCALE Description. URL: <https://ilpt.net/aviation-english-levels-explained> (Last Accessed: 26.10.2024).

16. Balta E., Psarrakis A., Vatakis A. The effects of increased mental workload of air traffic controllers on time perception: Behavioral and physiological evidence. *Aerospace*, Vol. 11, 2024. 22 p.

17. IMPROVE TRAINING EFFICIENCY WITH VR and Simulated ATC Solution for Virtual Reality (VR) Flight Training. SERA ATC. URL: https://seraatc.com/appexamples/flight_training.html (Last Accessed: 29.10.2024).

18. How Virtual and Augmented Reality Are Used in Aviation Training and Other Use Cases. URL: <https://www.jasoren.com/how-virtual-and-augmented-reality-are-used-in-aviation-training-and-other-use-cases/> (Last Accessed: 30.10.2024).

19. Working with ATC. Interaction with another aviation Personel. URL: <https://www.airservicesaustralia.com/industry-info/pilot-tools/pilot-and-airside-safety/working-with-atc/> (Last Accessed: 01.11.2024).

20. Borst C., van Kampen E.-J., Nunes T.M.M., Boonsong S. Personalized and transparent AI support for ATC conflict detection and resolution: an empirical study. URL: https://www.sesarju.eu/sites/default/files/documents/sid/2022/paper_51.pdf (Last Accessed: 03.11.2024).

21. Endsley M. R. From here to autonomy: Lessons learned from human–automation research. *Human Factors*. 2017. Vol. 59, No. 1. P. 5–27.

22. Van Rooijen S., Ellerbroek J., Borst C., Van Kampen E.-J. Toward individual-sensitive automation for air traffic control using convolutional neural networks. *Journal of Air Transport*. 2020. Vol. 28, No. 3. P. 1–9.

23. Human Factors in Aviation the Implications of Errors and How to Avoid and Manage Errors. URL: <https://sassofia.com/blog/human-factors-aviation-implications-errors-avoid-manage-errors/> (Last Accessed: 12.11.2024).

24. Dougiamas M., Taylor P. C. Moodle: Using Learning Communities to Create an Open Source Course Management System. *Proceedings of EdMedia*. 2003. P. 171-178.

25. Blackboard Learning Management System. Blackboard Inc. URL: <https://www.blackboard.com> (Last Accessed: 16.11.2024).

26. Canvas Learning Platform. Instructure. URL: <https://www.instructure.com/canvas> (Last Accessed: 18.11.2024).

27. Google Classroom Overview. Google. URL: <https://edu.google.com> (Last Accessed: 19.11.2024).

28. Using AI as a Personal Learning Assistant: Strategies for Student Success. LinkedIn. URL: <https://www.linkedin.com/pulse/using-ai-personal-learning-assistant-strategies-stephen-hw2xc> (Last Accessed: 19.11.2024).
29. ATC Training VATSIM and IVAO. URL: https://www.cixvfrclub.org.uk/training/ATC_training/ATCOnline.php (Last Accessed: 19.11.2024).
30. Augmented Reality for Tower Control. NLR. URL: <https://www.nlr.org/flyers/en/f337-augmented-reality-for-tower-control.pdf> (Last Accessed: 20.11.2024).
31. Exploring New Horizons: Benefits of AR in Aerospace. URL: <https://nsflow.com/blog/exploring-new-horizons-benefits-of-ar-in-aerospace> (Last Accessed: 21.11.2024).
32. MAXSIM: STATE-OF-THE-ART AIR TRAFFIC CONTROL SIMULATION AND TRAINING SYSTEM. URL: <https://www.adacel.com/maxsim-air-traffic-control-simulation-training> (Last Accessed: 22.11.2024).
33. How Augmented Reality might change Air Traffic Control. URL: <https://www.atrics.com/how-augmented-reality-might-change-air-traffic-control/> (Last Accessed: 23.11.2024).
34. Грибюк О. О. Віртуальне освітнє середовище як інноваційний ресурс для навчання і дослідницької діяльності студентів. URL: <https://lib.iitta.gov.ua/id/eprint/1115/1/Grybyuk-tezy.pdf> (Last Accessed: 23.11.2024).
35. The Future Of Blockchain Technology In Education. URL: <https://elearningindustry.com/the-future-of-blockchain-technology-in-education> (Last Accessed: 24.11.2024).
36. The Decision-Making Practices among Air Traffic Controllers during Conflict Resolution in Aviation Industry. URL: https://www.researchgate.net/publication/354841651_The_Decision-

Making_Practices_among_Air_Traffic_Controllers_during_Conflict_Resolution_in_Aviation_Industry_A_Case_Study (Last Accessed: 24.11.2024).

37. ICAO STANDARD PHRASEOLOGY. URL: <https://www.icao.int/Meetings/AMC/MA/2002/2002namcarsamrwy/icaostateletteran13-48-1-2002-1-eng.pdf> (Last Accessed: 24.11.2024).

38. The importance of teamwork for air traffic controllers. URL: <https://www.aviationfile.com/ego-in-air-traffic-control-its-impact-on-teamwork-and-safety/> (Last Accessed: 24.11.2024).

39. How does stress affect the psychological state of air traffic controllers? URL: https://www.researchgate.net/publication/336874742_Effect_of_Fatigue_and_Stress_on_Air_Traffic_Control_Performance (Last Accessed: 25.11.2024).

40. Hartsfield-Jackson Atlanta International Airport amount of traffic. URL: <https://www.investclayton.com/atlanta-international-airport.php> (Last Accessed: 26.11.2024).

41. Manual on Air Traffic Controller Competency-based Training and Assessment. Doc 10056 AN/519. ICAO. URL: https://www.icao.int/SAM/Documents/2016-CBT/10056_draft_en.pdf (Last Accessed: 26.11.2024).

42. Behind the scenes - Inside the Control Tower LHR. Heathrow Airport. URL: <https://www.heathrow.com/heathrow-blog/behind-the-scenes-inside-the-control-tower> (Last Accessed: 27.11.2024).

43. LAX Airport conditions and real-time information. URL: <https://www.flylax.com/lax-airport-conditions> (Last Accessed: 28.11.2024).

44. NWS Chicago Center Weather Service Unit and ORD and MDV operations. URL: <https://www.weather.gov/zau> (Last Accessed: 29.11.2024).

45. Automation and Flight Path Management. EASA. URL: <https://www.easa.europa.eu/en/downloads/22639/en> (Last Accessed: 30.11.2024).

46. EUROCONTROL Guidelines for Short Term Conflict Alert. URL: <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2019-09/eurocontrol-guidelines-159-part-i-1.0.pdf> (Last Accessed: 01.12.2024).

47. Використання віртуальної реальності для навчання та розвитку професійних навичок. Київський національний університет культури і мистецтв : website. URL: <https://kzgizh.knukim.edu.ua/kafedra/novyny/2471-vykorystannya-virtualnoyi-realnosti-dlya-navchannya-ta-rozvytku-profesiynykh-navychok> (дата звернення: 01.12.2024).

48. Teamwork in Air Traffic Control. Skybrary : website. URL: <https://skybrary.aero/articles/teamwork-air-traffic-control> (Last Accessed: 01.12.2024).

49. Рішення для диспетчерських та ситуаційних центрів. AV-PRO. URL: <https://av-pro.com.ua/rishennia-dlia-dyspatcherskykh-ta-sytuatsiinykh-tsentriv/> (дата звернення: 01.12.2024).

50. Salden R., Paas F., Van Merriënboer J. J. G. Personalised Adaptive Task Selection in Air Traffic Control: Effects on Training Efficiency and Transfer. *Learning and Instruction*. Vol. 16. 2006. P. 350-362. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2006.07.007>.

51. Meeuwen L., Brand-Gruwel S., Kirschner P., Bock J., Oprins E., Van M., Jeroen J. G. Self-Directed Learning in Adaptive Training Systems: A Plea for Shared Control. *Technology, Instruction, Cognition and Learning*. Vol. 9. 2013. P. 193-215.

52. Cosic K., Šarlija M., Ivkovic V., Zhang Q., Strangman G., Popovic S. Stress Resilience Assessment Based on Physiological Features in Selection of Air Traffic Controllers. *IEEE Access*. 2019. 19 p. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2907479>.

53. Chittaro L., Buttussi F. Assessing Knowledge Retention of an Immersive Serious Game vs. a Traditional Education Method in Aviation Safety. *Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions on*. Vol. 21. 2015. P. 529-538. DOI: <https://doi.org/10.1109/TVCG.2015.2391853>.

54. Cunningham D., Kelly C., Goillau P., Boardman M. The Development of Teamwork Measures in ATM Systems. 2001. URL: https://www.researchgate.net/publication/341755775_The_Development_of_Teamwork_Measures_in_ATM_Systems (Last Accessed: 06.12.2024).

55. ATC Training. EASA : website. URL: <https://www.easa.europa.eu/en/domains/air-traffic-management> (Last Accessed: 06.12.2024).

56. EUROCONTROL inspiring the next aviation generation. URL: <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2024-03/eurocontrol-skyway-79-spring2024.pdf> (Last Accessed: 07.12.2024).

57. Aviation Safety Reporting System: Air Traffic Controller Reports. NASA : website. URL: <https://www.nasa.gov/> (Last Accessed: 08.12.2024).

58. Serving a world in motion. NAVCANADA. URL: <https://www.navcanada.ca/en/> (Last Accessed: 09.12.2024).

59. Rinaldi R., Soeadyfa D., Utomo W. Effective Air Traffic Control Learning: New Approaches and Innovative Methods. *Formosa Journal of Applied Sciences*. Vol. 3. 2024. P. 4025-4044. DOI: <https://doi.org/10.55927/fjas.v3i10.11131>.

60. Disaster Over Germany: The Story Of The Überlingen Mid-Air Collision. Simple Flying : website. URL: <https://simpleflying.com/uberlingen-mid-air-collision-20-years> (Last Accessed: 11.12.2024).

61. Explained: Traffic Alert and Collision Avoidance System TCAS RA priority over ATC. Airways Magazine : website. URL: <https://www.airwaysmag.com/new-post/traffic-alert-collision-avoidance-system> (Last Accessed: 11.12.2024).

62. Tenerife airline disaster aviation disaster, Tenerife, Canary Islands [1977]. Britannica : website. URL: <https://www.britannica.com/event/Tenerife-airline-disaster> (Last Accessed: 13.12.2024).

63. Distractions, multitasking, miscommunication led to 2023 near-collision at JFK Airport: NTSB. ABC7 Chicago : website. URL:

<https://abc7chicago.com/post/jfk-airport-close-call-distractions-multitasking-miscommunication-led/14913339/> (Last Accessed: 14.12.2024).

64. United Airlines Flight 232 aviation disaster, Sioux City, Iowa, United States [1989]. Britannica : website. URL: <https://www.britannica.com/event/United-Airlines-Flight-232> (Last Accessed: 15.12.2024).