

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Чорноморський національний університет
імені Петра Могили
Факультет комп'ютерних наук
Кафедра інтелектуальних інформаційних систем

ДОПУЩЕНО ДО ЗАХИСТУ

В.о. завідувача кафедри інтелектуальних
інформаційних систем, канд. техн. наук,
доц.

_____ Є. В. Сіденко
«_____» _____ 202_ р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА ДЛЯ РОЗШИРЕННЯ
МЕРЕЖІ АВІАЦІЙНИХ МАРШРУТІВ

Спеціальність 122 «Комп'ютерні науки»

122 – МКР – 601.22150101

Виконав студент 6-го курсу, групи 601

_____ *Є. А. Сімаков*
«16» лютого 2023 р.

Керівник: канд. техн. наук, доцент

_____ *О. В. Козлов*
«16» лютого 2023 р.

Чорноморський національний університет ім. Петра Могили
Факультет комп'ютерних наук
Кафедра інтелектуальних інформаційних систем

Освітньо-кваліфікаційний рівень **магістр**

Галузь знань **12 «Інформаційні технології»**

(шифр і назва)

Спеціальність **122 «Комп'ютерні науки»**

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри інтелектуальних
інформаційних систем, канд. техн. наук,
доц.

_____ Є. В. Сіденко

« » _____ **20** р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську кваліфікаційну роботу

Сімакову Єгору Андрійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема магістерської кваліфікаційної роботи «Інтелектуальна система для розширення мережі авіаційних маршрутів».

Керівник роботи Козлов Олексій Валерійович, канд. техн. наук, доцент.

Затв. наказом Ректора ЧНУ ім. Петра Могили від «03» листопада 2022 р. № 199

2. Строк подання студентом роботи 16 лютого 2023 р.

3. Вхідні (початкові) дані до роботи: експертні оцінки поточного стану авіаційної галузі, методи і технології прогнозування майбутнього стану за визначеними критеріями; пріоритетність критеріїв. Очікуваний результат: інтелектуальна система для розширення мережі авіаційних маршрутів.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розглянути):

– аналіз існуючого стану авіаційної галузі, пошук відповідних матеріалів та публікацій;

– огляд існуючих моделей, які існують в галузі, що розглядається, моделювання сценаріїв та альтернативних рішень;

– визначення методів і засобів для створення інтелектуальної системи для прогнозування;

– аналіз результатів застосування обраних методів для розв’язання поставленої задачі.

5. Перелік графічного матеріалу: презентація.

6. Завдання до спеціальної частини: аналіз вимог до умов праці, заходи з техніки безпеки та цивільний захист під час роботи у випадку настання надзвичайних ситуацій.

7. Консультанти:

| Розділ | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис |
|------------------------------------|--|--------|
| Спеціальна частина з охорони праці | д-р. біол. наук., професор Григор’єва Л.І. | |
| Методична частина | канд. техн. наук, доцент Козлов О. В. | |

Керівник роботи канд. техн. наук, доцент Козлов О. В.
(наук. ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Завдання прийнято до виконання Сімаков Є. А.
(прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Дата видачі завдання « 07 » листопада 2022 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Виконання магістерської кваліфікаційної роботи

Тема: Інтелектуальна система для розширення мережі авіаційних маршрутів

| № | Найменування роботи | Початок | Закінчення | Примітки |
|----|--|------------|------------|----------|
| 1 | Визначення керівника і теми МКР. Подання заяви на затвердження теми МКР | 01.09.2022 | 20.10.2022 | Виконано |
| 2 | Отримання завдання на виконання МКР | 21.10.2022 | 10.11.2022 | Виконано |
| 3 | Складання календарного плану на період виконання МКР | 11.11.2022 | 15.11.2022 | Виконано |
| 4 | Огляд літератури за темою дослідження | 16.11.2022 | 27.11.2022 | Виконано |
| 5 | Проходження переддипломної практики, збір та аналіз матеріалів до МКР | 28.11.2022 | 18.12.2022 | Виконано |
| 6 | Аналіз предметної області та розробка технічного завдання. Моделювання результатів | 19.12.2022 | 12.01.2023 | Виконано |
| 7 | Опис фахової частини МКР, зокрема дослідження публікацій щодо поточного стану авіаційної галузі, огляд існуючих інтелектуальних систем для вирішення поставленої задачі, реалізація обраних технологій для створення інтелектуальної системи для розширення мережі авіаційних маршрутів з аналізом отриманих результатів | 13.01.2023 | 25.01.2023 | Виконано |
| 8 | Розробка спеціальної частини з охорони праці та методичної частини | 26.01.2023 | 02.02.2023 | Виконано |
| 9 | Попередній захист МКР на засіданні комісії кафедри | 03.02.2023 | 03.02.2023 | Виконано |
| 10 | Корегування роботи за результатами попереднього захисту | 04.02.2023 | 06.02.2023 | Виконано |
| 11 | Остаточне оформлення пояснювальної записки та слайдів доповіді для захисту | 07.02.2023 | 09.02.2023 | Виконано |
| 12 | Подання МКР рецензенту | 09.02.2023 | 10.02.2023 | Виконано |
| 13 | Рецензування МКР | 11.02.2023 | 12.02.2023 | Виконано |
| 14 | Подання МКР, її електронної копії та інших документів (відгуку, рецензії) до захисту | 15.02.2023 | 16.02.2023 | Виконано |
| 15 | Захист МКР перед екзаменаційною комісією (ЕК) | 22.02.2023 | 23.02.2023 | |

Розробив студент Сімаков Є.А. _____
(прізвище та ініціали) (підпис)

Керівник роботи канд. техн. наук, доцент Козлов О. В. _____
(наук. ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

«12» листопада 2022 р.

АНОТАЦІЯ

до магістерської кваліфікаційної роботи
студента групи 601 ЧНУ ім. Петра Могили

Сімакова Єгора Андрійовича

на тему: **“ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА ДЛЯ РОЗШИРЕННЯ
МЕРЕЖІ АВІАЦІЙНИХ МАРШРУТІВ”**

Актуальність даного дослідження полягає у необхідності підвищення ефективності прогнозування рентабельності авіаційних маршрутів, розробці програмного забезпечення з використанням методів прогнозування на основі наявних даних для вирішення відповідної задачі. Це дозволить визначити динаміку попиту клієнтів на обрані маршрути і зробити відповідні висновки щодо подальшої діяльності.

Об’єктом дослідження є процеси супроводження авіаційних перевезень пасажирів та маршрутизації.

Предметом дослідження є методи, моделі та засоби для аналізу і прогнозування попиту на авіаційні перевезення.

Метою дослідження є підвищення ефективності розширення мережі авіаційних маршрутів за рахунок створення інтелектуальної системи для прогнозування динаміки попиту на рейси між аеропортами.

В результаті виконання роботи було досліджено модель глибокого навчання (рекурентна нейронна мережа), визначено основні її переваги та недоліки, а також розроблено програмне забезпечення, в якому реалізовано відповідний метод.

Дана робота складається з шести розділів. Кожен розділ відповідно присвячений: аналізу досліджень і публікацій, розгляду існуючих моделей, моделюванню сценаріїв і альтернативних рішень, програмній реалізації та тестуванню, методичній частині магістерської роботи, охороні праці. Загальний обсяг роботи – 112 сторінок. Магістерська кваліфікаційна робота містить один додаток, 44 рисунки, 12 таблиць і посилання на 50 літературних джерел.

Ключові слова: прогнозування тренду попиту, авіаційний маршрут, інтелектуальна система, глибоке навчання, рекурентна нейронна мережа.

ABSTRACT

to the master's qualification work by the student of the group 601 of Petro Mohyla
Black Sea National University

Simakov Yehor

“INTELLIGENT SYSTEM FOR EXPANDING THE NETWORK OF AVIATION ROUTES”

A relevance of this study lies in the need to increase the effectiveness of forecasting the profitability of aviation routes, developing software using forecasting methods based on available data to solve the relevant problem. This will make possible to determine the dynamics of customer demand for the selected routes and draw appropriate conclusions regarding further activities.

An object of the research is the processes of accompanying air transportation of passengers and routing.

A subject of the research are methods, models and tools for analyzing and forecasting the demand for air transportation.

A purpose of the study is to increase the effectiveness of expanding the network of aviation routes by creating an intelligent system for forecasting the dynamics of demand for flights between airports.

As a result of the work, the model of deep learning (recurrent neural network) was investigated, its main advantages and disadvantages were determined, and software was developed, which implements the corresponding method.

This work consists of six sections. Each section is respectively dedicated to: analysis of research and publications, consideration of existing models, modeling of scenarios and alternative solutions, program implementation and testing, methodological part of the master's work, labor protection and life safety.

The total volume of work is 112 pages. Thesis contains one appendix, 44 figures, 12 tables and references to 50 literary sources in it.

Key words: demand trend forecasting, flight route, intelligent system, deep learning, recurrent neural network.

ЗМІСТ

| | |
|--|----|
| ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ | 3 |
| ВСТУП | 5 |
| 1 АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ | 7 |
| 1.1 Основні моменти прогнозу попиту на авіаційні перевезення | 7 |
| 1.2 Огляд поточної ситуації в авіаційній галузі | 13 |
| 1.3 Поточне економічне середовище в світі | 16 |
| Висновки до розділу 1 | 19 |
| 2 РОЗГЛЯД ІСНУЮЧИХ МОДЕЛЕЙ | 20 |
| 2.1 Внутрішній ринок авіакомпаній США | 20 |
| 2.2 Міжнародний ринок | 26 |
| 2.3 Загальна система прогнозу попиту на авіаперевезення | 35 |
| 2.4 Вантажні перевезення | 37 |
| Висновки до розділу 2 | 40 |
| 3 МОДЕЛЮВАННЯ СЦЕНАРІЇВ І АЛЬТЕРНАТИВНИХ РІШЕНЬ | 41 |
| 3.1 Прогноз попиту за сценарієм припущення | 41 |
| 3.2 Альтернативні прогнози | 46 |
| Висновки до розділу 3 | 50 |
| 4 РОЗРОБКА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ РОЗШИРЕННЯ МЕРЕЖІ АВІАЦІЙНИХ МАРШРУТІВ | 52 |
| 4.1 Постановка задачі | 52 |
| 4.2 Вибір засобів розробки інтелектуальної системи | 57 |
| 4.3 Програмна реалізація інтелектуальної системи | 62 |
| 4.4 Тестування програми | 64 |
| Висновки до розділу 4 | 74 |
| ВИСНОВКИ | 76 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ | 78 |

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

| | |
|------|--|
| ВВП | – Внутрішній валовий продукт |
| ІСЦ | – Індекс споживчих цін |
| ASM | – Милі доступного місця (available seat miles) |
| BTS | – Бюро Транспортної Статистики (Bureau of Transportation Statistics) |
| FAA | – Федеральне Управління Авіації (Federal Aviation Administration) |
| GA | – Авіація загального призначення (general aviation) |
| LCC | – Бюджетні перевізники (low cost carriers) |
| LSTM | – long-short term memory |
| PCE | – Реальні споживчі витрати (personal consumption expenditure) |
| RNN | – Рекурентна нейронна мережа (recurrent neural network) |
| RPM | – Прибуткові (дохідні) пасажирські милі (revenue passenger miles) |
| RTM | – Прибуткові (дохідні) вантажні милі (revenue ton miles) |

Пояснювальна записка

до магістерської кваліфікаційної роботи

на тему:

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА ДЛЯ РОЗШИРЕННЯ МЕРЕЖІ АВІАЦІЙНИХ МАРШРУТІВ

Спеціальність 122 «Комп'ютерні науки»

122 – МКР – 601.22150101

Виконав студент 6-го курсу, групи 601

Є.А. Сімаков

(підпис, ініціали та прізвище)

«__» _____ 2023 р.

Керівник: канд. техн. наук, доцент

(наук. ступінь, вчене звання)

О.В. Козлов

(підпис, ініціали та прізвище)

«__» _____ 2023 р.

ВСТУП

Компанії, які працюють в авіаційній галузі, існують в конкурентних умовах, тому прагнуть залучити якнайбільше клієнтів задля надання їм своїх послуг. Потенційних пасажирів приваблюють якісні сервіси за прийнятними цінами, найважливішими з яких є наявність рейсів в пункти, що цікавлять клієнтів, зручність графіків відправлення / прибуття рейсів і пунктуальність в їх дотриманні. Одна з проблем, що постає перед перевізниками – це те, що різні маршрути є по-різному привабливими для клієнтів.

Аеропорти та авіакомпанії з певною періодичністю публікують звіти своєї діяльності. Одним з показників, які фігурують в їхніх звітах є кількість клієнтів, які скористалися їх послугами. В більшості випадків дана звітність публікується у відкритому доступі. Цей показник напряму впливає на прибутковість аеропортів і авіакомпаній, оскільки існує пряма залежність між кількістю пасажирів і прибутком компаній, що надають їм послуги.

Як правило, попит пасажирів авіакомпаній – це змінна величина, що має періоди зростання чи спадання. Тривалості трендів зростання і спадання можуть відрізнятися. Своє місце мають і сезонні коливання попиту. Тому, актуальним є проведення дослідження попиту пасажирів і трендів на їх змінення, аналізу різних чинників, що впливають на ці зміни, а також створення інтелектуальної системи для прогнозування подальшого тренду попиту на основі рекурентної нейронної мережі.

Метою дослідження є підвищення ефективності розширення мережі авіаційних маршрутів за рахунок створення інтелектуальної системи для прогнозування динаміки попиту на рейси між аеропортами.

Об'єктом дослідження є процеси супроводження авіаційних перевезень пасажирів та маршрутизації.

Предметом дослідження є методи, моделі та засоби для аналізу і прогнозування попиту на авіаційні перевезення.

Для досягнення встановленої мети необхідно виконати наступні завдання:

- дослідити особливості діяльності авіаційної галузі на різних ринках при різних економічних умовах;
- провести аналіз та узагальнення існуючих моделей та підходів, що використовуються для розширення мережі авіаційних маршрутів;
- провести моделювання різних сценаріїв впровадження нових маршрутів в авіаційній галузі;
- розробити інтелектуальну систему для розширення мережі авіаційних маршрутів на базі рекурентної нейронної мережі;
- провести дослідження ефективності інтелектуальної системи для розширення мережі авіаційних маршрутів.

Практична значимість виконаних досліджень полягає в створенні прогнозів майбутнього попиту на обрані напрямки для визначення їх майбутньої прибутковості та перспективності.

Апробація результатів дослідження. Основні положення магістерської кваліфікаційної роботи, зокрема інтелектуальна система для розширення мережі авіаційних маршрутів, викладені в матеріалах Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених, аспірантів і студентів «Інформаційні технології та інженерія», підсекція «Машинне навчання та штучний інтелект» (2023 р., ЧНУ ім. Петра Могили, м. Миколаїв).

1 АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

1.1 Основні моменти прогнозу попиту на авіаційні перевезення

Російське вторгнення в Україну та подальша війна у 2022 році відбулися після підготовки цього прогнозу, тому він не відображає можливі наслідки цих подій. Однак ці наслідки вже відчуваються і можуть значно погіршитися залежно від масштабів, гостроти та тривалості війни. Вже зараз рейси, які зазвичай перетинають повітряний простір Росії та України, змінюють маршрути, що призводить до довшого часу польоту та збільшення витрат на паливо та екіпаж. Далі ціни на паливо різко зросли, оскільки деякі країни припинили імпорт нафти з Росії, головного світового постачальника. Більш високі витрати на енергоносії для споживачів можуть поєднуватися з вищими цінами на продовольство, оскільки інші види експорту, наприклад пшениці та добрив з регіону, також скорочуються. Більш високі витрати на паливо можуть бути перекладені на споживачів у вигляді вищих цін на квитки, таким чином безпосередньо стримуючи попит на авіаперельоти, але вищі ціни як на їжу, так і на паливо також розтягують гаманці споживачів, зменшуючи кількість подорожей на власний розсуд. Нарешті, залежно від прогресу війни, довіра споживачів може слабшати, посилюючи обережність і фінансовий консерватизм [1, с. 1].

Після дерегуляції в 1978 році промисловість комерційних авіаперевізників США характеризувалася циклами від піднесення до спаду. Багато хто вважав, що мінливість, пов'язана з цими циклами, є структурною особливістю капіталомісткої галузі, але бідної. Однак велика рецесія 2007-09 років ознаменувала фундаментальну зміну в діяльності та фінансах американських авіакомпаній. Після закінчення рецесії в 2009 році американські авіакомпанії оновили свої бізнес-моделі, щоб мінімізувати збитки, знизивши експлуатаційні витрати, скасувавши нерентабельні маршрути та приземливши старі, менш економічні літаки. Щоб збільшити

операційні доходи, перевізники запровадили нові послуги, які клієнти були готові придбати, і почали стягувати окрему плату за послуги, які раніше були включені у вартість квитка. Галузь пережила безпрецедентний період консолідації з трьома великими злиттями за п'ять років. Результати цих зусиль були вражаючими: 2019 рік став одинадцятим роком прибутковості авіаційної галузі США [1, с. 1].

Однак спалах пандемії COVID-19 у 2020 році приніс швидкий і катастрофічний кінець тим рокам буму. Діяльність і прибутковість авіакомпаній впали майже миттєво, і без фінансової та конкурентної сили, накопиченої під час буму, авіакомпанії зіткнулися б із ще більшими проблемами. Втім, вони змогли скоротити потужності та витрати, а потім, покладаючись на свої баланси, кредитні рейтинги та вартість, притаманну їхнім брендам, залучити капітал шляхом запозичень та реструктуризації автопарків, що дозволило їм витримати період збитків. Хоча кілька невеликих регіональних перевізників припинили роботу в 2020 році, жоден магістральний перевізник цього не зробив. Вантажні перевезення були одним з небагатьох яскравих видів діяльності, коли вони різко зросли, підштовхнувши споживачів, які купували товари, щоб з користю витратити час, проведений вдома через пандемію, а також через перебої в наземному транспорті, спричинені нестачею працівників через захворювання на COVID-19 [1, с. 1].

До середини 2021 року умови та перспективи значно покращилися. З приходом весни, створенням вакцин і скасуванням деяких місцевих обмежень подорожі на відпочинок почали відновлюватися. Улюблені напрямки залишаються зосередженими в місцях відпочинку на відкритому повітрі, як на пляжі, так і в горах, і в деяких зафіксовано рівень трафіку вище, ніж у 2019 році. Поява штамів COVID-19 у другій половині року призупинила відновлення, але загалом не звернула його назад. Було створено два нових лоукостера та відроджено одного регіонального перевізника, який припинив

роботу у 2020 році. До третього кварталу прибутковість галузі наближалася до точки беззбитковості [1, с. 1-2].

Зміни в бізнесі, яких вимагав спад, формуватимуть галузь протягом багатьох років, ще довго після завершення відновлення. Насамперед, авіакомпанії будуть меншими, маючи виведені з експлуатації літаки та заохочуючи добровільне звільнення працівників. Однак авіапарки стають молодшими та паливноефективними, оскільки виведення з експлуатації спрямоване на найстаріші та найменш ефективні літаки. Оскільки авіакомпанії мають високі борги, капітальні витрати та інвестиції будуть обмежені, що, у свою чергу, стримує майбутнє зростання. І навіть відокремлення послуг зробило невеликий крок назад, оскільки перевізники скасували комісію за заміну всіх квитків, крім базового економ-класу [1, с. 2].

У середньостроковій перспективі авіакомпанії будуть зосереджені на тому, щоб передбачити відновлення попиту та позиціонуватись відповідно до нього. На сьогоднішній день це відновлення попиту було надзвичайно нерівномірним між ринками та сегментами населення, що було зумовлено кількістю випадків COVID-19, вакцинацією, урядовими обмеженнями та ступенем відкладеного попиту, який відчувають споживачі та компанії. У той час як внутрішні туристичні перевезення сприяють відновленню, очікувалося, що внутрішні ділові подорожі наберуть обертів у 2022 році. Міжнародна діяльність зазвичай відстає від внутрішньої, оскільки досвід пандемії в окремих країнах дуже різний і мінливий [1, с. 2].

У довгостроковій перспективі сильні сторони та можливості, набуті протягом останнього десятиліття, знову стануть очевидними. Є впевненість, що американські авіакомпанії нарешті перетворилися з капіталомісткої, високоциклічної галузі на галузь, яка може генерувати надійну віддачу від капіталу та стійкі прибутки [1, с. 2].

По суті, у довгостроковій перспективі попит на авіаційну продукцію визначається економічною діяльністю, а зростання економіки США та світу створює основу для зростання авіації. Прогноз FAA на 2022 рік передбачає

зростання кількості внутрішніх пасажирських перевізників США протягом наступних 20 років у середньому на 4,7 відсотка на рік. Однак це середнє значення включає двозначні роки зростання в 2022 і 2023 роках, оскільки активність піднімається з дуже низької бази. Після періоду відновлення тенденція ставок відновлюється із середнім зростанням до кінця прогнозу на 2,6 відсотка. Очікується, що в 2023 році кількість внутрішніх пасажирів на щорічній основі повернеться до рівня 2019 року. Ціни на нафту становили в середньому 55 доларів США за барель протягом п'яти років, що закінчилися 2021 року, але, за прогнозами, зростуть до 75 доларів США за барель у 2022 році (знову ж таки, як прогнозувалося до війни в Україні), перш ніж стабільно зрости до 87 доларів США до кінця прогнозованого періоду [1, с. 2].

Подібно до того, як економічна діяльність США стимулює внутрішній попит на повітряний транспорт, зовнішньоекономічна діяльність впливає на попит на міжнародні подорожі. І оскільки практично всі країни вжили заходів для стримування COVID 19, ці дії призвели до економічних моделей, подібних до тих, що були в США, з різким падінням у 2020 році з подальшим сильним підйомом, який почався в 2021 році. Різниця в економічних показниках між країнами залежить від їх відносної сили на початку пандемії, але також залежить від серйозності їхнього досвіду перенесення COVID-19, а також від жорсткості їхніх відповідей. У 2020 році в Європі спостерігався різкий економічний спад, який узгоджувався з відносно високим рівнем зараження та численними блокуваннями, які перевищили низький рівень базового економічного зростання. З іншого боку, у багатьох азіатських країнах спостерігався лише незначний спад, оскільки вони вживали швидких і рішучих заходів для контролю над вірусом на початку пандемії, але також почали рік із відносно потужного економічного зростання. У більшості країн темпи економічного зростання повертаються до своїх довгострокових тенденцій приблизно у 2023 році [1, с. 2-3].

Прогнозується, що системний трафік у прибуткових пасажирських мільях (RPM) зростатиме на 5,7 відсотка на рік між 2022 і 2042 роками.

Очікується, що внутрішній RPM зростатиме на 4,8 відсотка на рік, тоді як міжнародний RPM зростатиме значно швидше на 8,8 відсотка на рік, головним чином через різке падіння у 2020 та 2021 роках, у результаті якого RPM склав лише 31 відсоток від рівня 2019 року – приблизно вдвічі менше, ніж у внутрішньому RPM. Таким чином, ці показники підвищуються кількома роками високих темпів зростання під час відновлення, після чого річні темпи повертаються до більш поміркованих довгострокових трендів. Високі темпи зростання повертають RPM системи на щорічній основі до рівня 2019 року в 2024 році, причому внутрішні RPM повертаються роком раніше, а міжнародні RPM також відновлюються в 2024 році. Прогнозується, що ємність системи, виміряна мільярдами доступного місця (ASM), зросте дещо повільніше, ніж RPM протягом періоду відновлення, оскільки авіакомпанії прагнуть відновити коефіцієнти завантаження, але згодом ASM зростає відповідно до зростання попиту [1, с. 3].

FAA очікує, що прибутковість перевізників США залишатиметься під тиском протягом кількох років через нижчий попит і тиск конкурентних тарифів. Коли перевізники повертаються до рівня пропускну здатності, що відповідає їхнім постійним витратам, позбавляються зайвої заборгованості та стабілізуються доходи, стабільна прибутковість має повернутися. У довгостроковій перспективі ми бачимо конкурентоспроможну та прибуткову авіаційну галузь, яка характеризується зростаючим попитом на авіаперельоти та зростанням цін на авіаквитки повільніше, ніж загальна інфляція, що відображає зростання економіки США та світу [1, с. 3].

Сектор авіації загального призначення (GA) менше постраждав від кризи COVID-19, ніж авіакомпанії. Приватна авіація продовжує приваблювати тих, хто може її собі дозволити, поки триває пандемія. У нижньому сегменті галузі серед новачків у приватних польотах були студенти, приватні та комерційні пілоти, які приєдналися до існуючої популяції пілотів GA. Таким чином, довгострокова перспектива для авіації загального призначення є багатообіцяючою, оскільки зростання у вищому класі компенсує продовження

виходу на пенсію в традиційному низькому класі, переважно у секторі з поршневиими двигунами. Прогнозується, що активний флот GA збільшиться лише на 0,1 відсотка між 2022 і 2042 роками після невеликого збільшення на 0,1 відсотка в 2021 році порівняно з попереднім роком і практично не зміниться порівняно з рівнем 2019 року. Парк турбінних літаків, включаючи вертольоти, не зазнав спаду між 2019 і 2020 роками, і, за оцінками, дещо збільшився між 2020 і 2021 роками; тоді як загальний парк поршневих двигунів (одномоторні та багатомоторні поршневі, легкі спортивні літаки та поршневі гвинтокрили) скоротився на 3,8 відсотка між 2019 та 2020 роками та, за оцінками, знизився на 0,6 відсотка у 2021 році порівняно з попереднім роком. У той час як постійне зростання як ВВП, так і корпоративних прибутків призводить до постійного зростання парку турбін і гвинтокрилів, найбільший сегмент парку – літаки з фіксованим крилом і поршнем продовжить скорочуватися протягом прогнозованого періоду, просто щоб компенсувати зростання парку турбін. Незважаючи на незначне зростання активного флоту GA між 2020 і 2042 роками, прогнозується, що кількість годин нальоту GA збільшиться на 31,4 відсотка з 2020 до 2042 року (в середньому на 1,2 відсотка на рік), оскільки зростання турбінних, гвинтокрилих і експериментальних годин більше, ніж компенсує зниження поршневих годин з нерухомим крилом. Якщо порівняти період з 2022 по 2042 роки, прогнозується, що загальна кількість годин, налітаних літаком GA, зросте в середньому на 1,0 відсотка на рік після зниження на 12,0 відсотків між 2019 і 2020 роками та часткового відновлення зі зростанням на 4,0 відсотки у 2021 році порівняно з попереднім роком [1, с. 3-4].

З огляду на очікуване значне зростання попиту на авіаперельоти між 2022 і 2026 роками через відновлення економіки США після наслідків COVID, очікується посилене зростання активності, яке потенційно може збільшити навантаження на диспетчерів. Прогнозується, що протягом прогнозованого періоду (2022 – 42 фінансові роки) обсяг операцій FAA та контрактних веж зростатиме на 1,5 відсотка на рік, а комерційна діяльність зростатиме

приблизно в п'ять разів швидше, ніж некомерційна (загальна авіація та військова діяльність). Основною рушійною силою є відновлення діяльності авіакомпаній США після спаду COVID-19. Сектор комерційної авіації США постраждав від пандемії набагато сильніше, ніж некомерційний сектор. Очікується, що відкладений попит поверне комерційні операції до рівня до COVID-19 до 2023 року, що призведе до більшого зростання в комерційному секторі. Зокрема, великі та середні хаби зростатимуть набагато швидше, ніж малі та нехабові аеропорти, головним чином через комерційний характер їх діяльності [1, с. 4].

1.2 Огляд поточної ситуації в авіаційній галузі

Хоча умови у 2021 році залишалися похмурими, відбулося певне покращення порівняно з попереднім роком, оскільки хвилювання та невизначеність, пов'язані з COVID-19, почали зменшуватися. Підприємства почали відкриватися, зростання зайнятості стабілізувалося, а споживчі витрати відновилися за підтримки фіскального та монетарного стимулювання. Пасажирські авіаперевезення пошвидко вийшли, вантажні повітряні перевезення зросли, а кількість вишок збільшилася як для авіаперевізників, так і для авіації загального призначення. У 2021 році активність безпілотних літальних апаратів помітно зросла, а комерційні космічні запуски різко зросли, причому у 2020 році обидва вони розширилися [1, с. 5].

Комерційна авіація США розпочала рік на задньому плані, але впродовж року спостерігала серйозний рух по шляху відновлення, тоді як COVID-19 залишався обмежуючим фактором. Пропускна здатність контрольно-пропускних пунктів TSA знизилася до кінця минулого року, але на початку 2021 року покращилася лише до приблизно 40 відсотків від рівня 2019 року. Однак із запровадженням щеплень навесні пропускна здатність стабільно зросла приблизно до 80 відсотків від рівня середини літа 2019 року. Потім поява штамів COVID-19 (Дельта наприкінці літа та Омикрон в останні тижні

року) завадила подальшому відновленню, і пропускна спроможність призвела до кінця року приблизно на тому місці, де вона була влітку. Основним джерелом попиту протягом року були мандрівники, які подорожували як усередині країни, так і на короткі міжнародні напрямки, насамперед у Латинському регіоні. У бізнес-сегменті активність зросла, хоча й не такою мірою, як у сегменті дозвілля, оскільки багато співробітників залишалися працювати вдома, а зустрічі, конференції та тренінги проводилися віртуально або взагалі не проводилися [1, с. 5].

Авіакомпанії агресивно відреагували на ці зміни попиту, намагаючись узгодити пропускну здатність зі змінами в термінах, ринках і сегментах. За даними Бюро транспортної статистики (BTS), зайнятість в авіакомпаніях зросла за десять місяців року до середнього збільшення на 3000 робочих місць на місяць. Наприкінці року кількість зайнятих була на 40 000 вищою, ніж у 2020 році, хоча вона залишалася на 19 000 нижчою, ніж у 2019 році. Авіакомпанії збільшили кількість персоналу, щоб вони могли пропонувати більше рейсів у більшу кількість і загалом менших напрямків, оскільки туристи прагнули уникнути пандемічних обмежень. Авіакомпанії допомогли збільшити пропускну спроможність для доступу на природу, зокрема на пляжі на півдні та в гори на заході. Міжнародні напрямки в Латинському регіоні також демонстрували особливу активність, доступні милі місць (ASM) у четвертому кварталі перевищили показники 2019 року [1, 2].

Згідно з показниками пропускну здатності TSA, попит на авіаперельоти у 2021 році почав відновлюватися. У 2021 фінансовому році системний трафік, вимірний доходом від пасажирських миль (RPM), зріс на 3,3 відсотка порівняно з попереднім роком, тоді як кількість розміщень систем зросла на 9,0 відсотків. Внутрішні оберти на хвилину вирости на 13,1 відсотка, тоді як посадка зросла на 9,7 відсотка. Міжнародні RPM, однак, впали на 28,8 відсотка, хоча обсяги перевезень зросли на 1,4 відсотка, що є наслідком завантаженості короткомагістральних ринків Латинської Америки.

Коефіцієнт загальносистемного завантаження склав 68,5 відсотка, що на відсотковий пункт нижче рівня 2020 фінансового року [1, 2].

Номінальна прибутковість системи знову впала в 2021 році. На внутрішніх ринках усі перевізники, незалежно від того, націлені вони зазвичай на сегмент відпочинку чи ні, зосередилися на цьому чутливому до ціни сегменті, додаючи пропускну здатність і знижуючи тарифи, щоб залучити дохід. Результатом стало падіння номінальної дохідності на 12,9 відсотка. Проте міжнародний дохід знизився лише на 4,5 відсотка, оскільки попит був обмежений більше обмеженнями на подорожі, ніж ціною [1, с. 5-6].

Зі збільшенням активності протягом року покращились і фінансові результати. Дані за 2021 фінансовий рік показують, що звітні пасажирські перевізники мали сукупний операційний збиток у розмірі 26,1 мільярда доларів США порівняно із середнім прибутком за п'ять років, що закінчилися у 2019 фінансовому році, у розмірі 22,1 мільярда доларів США. Однак це приховує покращення протягом року, яке показує, що квартальні збитки поступово зменшуються та закінчують фінансовий рік із збитком менше 200 мільйонів доларів США – набагато краще, ніж середній збиток у 10 мільярдів доларів США за попередні шість кварталів [1, 2].

Авіаційна галузь загального призначення частково оговталася після спаду в 2020 році зі збільшенням поставок літаків, вироблених у США, на 7,4 відсотка в 2021 році, причому поршневі дещо зросли на 0,5 відсотка (насправді поставки одномоторних поршневих літаків з нерухомим крилом зросли на 2,3 відсотка), а турбіни – на 16,6 відсотка. Глобальні рахунки зросли на 7,7 відсотка до 21,6 мільярда доларів США (все ще менше на 8,2 відсотка порівняно з рівнем 2019 року) [1, 2].

Загальна кількість операцій у 2021 році на FAA та контрактних вежах зросла на 7,4 відсотка порівняно з 2020 роком (зменшення на 10,5 відсотка порівняно з 2019 роком). Активність авіаперевізників зросла на 4,1 відсотка, у той час як операції аеротаксі зросли на 7,1 відсотка. Діяльність авіації загального призначення зросла на 9,1 відсотка, а військова діяльність зросла

на 6,8 відсотка. Активність у великих і середніх хабах зросла на 2,3 відсотка і 5,0 відсотка відповідно, тоді як у малих і нехабових аеропортах активність зросла на 8,8 відсотка в 2021 році порівняно з попереднім роком [1, 2].

1.3 Поточне економічне середовище в світі

У 2021 році світовий реальний ВВП різко зріс, оскільки країни почали оговтуватися від найгірших економічних наслідків COVID-19. Після падіння на 3,5 відсотка в 2020 році, ВВП зріс на 5,6 відсотка в 2021 році, темпи якого не спостерігалися з початку 1970-х років. Незважаючи на такі високі темпи зростання, очікується, що рівень ВВП не повернеться до рівня до пандемії приблизно до середини десятиліття. Відновленню сприяло широке фінансове стимулювання, доступність вакцин проти COVID-19 і відновлення споживчих витрат, які були скорочені в 2020 році. Очікується, що в 2022 і 2023 роках країни перенесуть увагу з боротьби з COVID-19 як з ендемічною хворобою, до фіскальних обмежень, до підвищення процентних ставок і до зниження інфляції, що сприятиме уповільненню зростання ВВП у наступні роки [1, с. 11].

У США зростання реального ВВП сповільнюється з 5,5 відсотка у 2021 році до 4,3 відсотка у 2022 році та 2,9 відсотка у 2023 році, оскільки наслідки заходів допомоги COVID-19 зникають, споживчі витрати нормалізуються та відсоткові ставки зростають. Порівняно зі США, зростання реального ВВП у Євросоні буде дещо повільнішим у найближчій та середньостроковій перспективі – 3,7 відсотка у 2022 році та 2,2 відсотка у 2023 році. Агресивні зусилля щодо скорочення дефіциту, високі витрати на енергоносії та збої в ланцюжку поставок – усе це гальмує зростання у короткостроковій перспективі, після чого продовжувалося уповільнення до темпу тренду області. В Японії відновлення було дещо сповільнено через суворі заходи контролю COVID-19 і збільшення кількості випадків у другій половині 2021 року, що призвело до зростання реальних темпів зростання ВВП у 2022 році,

а потім до спаду у 2023 році. Частина найближчих зусиль буде спрямована до збільшення експорту, особливо автомобілів, оскільки перебої в ланцюжках поставок зникають. Незважаючи на те, що зростання Китаю залишалося позитивним у 2020 році та підскочило до 8,1 відсотка у 2021 році, політика країни щодо нульового поширення COVID-19 стримує зростання у 2022 та 2023 роках до 5,5 відсотка, або трохи нижче трендового показника. Крім того, експорт сповільнюється, оскільки глобальні споживчі витрати зміщуються з товарів назад на послуги. Намагаючись підтримати зростання, уряд пом'якшує монетарну політику та збільшує інвестиції в інфраструктуру. Щодо інших великих ринків, що розвиваються, Бразилія забезпечила значні фіскальні стимули, що призвело до різкого зростання в 2021 році, але потім до різкого спаду в 2022 році, коли ці стимули було скасовано. Надалі стримуючи зростання, центральний банк Бразилії різко підвищив процентні ставки, намагаючись приборкати високу інфляцію в країні. З іншого боку, очікується, що енергетичний сектор, споживчі витрати та інвестиційна активність урівноважать цю стриманість. Хоча витрати Індії на стимулювання пандемії були відносно скромними, у середньостроковій перспективі її зростання підтримуватиметься сприятливими демографічними показниками, включаючи високі споживчі витрати внаслідок зростання середньо-дохідних домогосподарств (див. рис. 1.1) [1, 3].

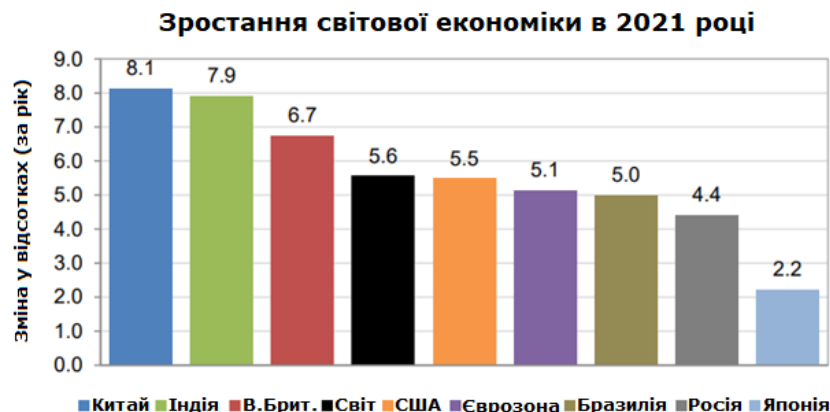


Рисунок 1.1 – Зростання світової економіки в 2021 році

IHS Markit прогнозує зростання світового реального ВВП на 2,8 відсотка на рік між 2022 і 2042 роками. Ринки, що розвиваються, на рівні 3,9 відсотка на рік, будуть зростати вище середнього світового показника, але нижчими темпами, ніж на початку 2000-х років. Очікується, що Азія (за винятком Японії), очолювана Індією та Китаєм, матиме найшвидше зростання, за нею йдуть Африка та Близький Схід, Латинська Америка та Східна Європа. Зростання в більш зрілих економіках (1,8 відсотка на рік) буде нижчим за світову тенденцію з найшвидшими темпами в США, за якими йде Європа. За прогнозами, зростання в Японії буде дуже повільним – 0,8 відсотка на рік, що відображає глибокі структурні проблеми, пов'язані зі скороченням і старінням населення [1, 3].

У 2021 році разом із відновленням світової економічної активності зріс попит на нафту, що призвело до зростання цін. Після падіння з приблизно 60 доларів за барель до 43 доларів у 2020 році ціна повернулася до 60 доларів і, за прогнозами, продовжить рости до 75 доларів у 2022 році. Однак цей прогноз знову ж таки не включає вплив російського вторгнення в Україну, яке, ймовірно, підштовхне ціни ще вище у 2022 році та далі. У довгостроковій перспективі IHS Markit очікує зростання ціни на нафту через зростання глобального попиту та підвищення вартості видобутку. IHS Markit прогнозує, що вартість придбання нафти для американських нафтопереробників зросте до 87 доларів за барель наприкінці прогнозного періоду (див. рис. 1.2) [1, с. 12].



Рисунок 1.2 – Вартість придбання нафти для американських переробників

Висновки до розділу 1

В даному розділі було проаналізовано основні моменти дослідження, проведеного Федеральним Управлінням Авіації США (Federal Aviation Administration, FAA). FAA розробило ряд припущень і прогнозів, які відповідають новим тенденціям і структурним змінам, що відбуваються в авіаційній галузі. Мета прогнозів — точно передбачити майбутній попит. FAA розробляє прогнози комерційної авіації та припущення на основі статистичних (економетричних) моделей, які пояснюють та включають нові тенденції для різних сегментів галузі.

В даному розділі було окремо приділено увагу впливу таких подій, як пандемія COVID-19 і війна в Україні, і проаналізовано негативні наслідки, які вони несуть із собою, в тому числі, для розглянутої галузі. Наведений прогноз попиту є актуальним на довгостроковий термін – 20 років, окремо приділено увагу поточній ситуації, з її особливостями і економічному середовищі в різних регіонах світу, що напряму впливає на авіаційну галузь і галузі, які з нею пов'язані.

Для досягнення встановленої мети необхідно виконати наступні завдання:

- дослідити особливості діяльності авіаційної галузі на різних ринках при різних економічних умовах;
- провести аналіз та узагальнення існуючих моделей та підходів, що використовуються для розширення мережі авіаційних маршрутів;
- провести моделювання різних сценаріїв впровадження нових маршрутів в авіаційній галузі;
- розробити інтелектуальну систему для розширення мережі авіаційних маршрутів на базі рекурентної нейронної мережі;
- провести дослідження ефективності інтелектуальної системи для розширення мережі авіаційних маршрутів.

2 РОЗГЛЯД ІСНУЮЧИХ МОДЕЛЕЙ

2.1 Внутрішній ринок авіакомпаній США

Магістральні та регіональні перевізники пропонують внутрішні та міжнародні пасажирські перевезення між США та зарубіжними напрямками, хоча міжнародні перевезення регіональних перевізників обмежуються прикордонними ринками Канади, Мексики та Карибського басейну [4].

У найближчі роки галузь комерційних авіаперевізників буде зосереджена на відновленні від руйнівних наслідків пандемії COVID-19. По-перше, оператори працюватимуть над визначенням і оцінкою попиту, коли він плавно повертається з мінімумів, досягнутих у 2020 році. Далі, у міру зростання коефіцієнтів навантаження, увага буде зміщена на повернення ємності в мережі обережним і обдуманим способом. Оскільки попит починає наближатися до рівня 2019 року, баланси зміцнюються, дозволяючи перевізникам приймати більш звичні довгострокові стратегії [4].

Непередбачуване середовище попиту, з яким стикалися перевізники протягом попередніх двох років, покращиться у 2022 році. Сприяті передбачуваності буде подальше скасування запобіжних заходів щодо COVID-19, відпрацювання відкладеного попиту та повернення співробітників в офіси, коли їм стане комфортніше знову подорожувати, і роботодавці знаходять способи задовольнити вимоги службового обслуговування. Все більш передбачувана діяльність дозволяє перевізникам повертати пропускну здатність до типових ринків і зменшувати залежність від суто рекреаційних напрямків. Коефіцієнти завантаження та коефіцієнти використання зростають, а також тарифи [4].

На останньому етапі відновлення активність наближається до рівня 2019 року, а умови в галузі починають нормалізуватися. Подорожі на відпочинок значною мірою повернулися до рівня до пандемії, а ділові поїздки невпинно наздоганяють згаяне. Перевізники залишаються з дещо обмеженими боргами,

які взяли, щоб пережити кризу, і відмовляються від деяких капіталовкладень на користь зміцнення своїх балансів [4].

Під час відновлення після пандемії виникли кілька тенденцій, які згодом більшою чи меншою мірою будуть змінені. Бюджетні перевізники, орієнтовані на туристів, отримали відносну перевагу в цьому сегменті. З іншого боку, різке скорочення ділових поїздок вплинуло на традиційних перевізників і тих, хто обслуговує ключові бізнес-ринки. І всі перевізники отримали поштовх завдяки низьким цінам на паливо, які частково були спричинені зниженням попиту на енергію в усьому світі [4].

Регіональні перевізники зазнали дуже схожих наслідків COVID-19, як і основна група. У 2021 році регіональні оператори забезпечили 11,6 відсотка внутрішньої пропускної спроможності, лише трохи збільшившись з 11,1 відсотка в 2019 році. Що стосується трафіку, регіональні оператори показали незначно кращі показники, ніж їхні магістральні аналоги, заявивши 11,3 відсотка RPM у 2021 році порівняно з 10,4 відсотками у 2019 році. Очікується, що відхилення у 2020 році будуть тимчасовими, оскільки режим подорожей і робота авіакомпаній починають відновлюватися до більш нормальних умов (див. рис. 2.1 – 2.2) [4].

Регіональний ринок продовжує відчувати тиск, оскільки регіональні оператори конкурують за ще менше контрактів із домінуючими перевізниками, що залишаються [4].

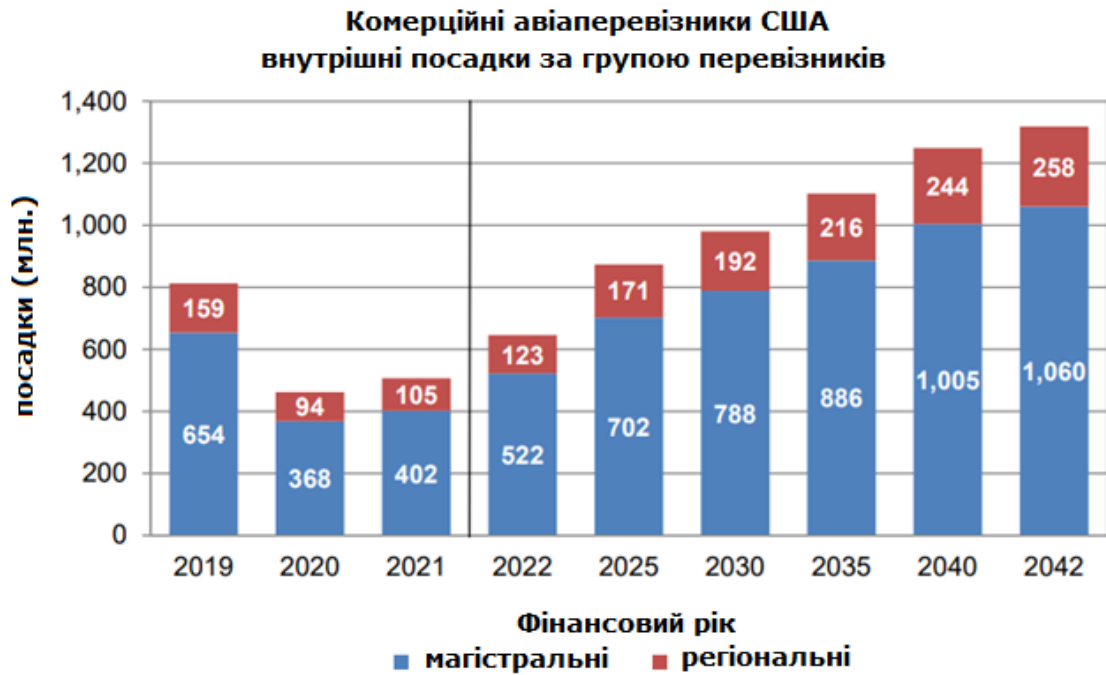


Рисунок 2.1 – Кількість посадок літаків на внутрішньому ринку США

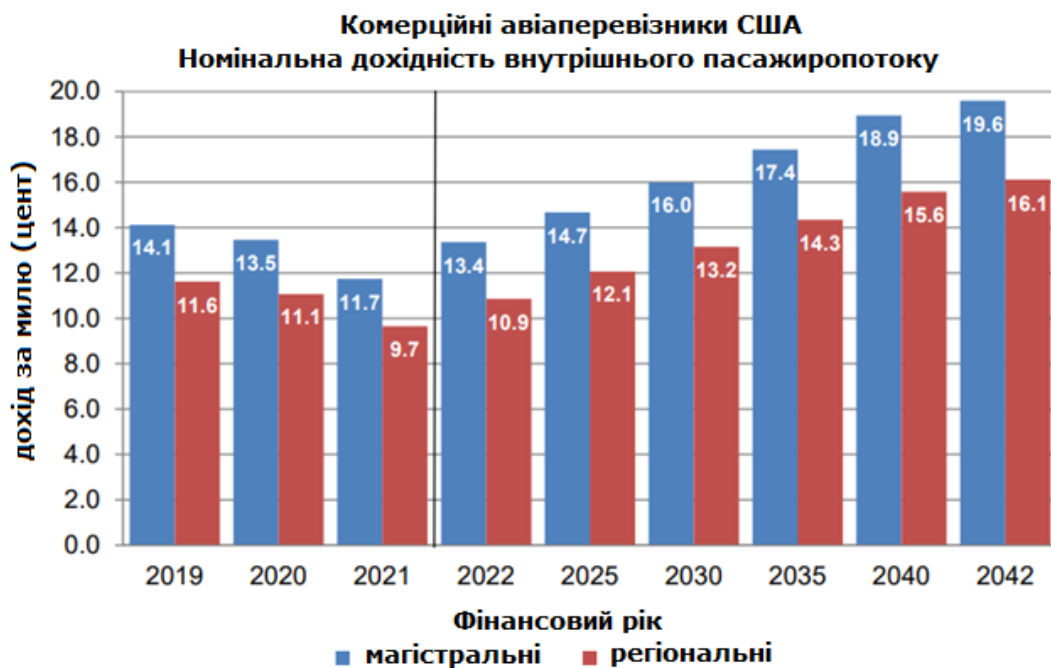


Рисунок 2.2 – Номінальна дохідність внутрішнього пасажиропотоку в США

Регіонали мають менше важелів впливу на магістральних перевізників, ніж вони мали в минулому, оскільки магістральні перевізники уклали контракти, які є більш сприятливими для їхніх операційних і фінансових результатів. І оскільки протягом останніх двох років магістральні перевізники

скоротили обслуговування невеликих міст, найбільше постраждали регіональні партнери. Крім того, магістральні перевізники успішно знизили витрати, запропонувавши добровільну відставку льотним екіпажам, але в міру поживлення активності вони залучили заміну з числа регіональних авіакомпаній, що посилює нестачу пілотів у них до пандемії. У міру відновлення регіональних перевізників і повернення активності до рівня 2019 року очікується відновлення обслуговування невеликих міст. Проте дефіцит регіональних пілотів, ймовірно, зберігатиметься протягом наступного року через час, необхідний для навчання та набору персоналу [4].

Тенденція для регіоналів, на яку майже не вплинула пандемія, — тривале збільшення кількості місць на літак. Цей показник зріс більш ніж на 55 відсотків за десятиліття з 1997 по 2007 рік, і хоча останнім часом він уповільнився до зростання на 17 відсотків за десять років, що закінчилися в 2019 році, такий же темп загальною зберігся в 2021 році. Наслідок цього прагнення до заміни 50-місних регіональних реактивних літаків з більш економічними 70-місними реактивними літаками полягає в тому, що капітальні витрати зросли. Однак перехід на більші літаки виявиться вигідним у майбутньому, оскільки їх питома вартість нижча [4].

Магістральні перевізники також збільшували кількість місць на літак, хоча, на відміну від регіональних, ця тенденція прискорювалася. З 1997 по 2007 роки кількість місць на літаку зросла лише на половину відсотка, але з 2009 по 2019 рік цей показник зріс на 10 відсотків. У 2021 році кількість місць на магістралі на літаку зросла майже до 13 відсотків за десятиліття, оскільки перевізники літали на деяких своїх магістральних міжнародних літаках, які не працювали на внутрішніх маршрутах [4].

Ще одна триваюча тенденція – це допоміжні доходи. Перевізники отримують додатковий прибуток, продаючи клієнтам продукти та послуги, крім авіаквитків. Це включає відокремлення послуг, які раніше входили у вартість квитка, наприклад зареєстрований багаж, харчування на борту та вибір місць, а також додавання нових послуг, таких як пріоритет посадки та

доступ до Інтернету. Після того, як у 2015 році було опубліковано рекордні чисті прибутки, прибуток пасажирських перевізників у США згодом знизився через зростання витрат на паливо та робочу силу та незмінну прибутковість, але був підтриманий допоміжними доходами. Навіть у 2020 році, коли прибутки перетворилися на приголомшливі збитки, це залишалося вагомим джерелом доходу для перевізників [4].

З іншого боку, системи управління доходами, які ставали все більш складними за останні роки, у 2020 році стали майже марними. Ці системи дозволяють перевізникам встановлювати оптимальні тарифи для кожного дня та часу рейсу та мінімізувати недоотриманий дохід. Але оскільки вони покладаються на історичні дані для прогнозування цін і розкладу, безпрецедентний характер обвалу в 2020 році означав, що вони не могли надати вказівок, і перевізники були змушені оцінювати ринкові умови без переваги чи точності цього кількісного аналізу [4].

Хоча системи управління доходами відновлять свою важливу роль, коли попит на подорожі повернеться до більш нормальних ритмів, у 2020 році було повністю скасовано одне джерело допоміжного доходу, комісію за зміни. Оскільки плани мандрівників були змушені змінити через обмеження, пов'язані з COVID-19, авіакомпанії почали знижувати плату за зміни маршруту в багатьох класах квитків. У відношенні до загального доходу від пасажирів комісія за скасування впала з приблизно 2 відсотків у 2019 фінансовому році та в попередні роки до менш ніж 1 відсотка у 2021 фінансовому році. Деякі авіакомпанії заявили, що скасування зборів за зміну є постійним кроком і не буде скасовано після закінчення пандемії. Навпаки, плата за багаж навряд чи буде скасована, оскільки її частка зросла з 4,0 відсотка до 6,7 відсотка в 2021 фінансовому році. А в третьому кварталі 2021 року дохід від зборів за багаж перевищив показник того ж кварталу 2019 року, хоча загальний дохід від пасажирів знизився майже на третину [4].

Пандемія не вплинула на інші методи сегментації пасажирів у більш стримані категорії вартості на основі комфортних зручностей, таких як крок

сидінь, простір для ніг, доступ до соціальних мереж і розеток. Пропозиція тарифів базового економ-класу була частиною зусиль мережевих перевізників, щоб захистити частку ринку у відповідь на швидке зростання бюджетних перевізників (LCC) за останні роки. У 2019 році кількість посадок на магістралі зросла майже на 23 відсотки порівняно з 2007 роком, а кількість посадок у бюджетних перевізників зросла на 39 відсотків. Обороти за той самий період демонструють подібну картину: оберти магістралі зросли майже на 27 відсотків, а LCC – на цілих 48 відсотків вище. Ці довгострокові тенденції були перервані в 2020 році, коли як посадки, так і частота обертання впали як на магістральних, так і на LCC-носіях приблизно до 55 відсотків від рівня 2019 року. Однак до 2021 року сила LCC знову стала очевидною, оскільки їх посадки та оберти на хвилину відновилися приблизно до 70 відсотків від рівня 2019 року, тоді як магістральний трафік скоротився приблизно до 60 відсотків. Фактично, у 2021 році відбулося відкриття трьох нових невеликих LCC: Aha!, Avelo та Breeze, усі з яких орієнтовані на невеликі міста з недостатнім обслуговуванням із рейсами «точка-точка» незалежно від магістральних контрактів [4, 5].

Спалах пандемії у 2020 році перервав і інші вітчизняні тренди. У 2019 році загальна кількість внутрішніх вильотів комерційних авіаперевізників США зросла другий рік поспіль, а ASM збільшувався кожний з попередніх дев'яти років. Але потім у 2020 році вильоти та ASM різко знизилися, впавши на 30 відсотків порівняно з попереднім роком. Що стосується попиту, RPM і посадки, які зростали протягом десяти років поспіль, спостерігали ще різкіше зниження на 40 відсотків у 2020 році. Через швидше зростання попиту коефіцієнти навантаження зросли в десять з одинадцяти років до 2020 року, досягнувши 85,2 відсотка, перш ніж різко знизитися в тому році до 68,6 відсотка, оскільки пасажери припинили літати в більшій мірі, ніж перевізники могли відповідати. Коли туристи повернулися у 2021 році, коефіцієнт завантаження почав відновлюватись і досяг 72,4 відсотка (див. рис. 2.3) [4, 5].

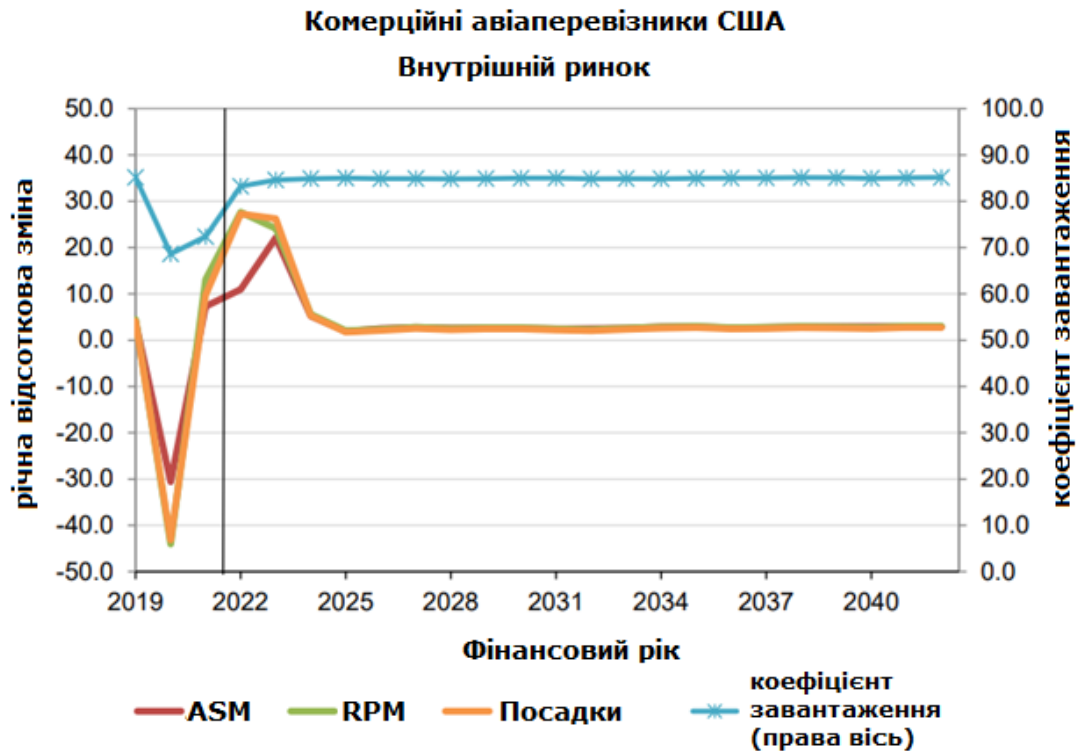


Рисунок 2.3 – Динаміка зміни коефіцієнту завантаження літаків

2.2 Міжнародний ринок

Протягом більшої частини останнього десятиліття міжнародний ринок був сегментом зростання для перевізників США порівняно зі зрілим внутрішнім ринком США. У 2015 і 2016 роках зростання внутрішнього ринку стрімко випереджало міжнародні ринки. Однак у 2017 р. зростання кількості посадок на міжнародних ринках перевищило зростання на внутрішніх ринках, проте цей тренд знову повернувся назад у 2018 і 2019 рр (див. рис. 2.4 – 2.6). Така відносна потужність внутрішньої активності порівняно з міжнародною продовжувалася під час спаду в 2020 році та початку відновлення в 2021 році. У 2021 році внутрішні посадки зросли до 62 відсотків від рівня 2019 року після 57 відсотків роком раніше, але міжнародні посадки залишилися на рівні 47 відсотків, збільшившись менш ніж на один відсотковий пункт порівняно з 2020 роком. Міжнародні подорожі продовжують зазнавати особливого впливу через закриття кордонів, карантинних вимог та інших обмежень на подорожі, а також невизначеності того, коли вимоги можуть змінитися. Зменшення

кількості ділових поїздок також сприяло падінню, навіть якщо поїздки на відпочинок підтримують внутрішні ринки. Очікується, що протягом наступних двох років міжнародні подорожі продовжуватимуть обмежуватися різним рівнем зараження COVID-19 і реакцією урядів у різних країнах. Люди також будуть особисто оцінювати ризики подорожей які, ймовірно, будуть менш комфортними під час міжнародних подорожей, ніж усередині країни, через невизначеність навколо закриття кордонів та інших обмежень [4, 6].



Рисунок 2.4 – Порівняння кількості посадок на внутрішньому американському і міжнародному ринках



Рисунок 2.5 – Порівняння кількості дохідних пасажирських миль на внутрішньому американському і міжнародному ринках



Рисунок 2.6 – Порівняння кількості доступних посадкових миль на внутрішньому американському і міжнародному ринках

У перші роки міжнародного відновлення будуть спостерігатися деякі сильні темпи зростання, оскільки рівні активності відійдуть від низької бази, але вони повернуться до більш типових показників, коли рівні наблизяться до значень 2019 року, які очікуються в 2024 році. З 2022 по 2024 фінансовий рік середні річні темпи зростання для міжнародних ASM і посадки прогноуються на рівні 30 відсотків, тоді як RPM, за прогнозами, зростатиме на 49 відсотків щорічно, оскільки загальна довжина поїздок зростає через збільшення активності в Атлантиці та Тихому океані. З 2024 по 2042 фінансовий рік прогноується, що річне зростання ASM і посадок зросте на 3,0 і 3,4 відсотка відповідно, тоді як RPM зростатиме на 3,2 відсотка. Взявши ці два періоди в цілому, ми бачимо щорічні темпи зростання з 2022 по 2042 фінансовий рік для ASM, RPM і посадок на 6,5, 8,8 і 6,9 відсотка відповідно [4, 6].

У довгостроковій перспективі зростання основних світових економік уповільниться порівняно з темпами, які перевищували тенденцію останніх років до пандемії. Декілька стримуючих чинників діють, зокрема сповільнене зростання кредитування, скорочення світової торгівлі та політичні стреси. Європейська та японська економіки загалом спостерігають повільне, але

позитивне зростання, частково через слабку торгівлю з Азією. У свою чергу, це було спричинено торговельними суперечками, а також постійним поступовим уповільненням Китаю, яким керує уряд і навряд чи ця тенденція різко знизиться. Загалом схоже, що глобальні умови повернуться до стабільної траєкторії, коли пандемію буде взято під контроль, але темпи зростання будуть ближчими до довгострокових тенденцій, ніж вищі темпи останніх років до пандемії. Проте зростання цін на нафту призведе до певного гальмування цього сприятливого середовища для попиту на авіаперевезення [4, 6].

Останні два роки були особливо важкими для перевізників, які обслуговують міжнародні ринки, оскільки жодні маркетингові дії, низькі тарифи чи інші стратегії не змогли подолати закриття кордонів та інші обмеження, пов'язані з COVID-19, які стримували попит. У країнах із незначними обмеженнями або в країнах, які скасували обмеження, активність уже була значною, а в деяких випадках – на рівні 2019 року або вище. Оскільки інші країни знімуть обмеження цього та наступного року, а невизначеність навколо подорожей зменшиться, очікується, що активність швидко відновиться. У 2022 році ASM, за прогнозами, зросте на 53 відсотки. RPM подвоїться порівняно з низьким рівнем у 2021 році (лише 30 відсотків від рівня 2019 року), а кількість посадок зросте на 64 відсотки. Коефіцієнти завантаження ще більше впали у 2021 році, досягнувши 54 відсотків, майже на 30 процентних пунктів нижче, ніж у 2019 році, оскільки перевізники зберегли певну здатність захистити частку ринку. У міру відновлення RPM у 2022 році коефіцієнти навантаження також різко зростають до 70 відсотків і майже повністю відновлюються до 2024 року (див. рис. 2.7) [4, 6].

Комерційні авіаперевізники США - міжнародний ринок



Рисунок 2.7 – Динаміка змін показників на міжнародному ринку для американських перевізників

Вплив COVID-19 на подорожі за регіонами значно відрізнявся, як і шляхи одужання. Фактори, що впливають на реакцію ринку, подібні до тих, що впливають на подорожі в цілому: кількість випадків COVID-19, урядові обмеження, переважні сегменти мандрівників і макроекономічні умови. У результаті до 2021 року кількість літаків у Латинську Америку відновилася найбільше, за нею йде Атлантичний регіон і, на третьому місці, Тихоокеанський регіон [4, 6].

Для американських перевізників Латинська Америка залишається найбільшим міжнародним пунктом призначення з більш ніж удвічі більшою площею, ніж Атлантика, наступним за величиною в типовому році завдяки своїй близькості до США, міцним торговельним зв'язкам і популярним напрямкам для відвідувачів. На відміну від двох інших регіонів, у яких спостерігалось зниження у 2021 році, латиноамериканські посадки зросли на 34,9 відсотка, а RPM – на 22,6 відсотка. Значною мірою переваги підживлювали транспортні перевезення, що прямували до місць з теплою погодою, а також відносно низька кількість випадків COVID-19 і обмеження

на подорожі в деяких країнах. Прогнозується, що у 2022 році обсяги розміщення та RPM зростуть на 41,6 і 46,3 відсотка відповідно, перш ніж відновиться однозначне зростання та поступово сповільниться до довгострокової тенденції близько 4 відсотків. Очікується, що у 2023 році і посадки, і RPM відновляться до рівня 2019 року. Протягом двадцятирічного періоду 2022-2042 років у Латинській Америці, за прогнозами, кількість посадок зростатиме в середньому на 5,8 відсотка на рік, тоді як RPM зростатиме на 6,2 відсотка на рік [4, 6].

Що стосується Тихоокеанського регіону, то він є найменшим за кількістю посадок, незважаючи на економічне зростання та потенціал авіаперевезень на ринки регіону, що розвиваються. Після падіння у 2020 році до 42,1 відсотка від рівня 2019 року кількість посадок у 2021 році ще більше впала до лише 5,8 відсотка, оскільки багато країн запровадили суворі обмеження на подорожі, особливо Китай, який є дуже великим ринком у регіоні. RPM також впав на аналогічні значення. Очікується, що у 2022 році обсяги пересадок і RPM досягнуть найнижчого рівня та відновляться приблизно до 20 відсотків від рівня 2019 року. Оскільки багато країн Тихоокеанського регіону досягли відносного успіху в контролі над поширенням COVID-19, обмеження на подорожі скасовувалися повільно, що призвело до повільного відновлення у 2022 році та в середньостроковій перспективі. Хоча початкове зростання є високим у відсотковому вираженні через низьку базу, тенденція зростання є порівняно повільною. Отже, завантаження займе 7 років, щоб повністю відновитися до рівня 2019 року, а RPM досягне цього рубежу в 2025 році. З 2022 по 2025 фінансовий рік прогнозується, що з 2022 по 2025 фінансовий рік у середньому щороку подвоюватимуться завантаження та RPM, а в довгостроковій перспективі з 2025 по 2042 фінансовий рік зростатимуть за ставками 2,4 відсотка та 2,8 відсотка відповідно. Незважаючи на те, що протягом наступних 20 років у регіоні очікується найсильніше економічне зростання серед інших регіонів, на чолі з Китаєм та Індією, посадки та RPM протягом цього періоду частково

стримані через те, що перевізники США продовжують надавати більшість своїх послуг у регіоні Японії на відміну від країн, що розвиваються швидше [4, 6].

Атлантичний регіон займає середину між двома іншими, де передпандемічні посадки приблизно вдвічі перевищують тихоокеанський регіон і вдвічі менше, ніж у латиноамериканському регіоні. Після скорочення в 2015 і 2016 роках обсяги посадок в Атлантиці почали зростати, досягнувши 7,0 відсотків у 2019 році. Це зростання було підтримано попитом у США, а також зростанням ринків Близького Сходу та Африки, навіть якщо європейські економіки сповільнилися в 2019 році. У 2020 році, як і в інших регіонах, атлантичні посадки впали на 61,1 відсотка, а потім ще на 47,1 відсотка в 2021 році, досягнувши 21 відсотка від рівня 2019 року. Подальший відсотковий приріст є значним, у 2024 році повертається кількість завантажень до рівнів 2019 року. Історичний і прогнозний шлях RPM є досить схожим, і в середньостроковій перспективі з 2022 по 2024 фінансовий рік RPM зростає із середньорічною швидкістю 67 відсотків, тоді як кількість завантажень зростає з помірною швидкістю у 71 відсоток. Незважаючи на те, що Західна Європа є розвиненою територією з помірним економічним зростанням, економічно менші регіони Близького Сходу та Африки швидко розширюються з темпами зростання ВВП більш ніж удвічі вищими, ніж у Європі. Як наслідок, більша частка прогнозованого авіаційного попиту в Атлантичному регіоні пов'язана з цими двома регіонами, особливо у другій половині прогнозованого періоду. Протягом прогнозного горизонту з 2022 по 2042 рік, прогнозується зростання посадок і RPM в Атлантичному регіоні в середньому на 10 відсотків на рік (див. рис. 2.8) [4, 6].

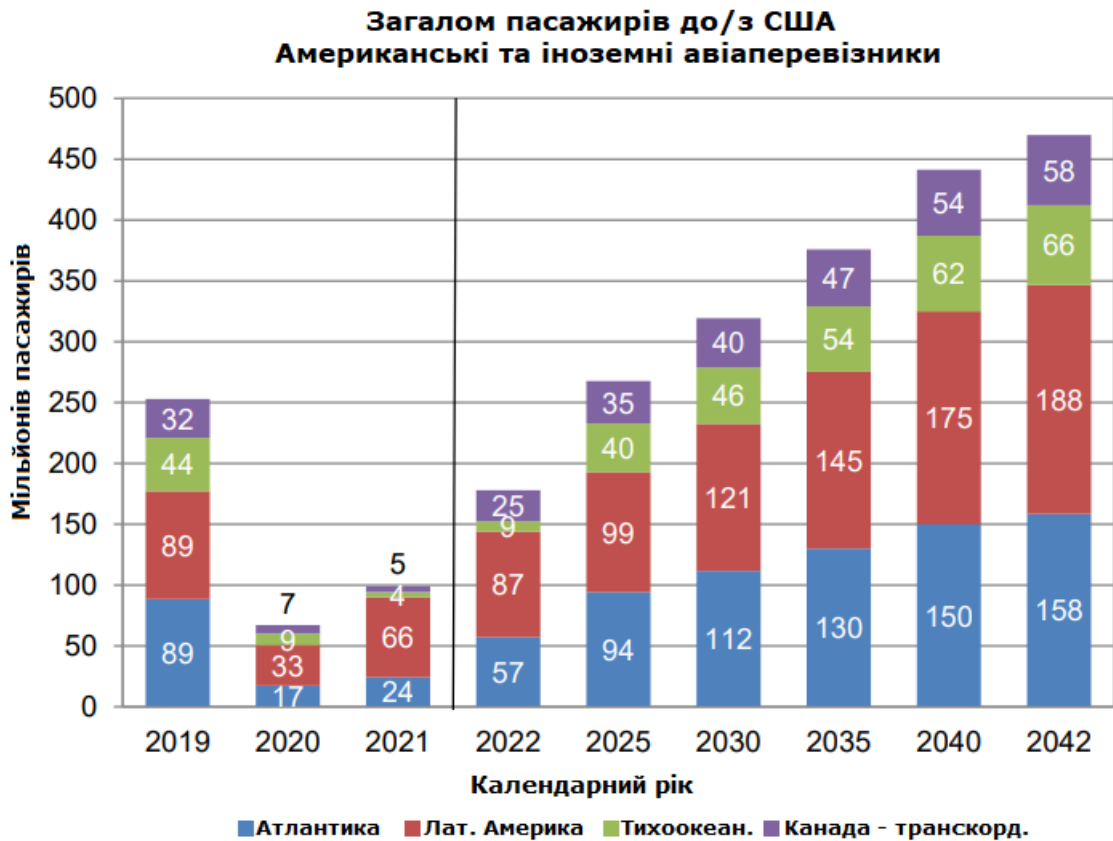


Рисунок 2.8 – Кількість пасажирів що прямують до/з США по регіонах світу

Загальна кількість пасажирів (включно з іноземними авіакомпаніями) між Сполученими Штатами та рештою світу скоротилася ще більше у 2020 році, а відновилася менше у 2021 році, ніж лише американські перевізники. Іноземні перевізники, не маючи відносної потужності внутрішніх ринків для підтримки, були змушені ще більше скорочувати пропускну спроможність і, таким чином, жертвувати пасажирськими перевезеннями. Загальна кількість пасажирів скоротилася приблизно на 73,4 відсотка до 67 мільйонів у 2020 році, оскільки всі регіони зафіксували втрати на 80,4 відсотка в Атлантичному регіоні. У 2021 році в регіонах Латинської Америки та Атлантики спостерігалось значне зростання порівняно з попереднім роком, тоді як у транскордонних регіонах Тихого океану та Канади спостерігалось подальше падіння, і всі регіони залишалися значно нижчими за рівень 2019 року [7].

Прогнозується загальне зростання міжнародних пасажирських перевезень на 79,7 відсотка у 2022 році, оскільки глобальне економічне

зростання стабілізується та обмеження, пов'язані з COVID-19, зменшаться. Найсильніше зростання пасажиропотоку очікується в Латинському регіоні, а найповільніше – у Тихому океані. Подібно до темпів зростання посадок перевізників США, загальні темпи зростання пасажиропотоку в перші роки прогнозу є високими, повертаючи кількість пасажирів до рівня 2019 року в 2024 році. Помірне світове економічне зростання в середньому 2,8 відсотка на рік протягом наступних 20 років (2022-2042) є основою для прогнозованого зростання кількості міжнародних пасажирів на 7,7 відсотка на рік, оскільки рівень зростає майже вп'ятеро з 99 мільйонів у 2021 році до 470 мільйонів у 2042 році [7].

Атлантичний і латиноамериканський регіони були порівнянного розміру в 2019 році, але до кінця прогнозованого періоду латиноамериканський регіон нараховує приблизно на 20 відсотків більше пасажирів, і шляхи їхнього зростання відрізняються. Зростання в Атлантичному регіоні швидше на початку і сповільнюється порівняно з Латинською Америкою в наступні роки, що відповідає прогнозам ВВП. Протягом 20-річного прогнозованого періоду (2022-2042) Атлантичний регіон зростає в середньому на 9,4 відсотка на рік, а Латинська Америка – на 5,1 відсотка. Хоча європейські ринки в Атлантичному регіоні є зрілими та розвиваються відносно повільно, інші ринки, такі як Близький Схід і Африка, сприяють загальному зростанню в регіоні [7].

У Тихоокеанському регіоні кількість пасажирів у 2021 році становила лише 10 відсотків від показників у 2019 році в поєднанні із суворими обмеженнями на подорожі через COVID-19 і повільним зростанням ВВП Японії, яке компенсує часткове економічне зростання та зростання доходів у Китаї, Індії та Південній Кореї. результатом є відносно повільне повернення до рівня пасажиропотоку 2019 року у 2028 році. З 2022 до 2042 року пасажиропотік між Сполученими Штатами та Тихоокеанським регіоном, за прогнозами, зростатиме на 13,8 відсотка на рік [7].

Як і Атлантичний регіон, транскордонний ринок Канади є ще одним зрілим ринком, але значно меншим. Прогнозується, що протягом прогнозованого періоду він зростатиме в середньому на 12,6 відсотка, трохи швидше, ніж в Атлантичному регіоні. У 2023 році загальна кількість пасажирів повернеться до рівня 2019 року, приблизно стільки ж, скільки в регіоні Латинської Америки [7].

2.3 Загальна система прогнозу попиту на авіаперевезення

У 2020 році пропускна здатність системи (сума внутрішньої та міжнародної) скоротилася на 35,9 відсотка до 791 мільярда ASM, тоді як RPM впав на 47,4 відсотка до 549 мільярдів. За той самий період загальносистемне розміщення впало на 44,3 відсотка до 511 мільйонів. Завдяки підтримці внутрішнього та латиноамериканського ринків активність почала відновлюватися у 2021 році, коли ASM, RPM та посадки зросли на 4,8 відсотка, 3,3 відсотка та 9,0 відсотка відповідно. У попередні роки перевізники США надавали перевагу внутрішньому ринку над міжнародним у плані розподілу пропускної здатності, оскільки економічне зростання США було вищим, ніж у багатьох регіонах світу. А в 2020 і 2021 роках обмеження на подорожі, пов'язані з COVID-19, призвели до того, що цей розподіл значною мірою зберігся, оскільки внутрішні потужності були скорочені менше, ніж міжнародні: зниження на 25,5 відсотка в 2021 році порівняно з 2019 роком для внутрішніх поїздок порівняно зі зниженням на 51,4 відсотка для міжнародних. Однак, оскільки перевізники США зосередяться на відновленні, міжнародне зростання пропускної здатності випереджатиме внутрішнє, головним чином через те, що міжнародні скорочення в 2020 і 2021 роках були набагато серйознішими. У наступні роки до 2042 року перевізники продовжуватимуть нарощувати пропускну здатність на міжнародних ринках швидше, ніж на внутрішньому, оскільки на міжнародних ринках спостерігатиметься значніше зростання доходів і відповідний попит на подорожі [1, 7].

У 2021 році зростання чисельності магістральних перевізників у США на загальному внутрішньому та міжнародному ринку становило 8,2 відсотка, тоді як регіональні перевізники перевезли на 12,1 відсотка більше пасажирів. Ця різниця пояснюється більшою залежністю магістральних перевізників від відстаючих міжнародних ринків [1, 7].

У 2019 році на внутрішньому ринку кількість пасажирів на магістральних лініях зростає дев'ятий рік поспіль. Ця тенденція була раптово зупинена у 2020 році зі зниженням на 43,7 відсотка, а потім зросла на 9,1 відсотка у 2021 році. Подібним чином пасажирів міжнародних магістралей показали десятий рік поспіль зростання в 2019 році, тенденція, яка була порушена в 2020 році зі зниженням на 53,4 відсотка, але, на відміну від внутрішнього ринку, супроводжувалося невеликим зростанням на 1,4 відсотка. Прогнозується, що у 2022 році зростання внутрішніх магістральних посадок прискориться, зростучи на 30,0 відсотків у міру відновлення. Ще один рік значного зростання у 2023 році повернув кількість внутрішніх посадок до рівня 2019 року. Після завершення відновлення внутрішній капітал відновить зростання завдяки економічним основам і в середньому становитиме 2,5 відсотка протягом решти прогнозу. Міжнародні магістральні посадки йдуть схожим шляхом із значним зростанням на початку відновлення, яке сповільнюється, оскільки у 2024 році кількість посадок повертається до рівня 2019 року. Очікується, що з цього моменту до кінця прогнозу у 2042 році міжнародні посадки зростатимуть у середньому на 3,5 відсотка [1, 7].

Незважаючи на те, що перевізники агресивно скорочували пропускну спроможність у 2020 році, падіння трафіку було ще більшим, а коефіцієнт завантаження системи впав з 84,5 відсотка у 2019 році до 69,5 у 2020 році та далі до 68,5 у 2021 році – сукупне падіння, яке значно перевищило падіння після 11 вересня та Великої рецесії. Коефіцієнт завантаження поступово відновлюється, повертаючись у 2025 році близько до рівня 2019 року [1, с. 27].

2.4 Вантажні перевезення

Повітряні вантажні перевезення включають як внутрішні, так і міжнародні вантажні/швидкі перевезення та пошту. Попит на вантажні повітряні перевезення є похідним попитом, що виникає в результаті економічної діяльності. Вантажі переміщуються в салоні пасажирських літаків і на спеціальних вантажних літаках як на регулярних, так і на нерегулярних рейсах. Вантажні перевізники стикаються з ціновою конкуренцією з боку альтернативних способів доставки, таких як вантажівки, контейнеровози та залізничні вагони, а також з боку інших авіаперевізників [1, 7].

У 2021 році американські авіаперевізники пролетіли 51,3 мільярда тонно-миль доходу (RTM), що на 16,9 відсотка більше порівняно з попереднім роком, що підвищило RTM 19,7 вище рівня 2019 року. У 2021 році внутрішні вантажні RTM зросли на 11,7 відсотка до 19,9 мільярда, а міжнародні RTM – на 20,4 відсотка до 31,4 мільярда. Для порівняння, за десятиліття, що закінчилося в 2019 році, внутрішній RTM зріс у середньому на 3,2 відсотка, а міжнародний – на 3,8 відсотка. Сплеск у RTM у 2020 та 2021 роках був підтриманий споживачами, які купували товари, щоб збільшувати час, проведений вдома через пандемію, а також збоями в наземному транспорті, спричиненими нестачею працівників через захворювання COVID-19. За роки до 2020 року вантажні повітряні перевезення RTM, які перевозили виключно вантажні перевізники, становили в середньому 78,7 відсотка від загальної кількості, але потім у 2020 і 2021 роках зросли до 88,0 відсотка від загальної кількості RTM, а решту літали пасажирські перевізники. У 2020 році загальна кількість RTM, виконаних вантажними перевізниками, зросла на 12,3 відсотка, тоді як загальна кількість RTM, виконаних пасажирськими перевізниками, впала на 37,8 відсотка, але в 2021 році як вантажні, так і пасажирські перевізники збільшилися приблизно на 17 відсотків. Незважаючи на те, що багато пасажирських перевізників змінили конфігурацію літаків, щоб приймати більше вантажів, явне падіння пасажирських рейсів у 2020 році

переважило це збільшення, що призвело до різкого падіння RTM пасажирських перевізників. З поверненням пасажирських рейсів частка вантажів на вантажних перевізниках зменшиться з 88 відсотків у 2021 році до приблизно 82 відсотків у 2025 році [1, 7].

Міжнародні вантажні повітряні перевезення перевізників США охоплюють чотири регіони, що складаються з Атлантики, Латинської Америки, Тихого океану та «Інших міжнародних напрямків» [1, 7].

Історично склалося так, що авіаперевезення вантажів пов'язані з ВВП. Іншими факторами, які впливають на зростання вантажних перевезень, є нестабільність цін на паливо, зміна реальної прибутковості, глобалізація та торгівля [1, 7].

Прогнози прибутку в тонно-милях спираються на кілька припущень, характерних для вантажної галузі. По-перше, обмеження безпеки на авіаперевезення вантажів залишаться в силі. По-друге, відбувся здебільшого перехід від повітряного до наземного транспорту. Нарешті, довгострокова вантажна діяльність значною мірою залежить від економічного зростання.

Прогнози RTM базуються на моделях, які пов'язують вантажоперевезення з ВВП. Прогнози RTM внутрішніх вантажів використовують реальний ВВП США як основний фактор активності. Прогнози RTM міжнародних вантажів залежать від зростання світового та регіонального ВВП з поправкою на інфляцію. Прогнозується розподіл RTM між пасажирськими та всіма вантажними перевізниками на основі аналізу історичних тенденцій щодо часток, змін у структурі галузі та ринкових припущень [1, 7].

Очікується, що після збільшення на 16,9 відсотка у 2021 році загальний RTM зросте на 2,5 відсотка в 2022 році. Через стійке економічне зростання США та світу в довгостроковій перспективі FAA прогнозує зростання загального RTM із середньорічним темпом 3,2 відсотка протягом прогнозованого періоду (з 2022 по 2042 рік) [1, 7].

Очікується, що після різкого зростання в 2021 році внутрішні вантажні RTM зменшаться в наступні роки, оскільки поштовх від пандемії згасає. У період між 2022 і 2042 роками середні річні темпи зростання внутрішніх вантажних RTM зростуть на 2,6 відсотка. У 2021 році вантажні перевізники перевезли 93,4 відсотка внутрішніх вантажних RTM. Прогнозується, що в середньостроковій перспективі частка всіх вантажів помірно знизиться до приблизно 92 відсотків, оскільки пасажирські рейси повернуться в систему. У довгостроковій перспективі частка вантажних перевезень лише незначно зросте до 92,7 відсотка до 2042 року завдяки збільшенню місткості вантажних перевізників [1, 7].

Зростання RTM на 20,4% у міжнародних вантажних перевезеннях у 2021 році зникне у 2022 році, коли проблеми з наземним транспортом будуть вирішені. Як і на внутрішніх ринках, RTM, що перевозяться вантажними перевізниками, значно зросли у 2020 році, а пасажирські перевізники впали ще різкіше, але до 2021 року обидва типи знову зросли. З поверненням пасажирських рейсів після пандемії очікується, що RTM на пасажирських літаках швидко зростатиме, збільшуючись приблизно на 18 відсотків на рік з 2022 по 2024 рік. За той самий період RTM для всіх вантажів залишається приблизно незмінним, оскільки частина тоннажу втрачається пасажирськими перевізниками у 2022 році. Після періоду відновлення зростання для обох типів перевізників повертається до довгострокових тенденцій. У прогнозованому періоді (2022-2042 рр.) очікується, що RTM для міжнародних вантажних перевезень зростатиме в середньому на 3,6 відсотка на рік на основі прогнозованого зростання світового ВВП, причому Тихоокеанський міжнародний регіон має найшвидше зростання RTM (4,0 відсотка), за яким йдуть інші (3,5 відсотка), Атлантичний (3,3 відсотка) та Латинської Америки (2,1 відсотка) [1, 7].

У 2021 році частка міжнародних вантажних транспортних засобів, що перевозяться повністю вантажними авіакомпаніями, становила 84,6 відсотка, і, за прогнозами, буде стабільно знижуватися протягом періоду відновлення,

перш ніж поступово збільшуватися відповідно до історичних тенденцій і закінчитися на рівні 80,3 відсотка в 2042 році [1, 7].

Висновки до розділу 2

В даному розділі розглянуто декілька моделей, щодо яких було проведено дослідження динамік клієнтського попиту, порівняння кількості дохідних пасажирських миль і порівняння кількості доступних посадкових миль – на внутрішньому американському і міжнародному ринках. Спостерігається, що динаміка показників ASM, RPM і посадок літаків є переважно сталою, яскравим виключенням є період з початку пандемії COVID-19 до часу, коли переважна більшість країн скасувала обмеження, пов'язані з нею.

Визначено особливості внутрішнього і зовнішнього ринків, на прикладі США, проаналізовано систему, за якою функціонує даний ринок авіаперевезень. Окрему увагу приділено моделі вантажних перевезень і її зв'язку з перевезеннями пасажирів. Наведено кількісне і якісне порівняння динаміки попиту для внутрішнього і міжнародного ринків, з визначенням особливостей окремих регіонів, які впливають на зміни галузевих показників.

3 МОДЕЛЮВАННЯ СЦЕНАРІЇВ І АЛЬТЕРНАТИВНИХ РІШЕНЬ

Невизначеність існує в усіх галузях, але особливо в галузі комерційних авіаперевезень. Зі збільшенням нестабільності глобального середовища важливість сценаріїв для цілей планування зростає. Щоб допомогти зацікавленим сторонам краще підготуватися до майбутнього, FAA надає альтернативні сценарії до своїх базових прогнозів трафіку та пропускної здатності авіакомпаній [1, 7].

Для створення базового внутрішнього прогнозу були використані економічні припущення з 10-річного та 30-річного базового рівня макроекономічних показників США IHS Markit. Щоб розробити альтернативні сценарії, були використані припущення з 30-річних оптимістичних і песимістичних прогнозів IHS Markit з їх звіту про економіку США за серпень 2021 року: 30-річний фокус. Вхідні дані з цих альтернативних сценаріїв були використані для створення «високого» та «низького» трафіку, пропускної спроможності та прогнозів доходності [1, 7].

Міжнародні пасажери та перевезення в основному залежать від прогнозів валового внутрішнього продукту (ВВП), наданих IHS Markit. Таким чином, альтернативні сценарії використовують вхідні дані на основі коефіцієнтів, отриманих від оптимістичних і песимістичних прогнозів основного торгового партнера IHS Markit та інших важливих торгових партнерів, щоб створити прогнози високого та низького рівня [1, 7].

3.1 Прогноз попиту за сценарієм припущення

Внутрішній базовий прогноз FAA припускає, що економічне зростання стабільно відновиться у 2022 році, а потім залишатиметься трохи вищим за тенденцію до кінця десятиліття за підтримки споживчих і державних витрат. Рівень безробіття продовжує падати, опустившись нижче рівня до пандемії у 2023 році. Ціни на нафту різко зростуть у 2022 році, але, як згадувалося раніше,

прогноз зараз виглядає консервативним через війну в Україні. У прогнозі не передбачається зовнішніх шоків [1, 6, 7].

Високий прогноз FAA використовує оптимістичний прогноз IHS Markit. Оптимістичний сценарій характеризується швидшим відновленням у найближчій перспективі, ніж у базовому сценарії, з подальшим дещо сильнішим зростанням у порівнянні з балансом прогнозу. Короткострокові відмінності включають стрімке зростання ВВП на 7,0 відсотка в 2022 році порівняно з 4,5 відсотка в базовому сценарії, зумовлене головним чином зростанням споживчих витрат. Ці витрати є результатом більш рішучої реакції споживачів на Закон про інвестиції в інфраструктуру та робочі місця та готовності використати частину своїх надлишкових заощаджень, що підкріплюється більшою впевненістю через зменшення кількості випадків COVID-19. Рівень безробіття падає дещо різкіше, ніж у базовому сценарії, хоча він також досяг рівня до пандемії у 2023 році. А ціна на нафту приблизно на 10 відсотків нижча від базового рівня, оскільки ОПЕК+ підвищує квоти на видобуток, а запаси в США зростають швидше, ніж зазвичай [1, 6, 7].

За цим сценарієм зростання реальних витрат на особисте споживання (PCE) на душу населення приблизно на 3 десятих відсоткового пункту перевищує базовий рівень у середньо- та довгостроковій перспективі. Рівень безробіття в середньому на 0,25 відсоткових пунктів нижчий за фінансовий рік, ніж базовий рівень (реальні особисті витрати на споживання на душу населення та безробіття використовуються як вхідні змінні для базових, високих і низьких прогнозів посадок FAA) [1, 6, 7].

І навпаки, низький прогноз FAA використовує песимістичний сценарій IHS Markit. Згідно з цим прогнозом, зростання кількості нових випадків COVID-19, госпіталізацій і смертей призведе до більшої обережності з боку споживачів, уповільнивши їхні витрати, які падають нижче базового рівня. Відновлення економіки у 2022 році буде більш скромним, ніж у базовому та оптимістичному сценаріях, а середньо- та довгострокове зростання також

повільніше. Зростання ВВП у середньому на 0,5 відсоткових пунктів нижче, ніж у базовому сценарії протягом прогнозного горизонту [1, 6, 7].

Сприяючи уповільненню зростання ВВП за цим сценарієм, капітальні інвестиції в бізнес та інвестиції в житлове будівництво зростають повільніше, ніж у базовому сценарії, що призводить до нижчого загального зростання продуктивності. Проблеми з ланцюгом поставок залишаються, а споживачі нерішучістю поєднуються, що змушує підприємства скорочувати інвестиції. Фінансові умови є напруженими, і на добробут домогосподарств впливає падіння фондових ринків (див. рис. 3.1) [1, 6, 7].

Ціни на нафту зростають швидше, ніж базовий рівень протягом усього прогнозу, і до 2042 року вони будуть вищими на 52 долари США за барель. Реальний РСЕ на душу населення за цим сценарієм зростає на 0,8 процентного пункту повільніше на рік, ніж за базовим сценарієм; а рівень безробіття в середньому на 0,6 пункту вище на річній основі, ніж у базовому сценарії [1, 6, 7].

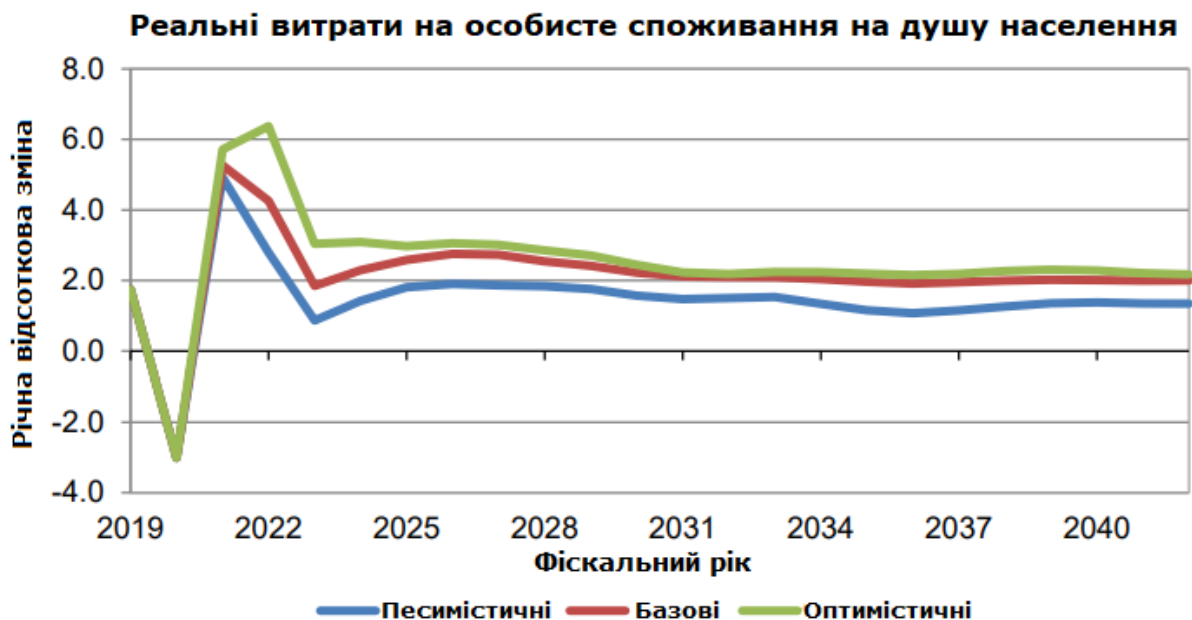


Рисунок 3.1 – Варіанти прогнозу реальних витрат на особисте споживання на душу населення

На рисунках 3.2 – 3.3 наведено варіанти оптимістичного, базового і песимістичного прогнозів чисельності населення і рівня безробіття в США.

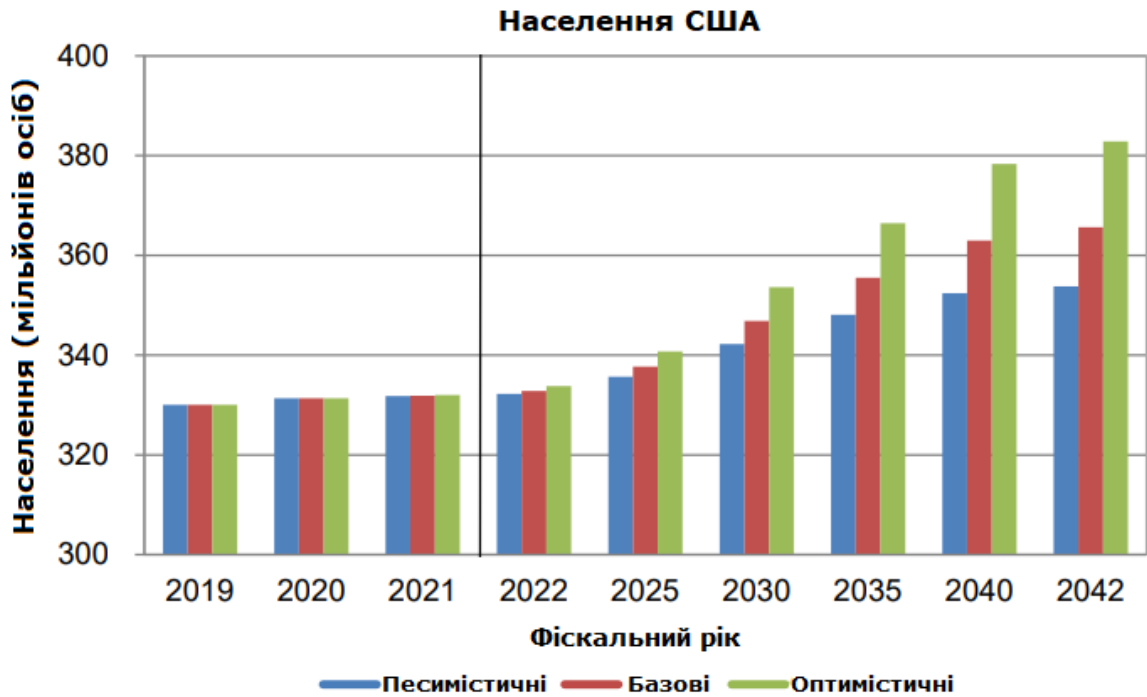


Рисунок 3.2 – Варіанти прогнозу чисельності населення США

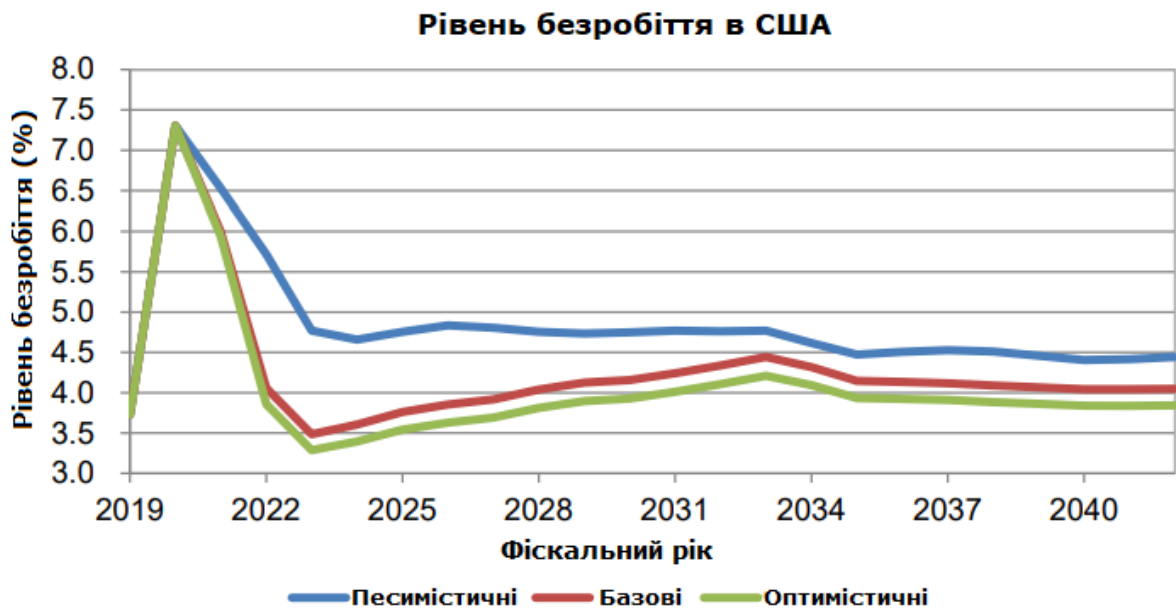


Рисунок 3.3 – Варіанти прогнозу рівня безробіття в США

Ціна на енергоносії є одним із драйверів зростання споживчих цін протягом прогнозного періоду. В оптимістичному випадку повільне зростання цін на енергоносії та цін на імпорт протидіє швидшому зростанню цін на інші споживчі товари, що спричиняє зростання оптимістичного ІСЦ дещо повільніше, ніж базовий рівень. У песимістичному випадку ціни на енергоносії, заробітна плата та ціни на імпорт зростають швидше порівняно з базовим сценарієм (див. рис. 3.4 – 3.5) [1, 6, 7].

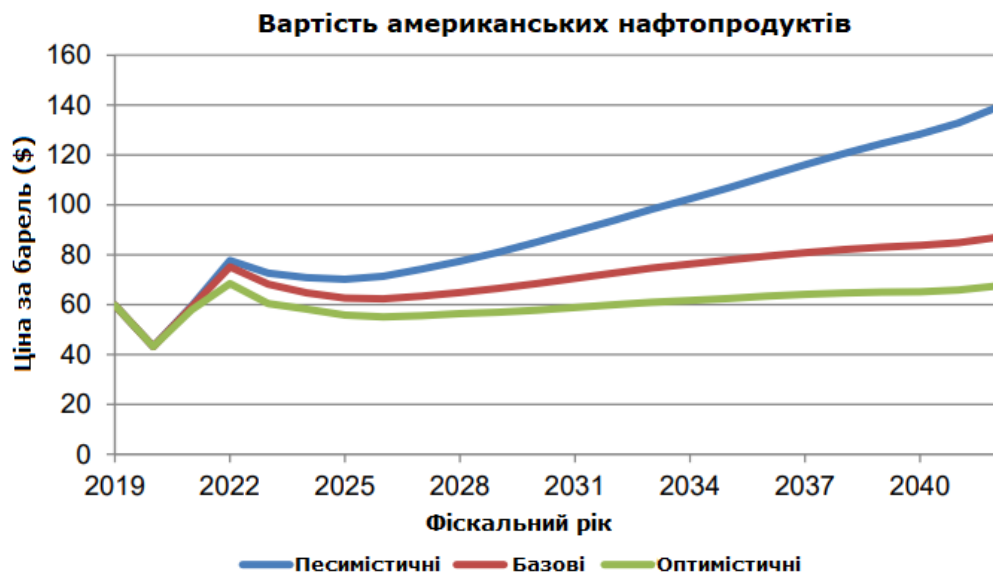


Рисунок 3.4 – Варіанти прогнозу вартості американських нафтопродуктів

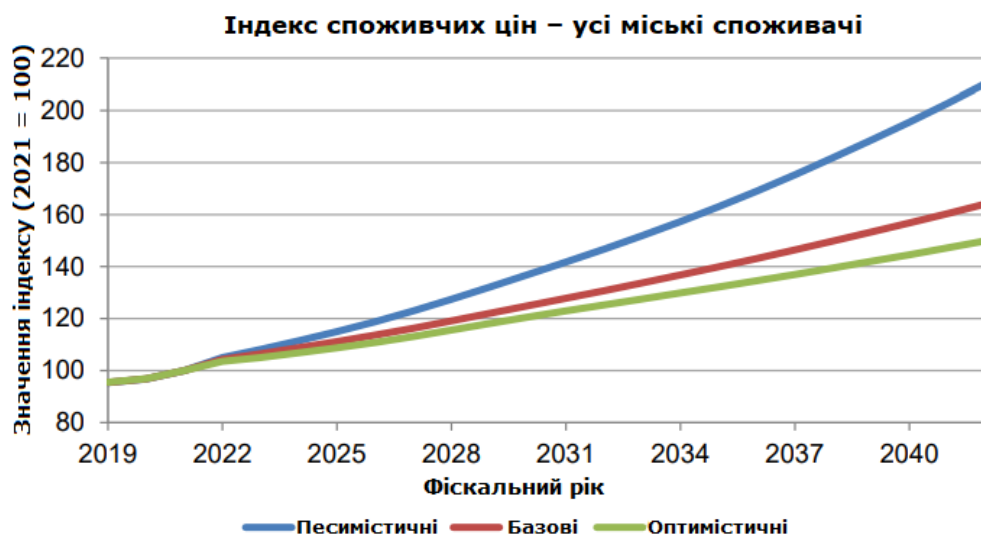


Рисунок 3.5 – Варіанти прогнозу індексу споживчих цін

3.2 Альтернативні прогнози

Згідно з базовим прогнозом, кількість системних посадок зростатиме із середньорічними темпами 4,9 відсотка на рік протягом прогнозного періоду 2022–2042 років (при цьому кількість внутрішніх та міжнародних пасажирів зростатиме відповідно на 4,7 та 6,9 відсотка) [1, 6, 7].

В оптимістичному випадку кількість посадок літаків зростає дещо швидшими темпами, у середньому на 5,5 відсотка на рік (на 5,3 відсотка всередині країни та на 7,1 відсотка на міжнародному рівні). Цей сценарій відзначається більш сприятливим бізнес-середовищем і нижчими цінами на паливо, що робить ціни на авіаквитки доступнішими для бізнес-мандрівників і туристів. До кінця прогнозованого періоду в 2042 році кількість пасажирів системи в оптимістичному випадку перевищить базовий рівень на 12,6 відсотка, загальна кількість яких становить 1,7 мільярда, що на 191 мільйон більше, ніж у базовому сценарії [1, 6, 7].

Песимістичний випадок характеризується періодом послаблення зростання особистих доходів і довіри споживачів у поєднанні зі скороченням ринків фінансових активів, що призводить до підвищення процентних ставок і скорочення інвестицій і споживчих витрат. Згідно з цим сценарієм, обсяг завантажень зростає в середньому на 3,8 відсотка на рік (на внутрішньому ринку – на 3,5 відсотка, а на міжнародному – на 6,3 відсотка). У песимістичному варіанті кількість пасажирів системи у 2042 році на 19,7 відсотка нижча за базовий сценарій і становить 1,2 мільярда, або на 299 мільйонів менше, ніж у базовому сценарії (див. рис. 3.6) [1, 6, 7].

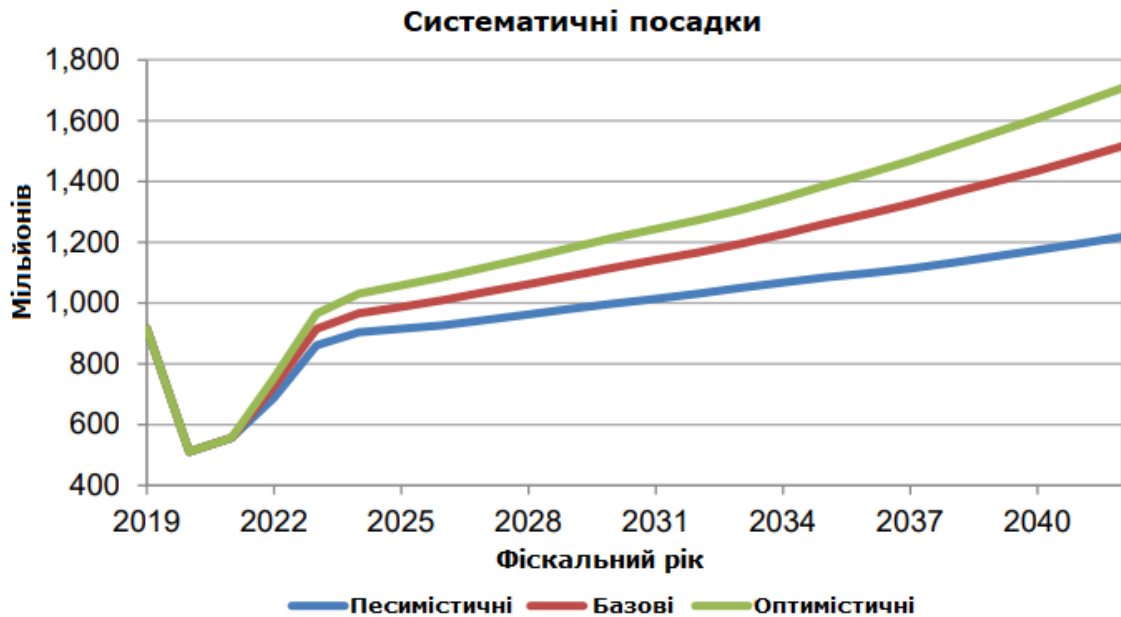


Рисунок 3.6 – Варіанти прогнозу кількості систематичних посадок літаків

У базовому прогнозі **системні RPM** зростають із середньою річною швидкістю 5,7 відсотка на рік протягом прогнозного горизонту (2022-2042), при цьому внутрішні RPM збільшуються на 4,8 відсотка щорічно, а міжнародні RPM зростають на 8,8 відсотка щорічно [1, 6, 7].

У оптимістичному випадку швидко зростаюча економіка в поєднанні з нижчими цінами на енергоносії призведе до зростання прибутків на хвилину, вищих за базовий рівень, із зростанням у середньому на 6,2 відсотка на рік (внутрішній і міжнародний показники зростання на 5,5 і 9,0 відсотків відповідно) [1, 6, 7].

У песимістичному випадку поєднання повільнішого зростання економіки та вищих цін на енергоносії призводить до зростання RPM у середньому на 4,7 відсотка на рік, при цьому внутрішні ринки зростають на 3,7 відсотка на рік, а міжнародний трафік зростає на 8,2 відсотка щорічно (див. рис. 3.7) [1, 6, 7].

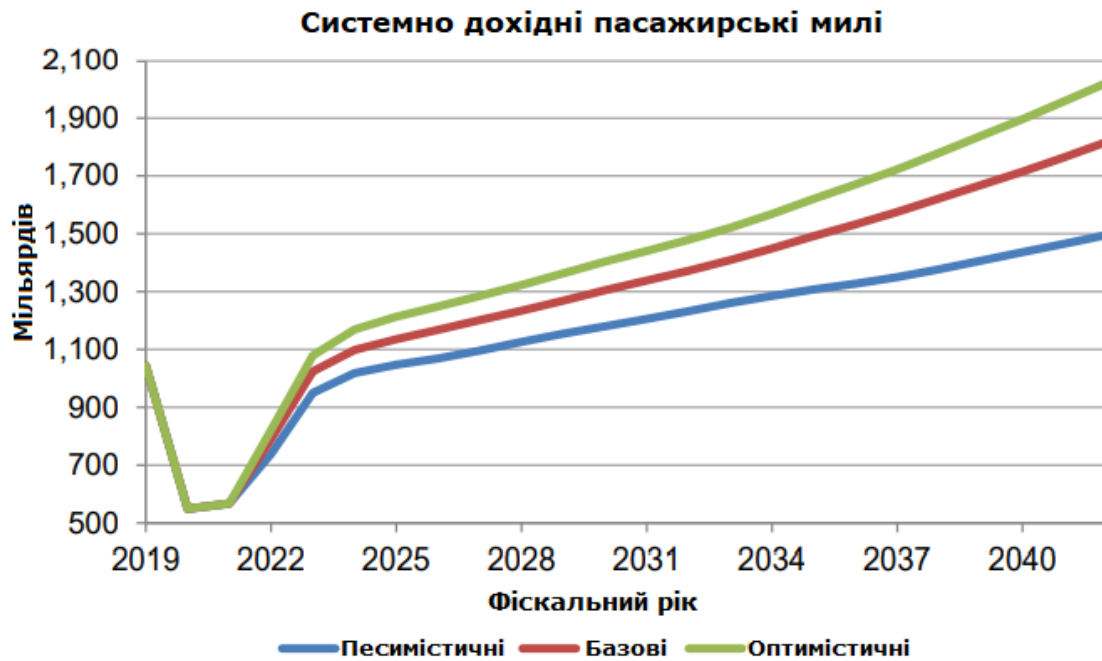


Рисунок 3.7 – Варіанти прогнозу кількості системно дохідних пасажирських
МИЛЬ

У базовому варіанті прогнозується збільшення **пропускної спроможності** системи в середньому на 4,7 відсотка на рік протягом прогнозного горизонту із зростанням у середньому на 4,0 відсотка на рік на внутрішніх ринках і на 6,5 відсотка на рік на міжнародних ринках [1, 6, 7].

В оптимістичному випадку потужність зростає дещо швидше, ніж у базовому прогнозі, становлячи в середньому 5,2 відсотка щорічно по всій системі (4,7 і 6,8 відсотка для внутрішнього та міжнародного ринків відповідно). Перевізники збільшують пропускну здатність порівняно з базовим прогнозом, щоб задовольнити підвищений попит на подорожі, спричинений більш сприятливим економічним середовищем [1, 6, 7].

У песимістичному випадку попит на авіаперевезення нижчий, ніж у базовому сценарії, тому пропускну здатність системи зростає повільнішими темпами – 3,7 відсотка на рік (внутрішнє зростання – 2,9 відсотка на рік, а міжнародне – 6,1 відсотка на рік) (див. рис. 3.8) [1, 6, 7].

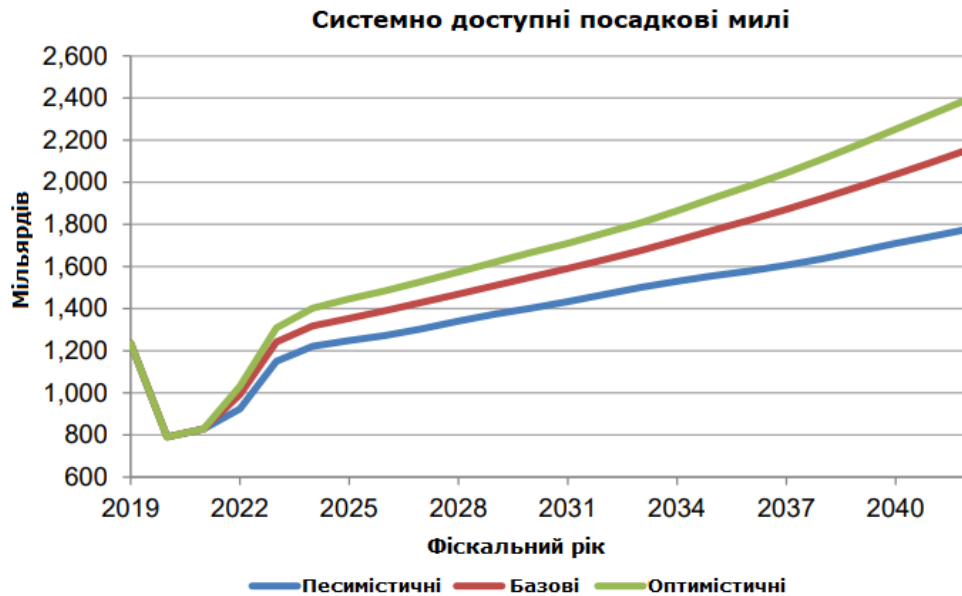


Рисунок 3.8 – Варіанти прогнозу кількості системно доступних посадкових миль (показник пропускної спроможності)

Коефіцієнти навантаження на систему протягом 20-річного прогнозованого періоду подібні для всіх трьох прогнозних сценаріїв. Коефіцієнт завантаження системи зростає з 68,5 відсотка у 2021 році до 84,4 (оптимістичний), 84,1 (песимістичний) і 84,3 (базовий рівень) відсотків у 2042 році [1, 6, 7].

За всіма трьома сценаріями передбачається, що перевізники підтримуватимуть високий рівень завантаження, активно керуючи місткістю (місцями) для більш точного задоволення попиту пасажирів [1, с. 101].

Коефіцієнт внутрішнього завантаження зростає протягом прогнозного горизонту з 72,4 відсотка до 85,1 відсотка в базовому сценарії та до 85,2 відсотка в оптимістичному та песимістичному сценаріях [1, с. 101].

Міжнародний коефіцієнт завантаження зростає в базовій лінії з 53,5 відсотка до 82,3 відсотка; в оптимістичному до 82,3 відсотка; а в песимістичному – до 82,0 відсотка. Це частково відображає відносне зростання попиту та потужностей у трьох (Атлантичному, Латинському та Тихоокеанському) міжнародних регіонах за кожним сценарієм [1, с. 101].

У базовому прогнозі **номінальна прибутковість** системи щорічно зростає на 2,3 відсотка, підвищившись з 11,71 центів у 2021 році до 18,89 центів у 2042 році. На внутрішніх ринках прибутковість у базовому прогнозі зростає з 11,50 центів у 2021 році до 19,23 центів у 2042 році. Міжнародна дохідність зростає з 12,80 центів у 2021 році до 18,09 центів у 2042 році [1, с. 102].

Дохідність системи зростає в оптимістичному випадку повільніше, ніж у базовому сценарії, на 1,9 відсотка щорічно до 17,35 центів у 2042 році. Внутрішня дохідність збільшується до 17,33 центів, тоді як міжнародна дохідність збільшується до 17,40 центів. Помірне зростання прибутковості в обох випадках пояснюється прогресом технологій, підвищенням продуктивності та помірним зростанням цін на паливо [1, с. 102].

У песимістичному випадку номінальна прибутковість зростає швидше, ніж у базовій лінії, зростаючи в середньому на 3,4 відсотка щорічно, досягаючи 23,49 центів до 2042 року (25,10 центів на внутрішньому ринку та 20,11 центів на міжнародному рівні). Цей сценарій відображає вищу загальну внутрішню інфляцію та помітно вищі ціни на енергоносії, ніж у базовому сценарії, що змушує перевізників підвищувати тарифи, щоб покрити вищі витрати на паливо, робочу силу та капітал [1, с. 102].

Висновки до розділу 3

В даному розділі була висвітлена проблема невизначеності при створенні прогнозів. Для створення будь-якого базового прогнозу необхідно враховувати різні фактори і сценарії. При розгляді альтернативних сценаріїв можливого розвитку подій варто приділяти увагу оптимістичним і песимістичним сценаріям для створення своєрідного діапазону планування.

За допомогою використання сценарію припущення розглянуто варіанти прогнозів реальних витрат особистого споживання на душу населення,

чисельності населення, рівня безробіття, вартості палива та індексу споживчих цін.

В розділі розглянуто альтернативні прогнози щодо кількості посадок літаків, кількості дохідних пасажирських миль, пропускної спроможності, коефіцієнту завантаженості, а також прибутковості.

4 РОЗРОБКА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ РОЗШИРЕННЯ МЕРЕЖІ АВІАЦІЙНИХ МАРШРУТІВ

4.1 Постановка задачі

В якості поставленої задачі розглядається проведення прогнозу динаміки попиту пасажирів на конкретні напрямки, з метою визначення потенційної прибутковості чи навпаки, збитковості. В якості набору даних для проведення прогнозу взято базу даних, яку надає Бюро Транспортної Статистики, яке відноситься до Департаменту транспорту США. В цьому наборі даних містяться кількісні і якісні показники, які можуть бути використані для аналізу. Дані доповнюються щомісяця, перші дані датуються груднем 2006 року. Користувач офіційного сайту може обирати дані, які його цікавлять, окремо для деяких аеропортів США (див. рис. 4.1) [8].

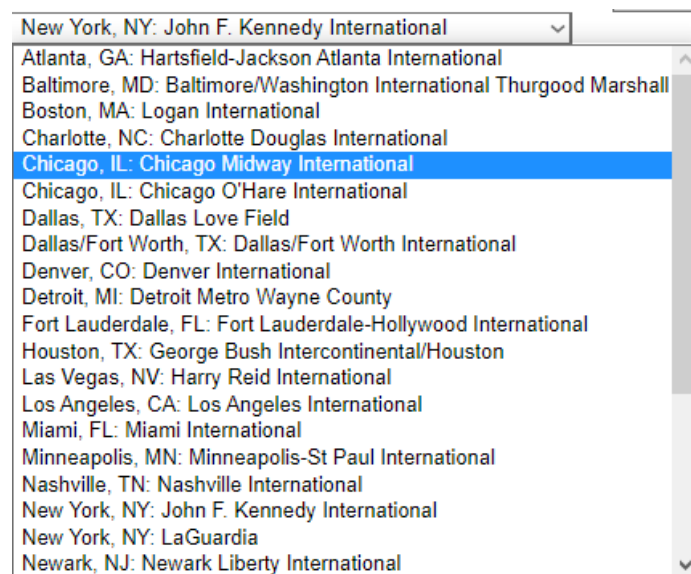


Рисунок 4.1 – Поле вибору аеропорту для запиту даних

Особливість цих наборів даних полягає у тому, що дані надаються не як результат спостережень за конкретно взятим місяць, а як дані, що були зафіксовані за період в останні 11 місяців. В якості прикладу наведено дані,

актуальні на вересень 2021 року, для аеропорту Нью-Йорка ім. Джона Кеннеді (JFK) (див. рис. 4.2) [8].

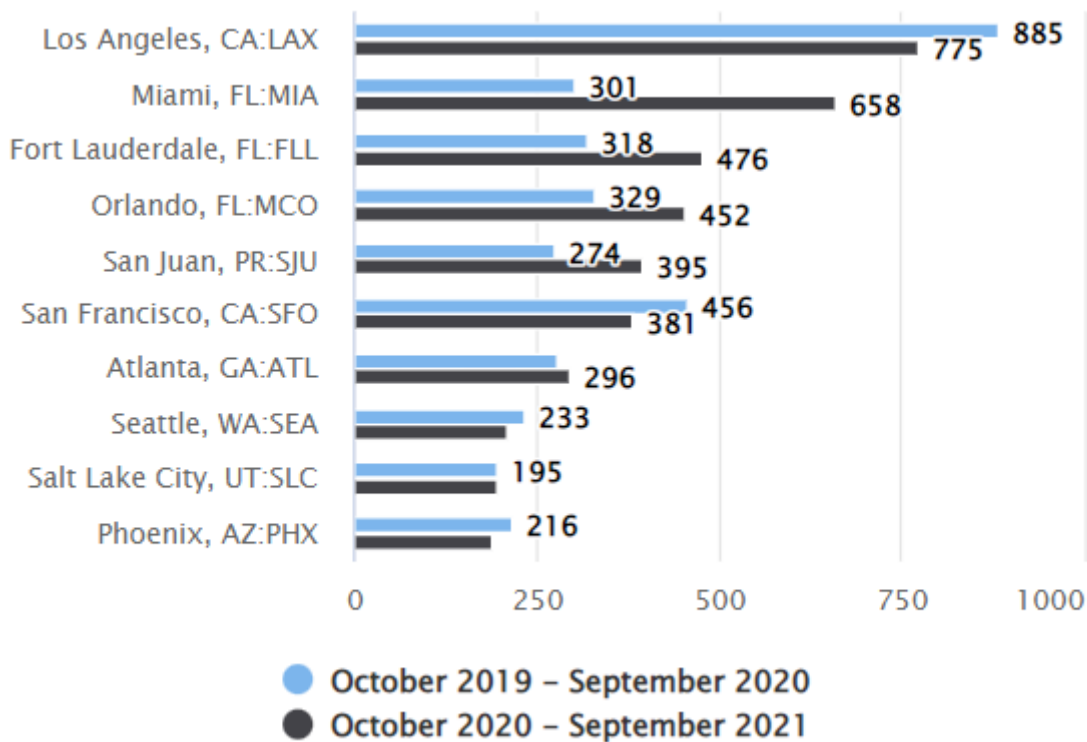
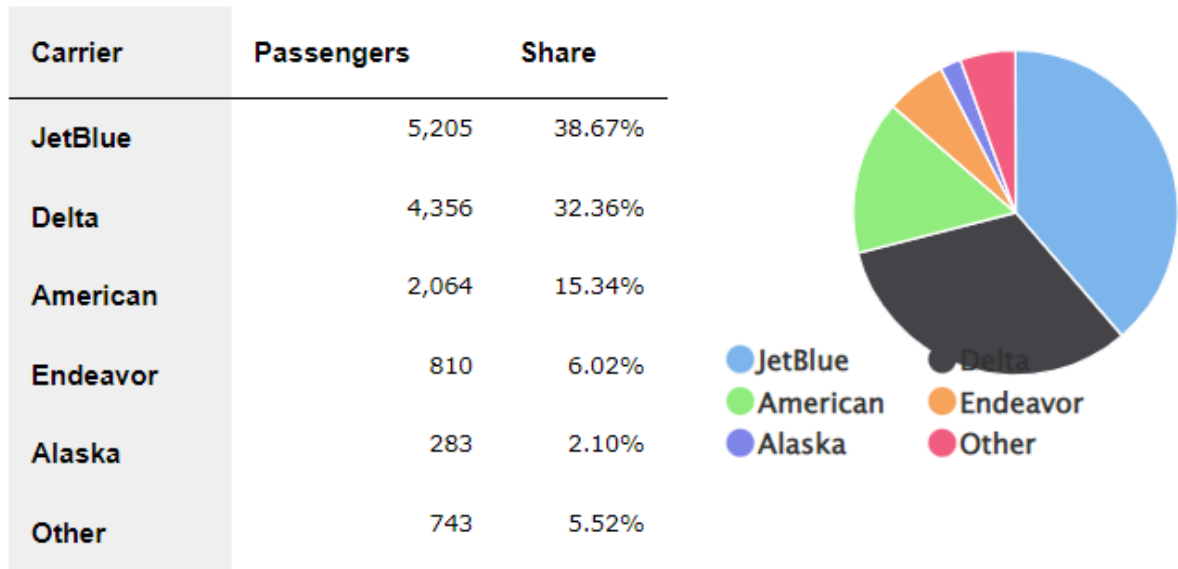


Рисунок 4.2 – Приклад демонстрації 10 найбільш завантажених напрямків, які цікавлять пасажирів

На рис. 4.2 можна помітити, що для обраного місяця (вересень 2021 року) надаються сукупні дані про кількість пасажирів у період за останні 11 місяців, в порівнянні з кількістю пасажирів у період за 11 місяців до цього, що дає змогу побачити зміни динаміки попиту клієнтів в суміжні проміжки часу. Окремо для обраного періоду спостережень можна побачити розподіл за перевізниками (авіакомпаніями) (див. рис. 4.3), сумарну кількість пасажирів у поточному році в порівнянні з минулими роками (див. рис. 4.4), сумарну статистику польотів, кількості пасажирів і ваги перевезених вантажів (див. рис. 4.5), а також порівняння частоти затримок рейсів для обраного аеропорту і середньої частоти затримок по країні (див. рис. 4.6) [8].



Based on enplaned passengers(000) both arriving and departing.

Рисунок 4.3 – Розподіл пасажирів між перевізниками

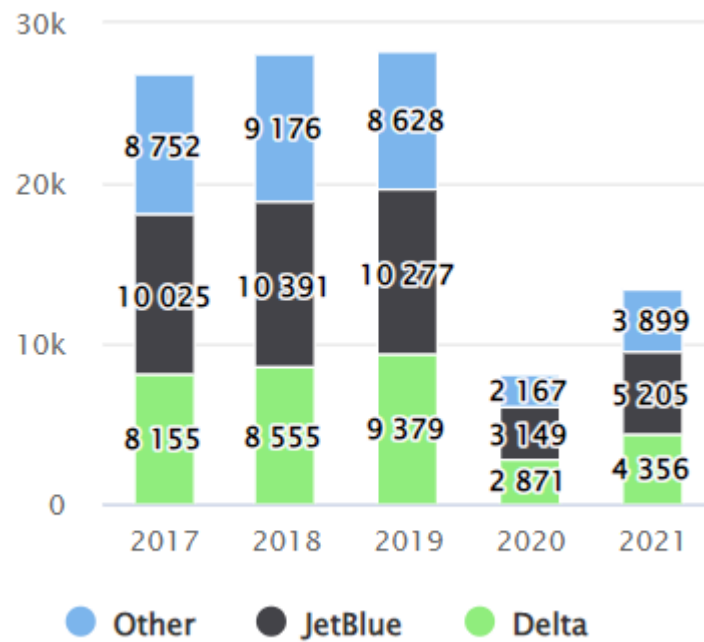


Рисунок 4.4 – Кількість пасажирів авіакомпаній у різні роки

| Passengers* | 2020** | 2021** | %Chg | Rank*** |
|---|---------------|---------------|-------------|----------------|
| Arrival | 6,772k | 6,763k | -0.14% | 23 |
| Departure | 6,779k | 6,697k | -1.21% | 23 |
| Scheduled Flights | | | | |
| Departures | 76,778 | 68,137 | -11.25% | 25 |
| Freight/Mail (lb.) (Scheduled and Non-Scheduled) | | | | |
| Total | 778m | 1,059m | 36.20% | 14 |
| Carriers | | | | |
| Scheduled | 16 | 16 | 0.00% | |

Рисунок 4.5 – Приклад сумарної статистики за обраний період спостережень

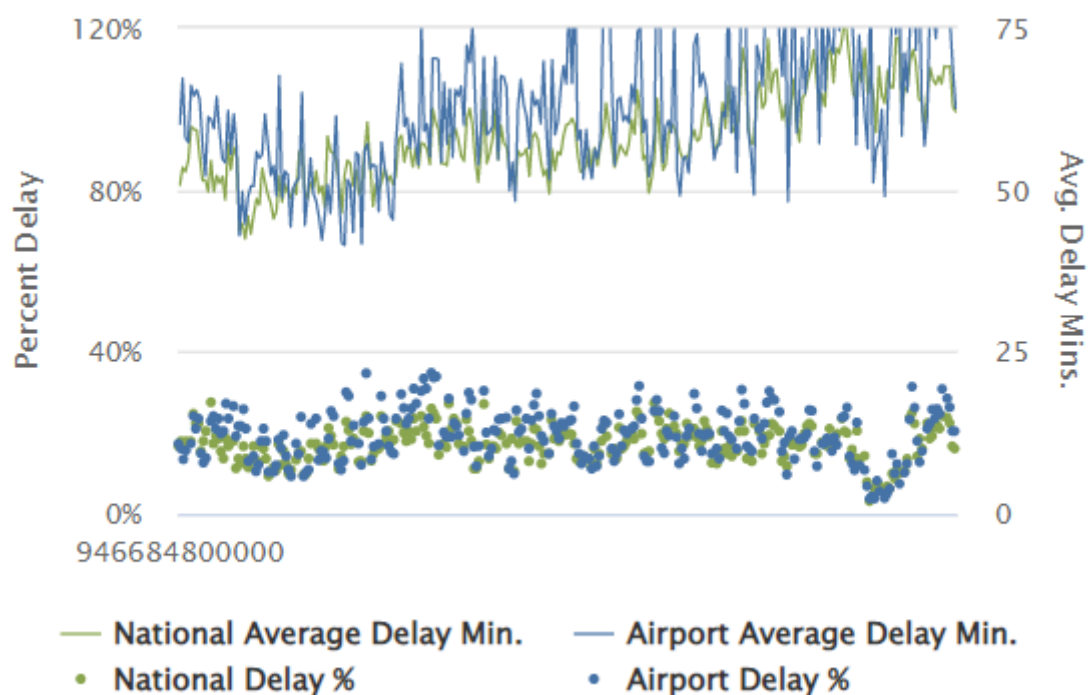


Рисунок 4.6 – Діаграма частоти затримок рейсів

Бюро Транспортної Статистики зберігає накопичені дані у вигляді інтерактивного архіву, що на даний момент містить понад 720 тисяч записів.

(див. рис. 4.7). Також їх можна експортувати в вигляді набору даних для програмної обробки (див. рис. 4.8) [8].

| data_dte | usg_apt | fg_apt | carrier | carriergroup | type | Scheduled |
|------------|---------|--------|---------|--------------|------------|-----------|
| 06/01/2022 | JFK | CDG | AF | 0 | Passengers | 90,694 |
| 06/01/2022 | JFK | LHR | BA | 0 | Passengers | 77,006 |
| 06/01/2022 | DFW | CUN | AA | 1 | Passengers | 72,264 |
| 06/01/2022 | IAH | CUN | UA | 1 | Passengers | 71,118 |
| 06/01/2022 | JFK | LHR | VS | 0 | Passengers | 66,389 |
| 06/01/2022 | DFW | LHR | AA | 1 | Passengers | 60,843 |
| 06/01/2022 | ATL | CUN | DL | 1 | Passengers | 60,628 |
| 06/01/2022 | EWR | LHR | UA | 1 | Passengers | 58,079 |
| 06/01/2022 | JFK | IST | TK | 0 | Passengers | 57,754 |

Рисунок 4.7 – Архів записів Бюро Транспортної Статистики

```
"2005", "4", "15304", "TPA", "33", "16217", "YUL", "941", "19531",
"2006", "3", "14262", "PSP", "91", "16229", "YVR", "906", "20229",
"2005", "7", "10397", "ATL", "34", "14153", "PLS", "281", "19790",
"2002", "2", "12478", "JFK", "22", "12395", "IST", "679", "19790",
"2006", "5", "12892", "LAX", "91", "12972", "LHR", "493", "19682",
"2002", "8", "14100", "PHL", "23", "13180", "MBJ", "243", "19549",
"2006", "2", "12266", "IAH", "74", "13252", "MEX", "148", "19554",
"2007", "6", "10721", "BOS", "13", "10752", "BRU", "409", "19704",
"2004", "4", "13487", "MSP", "63", "12651", "KEF", "439", "20344",
"2005", "5", "10559", "BFI", "93", "16007", "YBL", "906", "20270",
"2002", "9", "13303", "MIA", "33", "11915", "GIG", "316", "19567",
"2006", "12", "13303", "MIA", "33", "12073", "HAV", "219", "20401",
"2009", "3", "13198", "MCI", "64", "16271", "YYZ", "936", "20206",
"2010", "6", "11298", "DFW", "74", "11988", "GRU", "316", "19805",
"2003", "10", "13303", "MIA", "33", "11907", "GGT", "204", "20414",
"2007", "8", "13303", "MIA", "33", "13180", "MBJ", "243", "19549",
"2009", "7", "10397", "ATL", "34", "11874", "GDL", "148", "21294",
"2008", "9", "13204", "MCO", "33", "13605", "NAS", "204", "20366",
"2002", "5", "12478", "JFK", "22", "11915", "GIG", "316", "19567",
"2003", "7", "10559", "BFI", "93", "15999", "YAZ", "906", "20345",
"2004", "1", "11057", "CLT", "36", "11244", "CZM", "148", "20355",
"2006", "10", "11697", "FLL", "33", "15147", "TCB", "204", "20286",
"2006", "8", "12478", "JFK", "22", "15258", "TLV", "636", "20391",
```

Рисунок 4.8 – Представлення архіву даних в форматі JSON

4.2 Вибір засобів розробки інтелектуальної системи

Нейронні мережі складаються з різних шарів, з'єднаних один з одним, що є подібним до структури та функцій людського мозку. Вони вивчають величезні масиви даних і використовують складні алгоритми для створення нейронних зв'язків [9].

Кілька типів нейронних мереж можуть допомогти вирішити різні бізнес-проблеми [9]:

- нейронні мережі прямого зв'язку: використовуються для загальних проблем регресії та класифікації;
- згорткові нейронні мережі: використовуються для виявлення об'єктів і класифікації зображень;
- мережі глибоких переконань: використовуються в секторах охорони здоров'я для виявлення раку;
- рекурентні нейронні мережі: використовуються для розпізнавання мовлення, розпізнавання голосу, прогнозування часових рядів і обробки природної мови.

Оскільки метою даної роботи є створення інтелектуальної системи, що призначена для прогнозування попиту на авіаційні перевезення, то з вищезазначеного переліку можна окремо виділити рекурентні нейронні мережі, однією з галузей застосування яких є прогнозування.

Рекурентні нейронні мережі працюють за принципом збереження виходу певного шару та передачі його назад на вхід, щоб передбачити вихід шару [10].

Вузли на різних рівнях нейронної мережі стискаються, щоб утворити один шар рекурентних нейронних мереж. А, В і С — параметри мережі (див. рис. 4.9) [10].

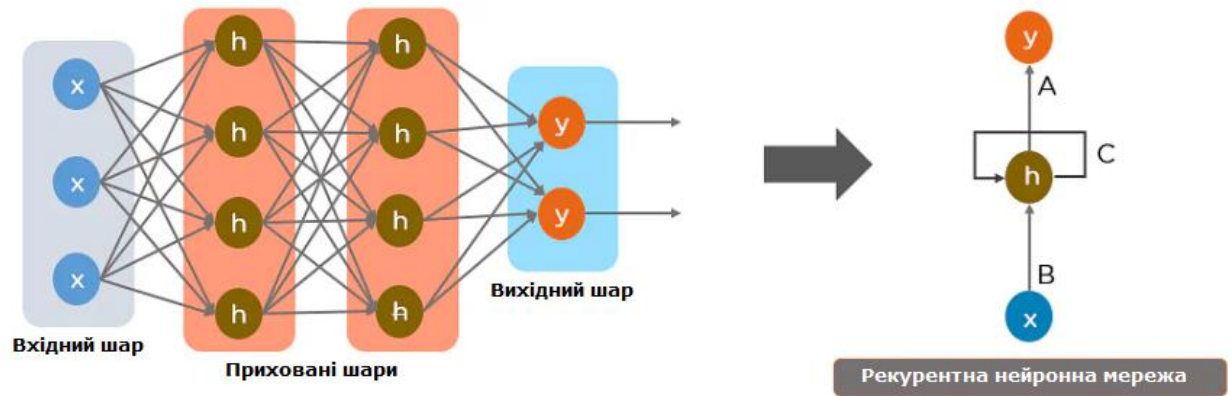


Рисунок 4.9 – Схема простої рекурентної нейронної мережі

Тут «x» — вхідний шар, «h» — прихований шар, а «y» — вихідний шар. A, B і C — параметри мережі, які використовуються для покращення виходу моделі. У будь-який момент часу t поточний вхідний сигнал є комбінацією вхідного сигналу в $x(t)$ і $x(t-1)$. Вихідні дані в будь-який момент часу повертаються в мережу для покращення результатів (див. рис. 4.10) [10].

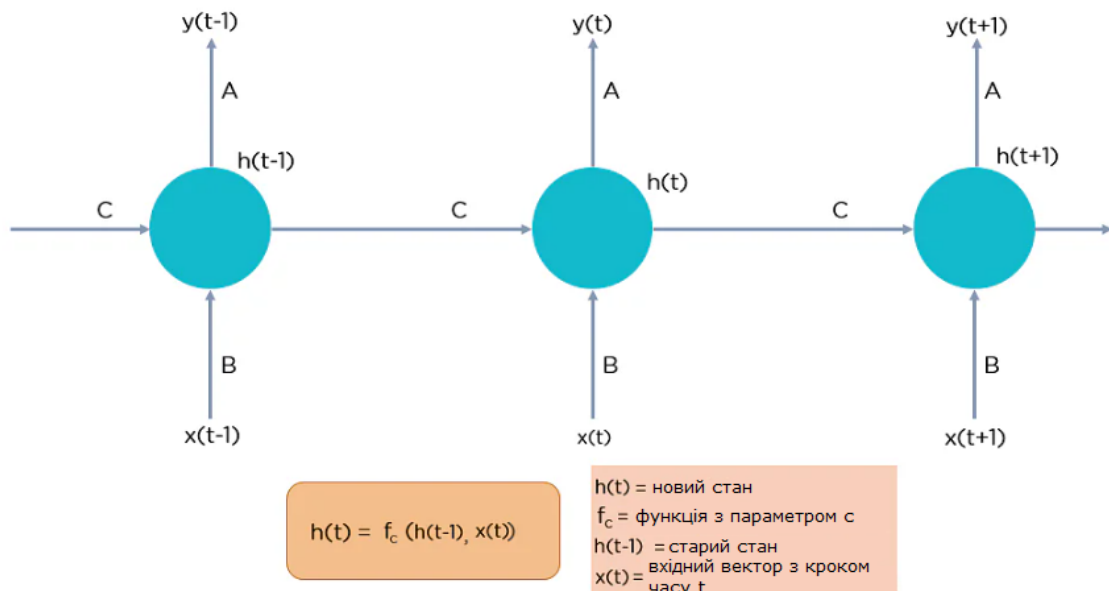


Рисунок 4.10 – Повністю з'єднана рекурентна нейронна мережа

Існує декілька типів рекурентних нейронних мереж [10].

Рекурентні нейронні мережі були створені, оскільки було кілька проблем із нейронною мережею прямого зв'язку [10]:

- не вдається обробити послідовні дані;
- враховується лише поточний вхід;
- неможливо запам'ятати попередні введення.

Рішенням цих проблем є рекурентні нейронні мережі. Вони можуть обробляти послідовні дані, приймаючи поточні вхідні дані та раніше отримані вхідні дані. Рекурентні нейронні мережі можуть запам'ятовувати попередні введення завдяки своїй внутрішній пам'яті [10].

У рекурентних нейронних мережах інформація проходить циклічно до середнього прихованого шару [11].

Вхідний рівень «x» приймає вхідні дані для нейронної мережі, обробляє їх і передає на середній рівень [11].

Середній шар «h» може складатися з кількох прихованих шарів, кожен зі своїми функціями активації, вагами та упередженнями. Якщо у вас є нейронна мережа, де попередній шар не впливає на різні параметри різних прихованих шарів, тобто нейронна мережа не має пам'яті, тоді ви можете використовувати рекурентну нейронну мережу [11].

Рекурентна нейронна мережа стандартизує різні функції активації, ваги та зміщення, щоб кожен прихований шар мав однакові параметри. Потім, замість створення кількох прихованих шарів, вона створить один і повторить його стільки разів, скільки потрібно [11].

Будь-яку **задачу часових рядів**, як-от прогнозування цін на акції в певному місяці, можна вирішити за допомогою рекурентних нейронних мереж [12, с. 436–444].

Дані часових рядів – це набір точок даних за певний період. Аналіз часових рядів — це метод аналізу даних для отримання корисної статистичної інформації та характеристик. Однією з головних цілей дослідження є прогноз майбутнього попиту. При прогнозуванні з аналізом часових рядів, що є надзвичайно складним, необхідна екстраполяція. Проте прогнозоване значення та пов'язана з ним оцінка невизначеності можуть зробити результат надзвичайно цінним [12, с. 436–444].

Аналіз часових рядів – це метод аналізу набору точок даних за певний період часу. Замість періодичного чи випадкового запису точок даних аналітики часових рядів записують точки даних через узгоджені інтервали протягом встановленого періоду часу [12, с. 436–444].

Хоча дані часових рядів – це інформація, зібрана протягом певного часу, різні типи інформації описують, як і коли ця інформація була зібрана. Наприклад [12, с. 436–444]:

- дані часових рядів: це сукупність спостережень за значеннями, які приймає змінна в різні моменти часу;
- перехресні дані: Дані однієї чи кількох змінних, зібрані одночасно;
- об'єднані дані: це комбінація перехресних даних і даних часових рядів.

Змінна змінюється відповідно до розподілу ймовірностей, показуючи, яке значення може приймати Y і з якою ймовірністю ці значення приймаються [12, с. 436–444].

Аналіз часових рядів має низку застосувань у статистиці, продажах, економіці та багатьох інших сферах. Спільним є техніка, яка використовується для моделювання даних за певний період часу [13].

Причини проведення аналізу часових рядів такі [13]:

- особливості: аналіз часових рядів можна використовувати для відстеження таких функцій, як тренд, сезонність і мінливість;
- прогнозування: аналіз часових рядів може допомогти у прогнозуванні цін на акції. Він використовується, якщо ви хочете знати, чи зросте чи впаде ціна і наскільки вона зросте чи впаде;
- висновки: ви можете передбачити значення та зробити висновки з даних за допомогою аналізу часових рядів.

Нестационарні дані, тобто дані, які постійно коливаються з часом або на які впливає час, аналізуються за допомогою аналізу часових рядів. Оскільки валюта та продажі постійно змінюються, такі галузі, як фінанси, роздрібна торгівля та електронна комерція, часто використовують аналіз часових рядів.

Аналіз фондового ринку, особливо в поєднанні з автоматизованими торговими алгоритмами, є чудовим прикладом аналізу часових рядів у дії [14].

Аналіз часових рядів можна використовувати в [14]:

- вимірювання кількості опадів;
- автоматизована біржова торгівля;
- прогноз промисловості;
- показання температури;
- прогнозування продажів.

Розглянемо приклад даних про пасажирів залізниці за певний проміжок часу. На осі X ми маємо роки, а на осі Y – кількість пасажирів (див. рис. 4.11).

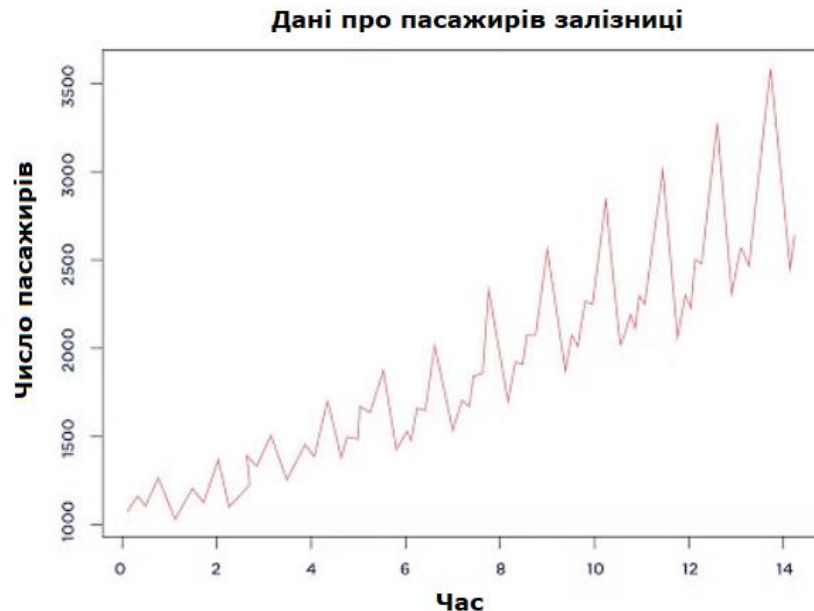


Рисунок 4.11 – Діаграма даних про кількість пасажирів залізниці

З наведених даних можна зробити наступні спостереження:

- тенденція: з плином часу спостерігалася закономірність зростання чи зменшення. Загальна кількість пасажирів з часом зростає;
- сезонність: циклічні шаблони повторюються через певний проміжок часу. У випадку пасажирів залізниці можна побачити циклічний візерунок з високою та низькою точками, який видно протягом усього інтервалу.

Деякі з моделей аналізу часових рядів включають [15]:

- класифікація: ідентифікація та призначення категорії даних;
- підгонка кривої: вона відображає дані на кривій, щоб дослідити зв'язки між змінними в даних;
- описовий аналіз: ідентифікуються закономірності в даних часових рядів, такі як тренди, цикли та сезонні коливання;
- пояснювальний аналіз: намагання зрозуміти дані та взаємозв'язки між ними та причиною та наслідком;
- сегментація: вона розбиває дані на сегменти, щоб виявити базові властивості вихідних даних.

У підсумку зрозуміло, що аналіз часових рядів має широкий спектр застосувань і є однією з найважливіших областей дослідження. Він відіграє важливу роль у моделях прогнозування та значущих статистичних характеристиках.

4.3 Програмна реалізація інтелектуальної системи

В якості мови програмування було обрано Python, з використанням середовища розробки JetBrains PyCharm Community Edition 2019.1.3. До основних бібліотек, що використовуються в програмі, відноситься Pandas, що призначена для аналізу даних та маніпуляцій з ними, а також Darts, для зручного прогнозування та виявлення аномалій у часових рядах.

Мережа має видимий рівень з 1 входом, прихований рівень з 4 блоками або нейронами LSTM і вихідний рівень, який робить прогнозування єдиного значення. Для блоків LSTM використовується стандартна функція активації sigmoid.

Типова комірка LSTM складається з вхідних, вихідних шлюзів, шлюзів забуття і компонента активації комірки. Ці блоки отримують сигнали активації з різних джерел і контролюють активацію комірки за допомогою розроблених

помножувачів. Шлюзи LSTM можуть запобігти решті мережі змінювати вміст комірок пам'яті протягом декількох часових кроків. Мережі LSTM зберігають сигнали та поширюють помилки набагато довше, ніж звичайні RNN. Ці властивості дозволяють мережам LSTM обробляти дані зі складними та розділеними взаємними залежностями та досягати успіхів у ряді областей навчання послідовності.

Вхідний шлюз LSTM визначається як (4.1):

$$g_t^i = \sigma(W_{Igi}x_t + W_{Hgi}h_{t-1} + W_{g^c g^i}g_{t-1}^c + b_{gi}), \quad (4.1)$$

де W_{Igi} це вагова матриця від вхідного шару до вхідного шлюзу, W_{Hgi} це вагова матриця від прихованого шару до вхідного шлюзу, $W_{g^c g^i}$ це вагова матриця від комірки активації до вхідного шлюзу та b_{gi} є зміщенням вхідного шлюзу. Шлюзи забуття визначаються як (4.2):

$$g_t^f = \sigma(W_{Igf}x_t + W_{Hgf}h_{t-1} + W_{g^c gf}g_{t-1}^c + b_{gf}), \quad (4.2)$$

де W_{Igf} це вагова матриця від вхідного шару до шлюзу забуття, W_{Hgf} це вагова матриця від прихованого шару до шлюзу забуття, $W_{g^c gf}$ це вагова матриця від клітини активації до шлюзу забуття та b_{gf} це зміщення шлюзу забуття. Шлюзи клітини визначаються як (4.3):

$$g_t^c = g_t^i \tanh(W_{Igc}x_t + W_{Hgc}h_{t-1} + b_{gc}) + g_t^f g_{t-1}^c, \quad (4.3)$$

де W_{Igc} це вагова матриця від вхідного шару до шлюзу комірки, W_{Hgc} це вагова матриця від прихованого стану до шлюзу клітини та b_{gc} це зміщення воріт клітини. Вихідний шлюз визначається як (4.4):

Кафедра інтелектуальних інформаційних систем
Інтелектуальна система для розширення мережі авіаційних маршрутів

$$g_t^o = \sigma(W_{Ig^o}x_t + W_{Hg^o}h_{t-1} + W_{g^c g^o}g_t^c + b_{g^o}), \quad (4.4)$$

де W_{Ig^o} це вагова матриця від вхідного шару до вихідного шлюзу, W_{Hg^o} це вагова матриця від прихованого стану до вихідного шлюзу, $W_{g^c g^o}$ це вагова матриця від активації комірки до вихідного шлюзу та b_{g^o} є зміщенням вихідного шлюзу. Нарешті, прихований стан обчислюється як (4.5):

$$h_t = g_t^o \tanh(g_t^c). \quad (4.5)$$

Всього було виконано 6 тестів, в яких було створено прогноз попиту на рейси між містом Нью Йорк і шістьма містами США: Лос-Анджелес (Каліфорнія), Орlando (Флорида), Сан Хуан (Пуерто Рико), Форт-Лодердейл (Флорида), Сан-Франциско (Каліфорнія) і Маямі (Флорида). Код програми наведено в додатку А.

4.4 Тестування програми

В першому тесті було спрогнозовано попит на рейси між аеропортами міст Нью Йорк і Лос-Анджелес. Даний напрямок є найбільш популярним серед напрямків внутрішнього ринку з аеропорту Нью Йорка протягом всього часу спостереження (з 2006 по 2022 роки), навіть під час пандемії COVID-19. Динаміка попиту на цей рейс зображена на рисунку 4.12.

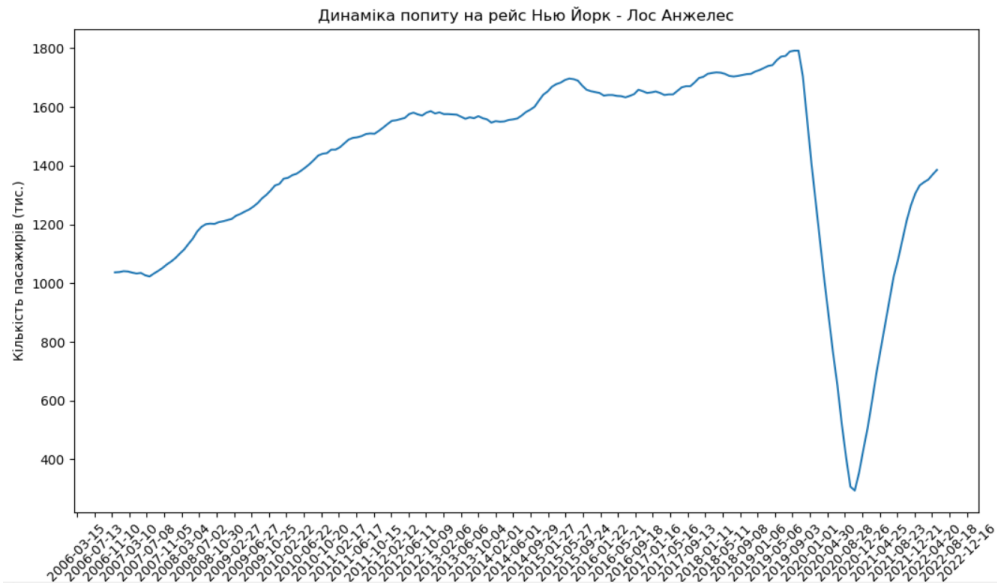


Рисунок 4.12 – Динаміка попиту на рейс Нью Йорк – Лос-Анджелес

На рис. 4.12 можна помітити, що протягом часу спостереження попит на даний напрямок переважно зростав, з короткочасними падіннями, після яких спостерігались нетривалі періоди стабільності попиту, з подальшим зростанням. Проте особливо на даному графіку виділяється період, який за часом відноситься до пандемії COVID-19, з різким падінням попиту до величин, які є мінімальними за весь період спостережень, з подальшим різким зростанням до значення кількості пасажирів у 77,34% від допандемійного рівня (перед початком пандемії і карантину значення кількості пасажирів досягло свого історичного максимуму у 1792 тис. пасажирів, останнє зафіксоване значення склало 1386 тис. пасажирів).

На рис. 4.13 зображено графік попиту на цей рейс з прогнозом на наступні 5 років. Для даного прогнозу не було проведено кореляції для демонстрації проблеми, яка може виникнути при побудові подібних прогнозів. Дана проблема має назву «Проблема зникаючого градієнта». Згідно з літературою, можна отримувати складні шаблони даних у реальному світі, використовуючи сильну нелінійність. Однак це може призвести до того, що рекурентні нейронні мережі страждатимуть від проблеми зникнення градієнта. Ця проблема стосується експоненціального зменшення величин градієнта,

коли вони поширюються назад у часі. Це явище змушує пам'ять мережі ігнорувати довготривалі залежності та навряд чи вивчає кореляцію між віддаленими в часі подіями [16-38].

Особливістю в даному прогнозі є те, що найближчі за часом значення попиту до тих значень, які прогнозуються, відносяться до періодів встановлення і зняття карантинних обмежень. Різке зменшення попиту в даній ситуації пов'язане не з клієнтами, а з обмеженнями, які були введені на загальнодержавному рівні. Так само, різке зростання було пов'язане з явищем відкладеного попиту, що тривало деякий час, доки тренд не змінився на зростання помірно. Це означає, що дані за цей період не можуть розглядатися як дані нормальних умов, оскільки вони виникли внаслідок надзвичайних подій, які не могли бути спрогнозовані за тривалий час до цього. В результаті врахування цих даних у прогнозі на рис. 4.13 можна помітити, що загальний тренд попиту йде на зростання, але на графіку можна помітити викид, де лінія тренду має різке спадання і ще більш різке зростання, які не були помічені за нормальних умов.

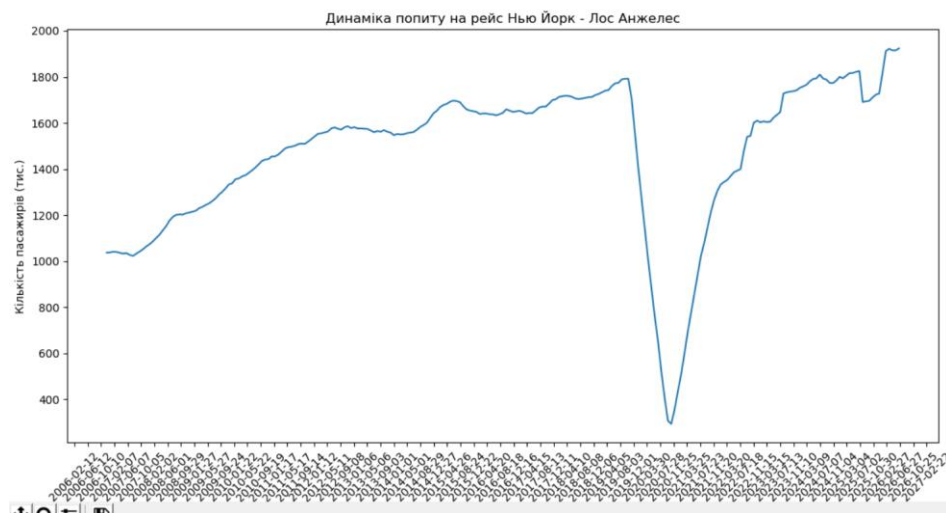


Рисунок 4.13 – Прогноз динаміки попиту без проведення кореляції

На рис. 4.14 наведено основні показники, які стосуються набору даних, для якого зроблено відповідний прогноз. Максимальна кількість пасажирів за

весь час склала 1792 тисяч, максимальна зареєстрована зміна склала 150 тисяч пасажирів (або 8,8%), при середньому значенні 19,63 тисяч (1,1%).

```

Max amount of passengers (thousands) 1792
Max change (in thousands of passengers) 150.0
Max change (in %) 8.8
Medium value of change (in thousands of passengers): 19.63
Medium change (in %) 1.1

```

Рисунок 4.14 – Основні показники спостережень за попитом

На рис. 4.15 наведено графік прогнозу попиту на даний рейс з проведенням кореляції. При проведенні прогнозу ігнорувалися дані, відсоткове значення зміни яких вдвічі перевищує середнє відсоткове значення за період спостережень, як такі, що не можуть бути значеннями при нормальних умовах.

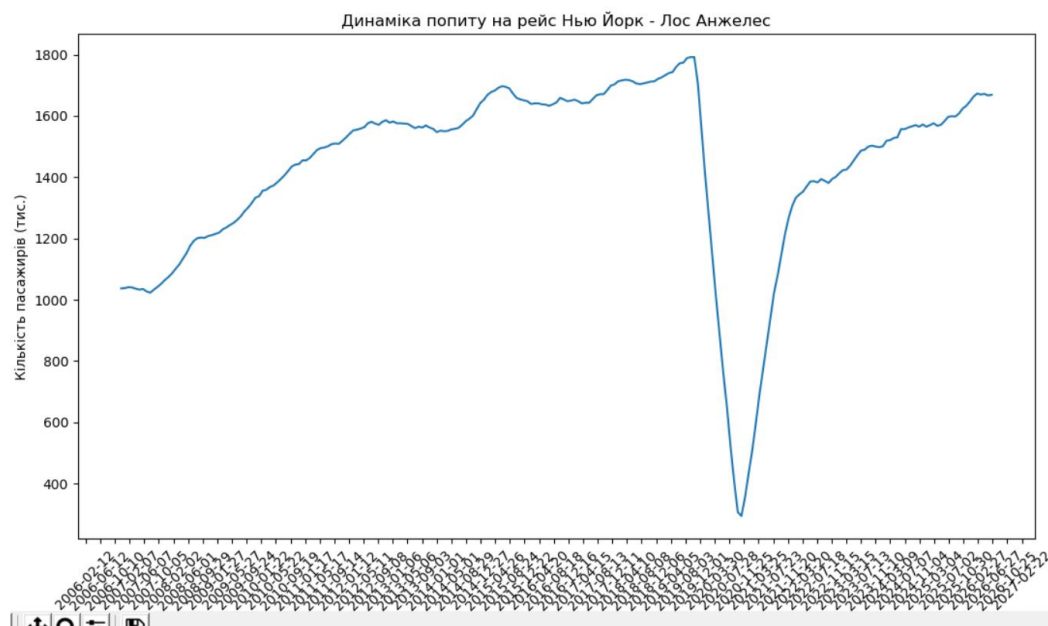


Рисунок 4.15 – Прогноз динаміки попиту з проведенням кореляції

Згідно з прогнозом, який отримано з врахуванням кореляції, спостерігається тренд на подальше зростання попиту з незначними коливаннями, подібними до тих, які були присутні раніше. На даному графіку

не помічено викидів, подібних тим, які були присутні на попередньому графіку, отриманому без проведення кореляції.

З отриманих результатів можна зробити висновок, що в найближчі 5 років попит на рейси між Нью Йорком і Лос-Анджелесом буде поступово зростати, періоди спаду попиту будуть незначними, що може свідчити про сезонні коливання.

В другому тесті наведено прогноз попиту на рейси між аеропортами Нью Йорка і Орландо. На рис. 4.16 зображено динаміку попиту на цей рейс.

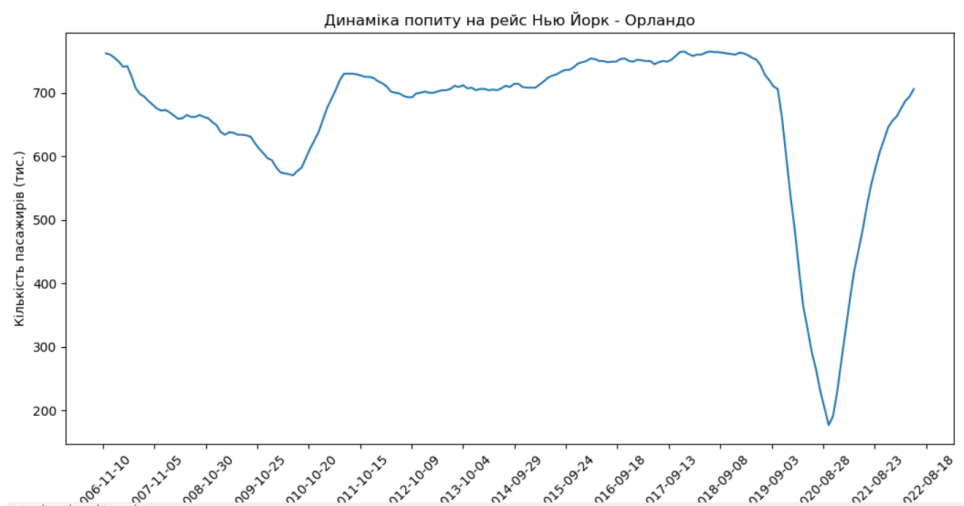


Рисунок 4.16 – Динаміка попиту на рейс Нью Йорк – Орландо

Наведений на рис. 4.16 графік суттєво відрізняється від графіку з рис. 4.12. На початку спостережень присутній значний викид у вигляді різкого зростання попиту після тривалого тренду спадання. Переважну кількість часу спостерігався стабільний рівень попиту на даний напрямок, з незначними змінами, різкими падінням і зростанням під час та після карантину. Останнє зафіксоване значення майже досягло показнику докарантинного рівня. Прогноз для даного напрямку наведено на рис. 4.17.

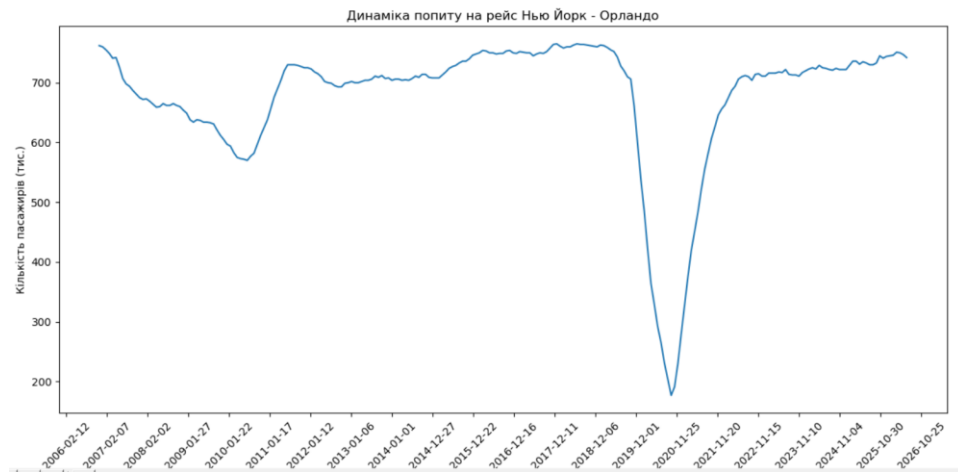


Рисунок 4.17 – Прогноз попиту на рейс Нью Йорк – Орlando

Отримані результати вказують на подальшу стабільність попиту на рейси між Нью Йорком і Орlando, з наявністю незначних коливань на нетривалі проміжки часу.

В третьому тесті наведено прогноз попиту для рейсів між аеропортами Нью Йорка і Сан Хуана (Пуерто Рико). На рис. 4.18 зображено динаміку попиту на цей рейс.

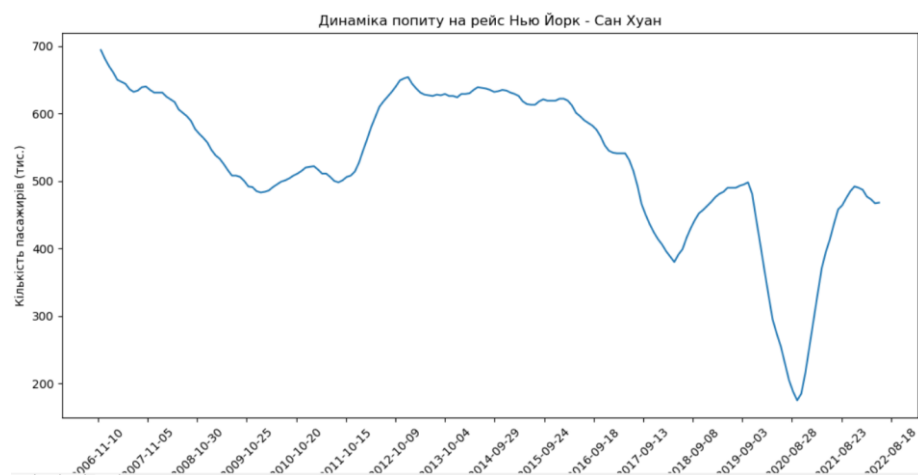


Рисунок 4.18 – Динаміка попиту на рейс Нью Йорк – Сан Хуан

З наведеного на рис. 4.18 графіку можна зробити висновок про доволі нестабільний в порівнянні з попередніми двома тестами попит на даний напрямок, з періодичними суттєвими коливаннями як вгору, так і вниз раз на 2023 р.

кілька років, з періодами відносної стабільності. Рівень попиту в період карантину виділяється менш суттєво, ніж при розгляді попередніх випадків. Прогноз трендів попиту для даного напрямку наведено на рис. 4.19.

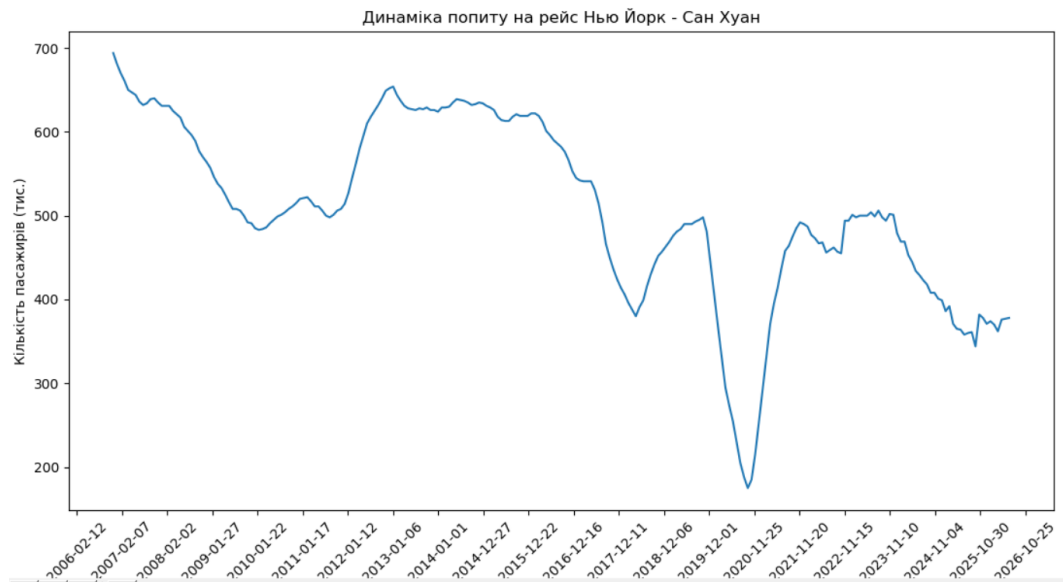


Рисунок 4.19 – Прогноз попиту на рейс Нью-Йорк – Сан-Хуан

З отриманого результату можна зрозуміти, що деякий час рівень попиту залишатиметься на одному рівні, після чого буде тривати тренд на зниження попиту.

В четвертому тесті проводився прогноз попиту для рейсів між Нью-Йорком і Форт-Лодердейлом. На рис. 4.20 зображено динаміку попиту на цей рейс.

Кафедра інтелектуальних інформаційних систем
Інтелектуальна система для розширення мережі авіаційних маршрутів

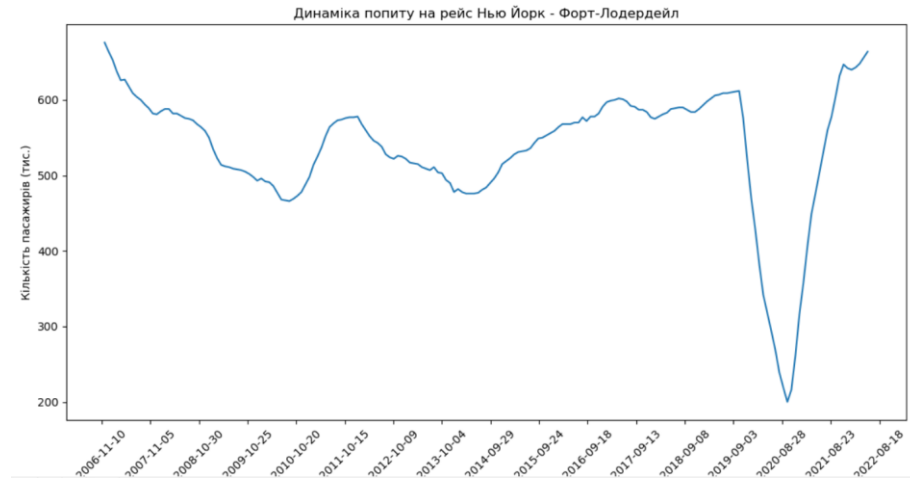


Рисунок 4.20 – Динаміка попиту на рейс Нью Йорк – Форт-Лодердейл

На рис. 4.21 зображено графік з прогнозом подальшого попиту на даний рейс.

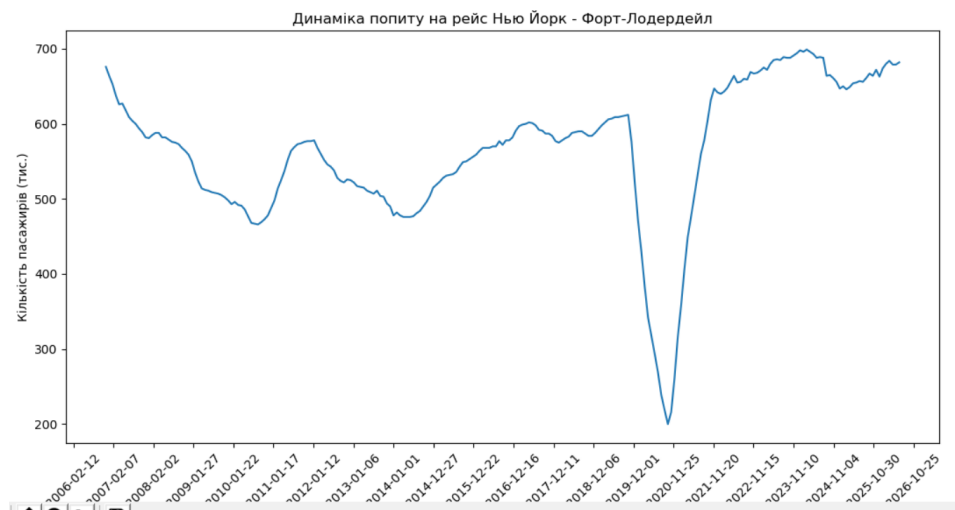


Рисунок 4.21 – Прогноз попиту на рейс Нью Йорк – Форт-Лодердейл

З отриманого прогнозу можна зробити висновок про подальший тренд на зростання попиту зі зміною на більш різкий, проте нетривалий спад, і подальший тренд на зростання попиту пасажирів на даний напрямок.

В п'ятому тесті проведено прогноз попиту рейсів з Нью Йорка до Сан-Франциско. На рис. 4.22 зображено динаміку попиту на даний рейс.

Кафедра інтелектуальних інформаційних систем
Інтелектуальна система для розширення мережі авіаційних маршрутів

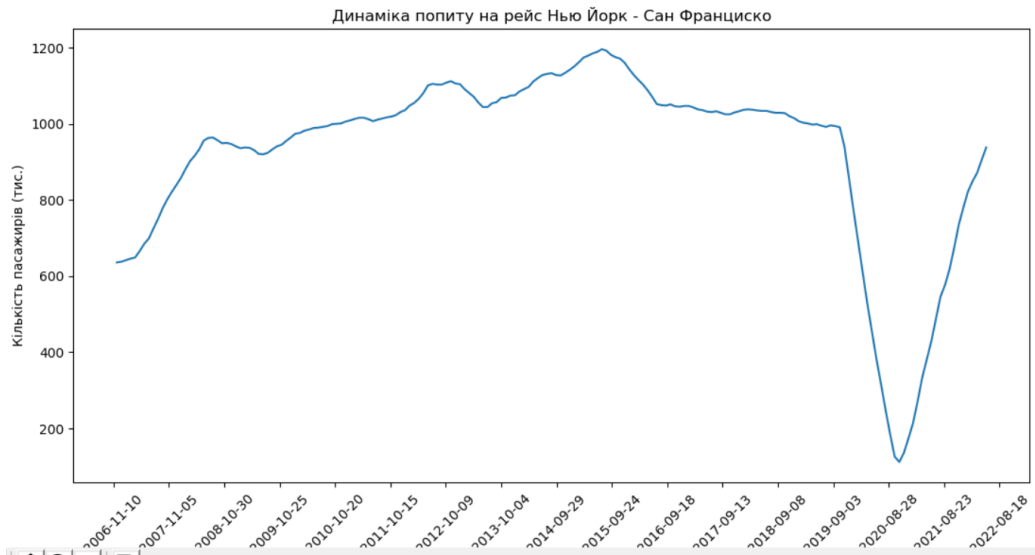


Рисунок 4.22 – Динаміка попиту на рейс Нью Йорк – Сан-Франциско

На рис. 4.23 зображено графік з прогнозом майбутнього попиту на даний рейс.

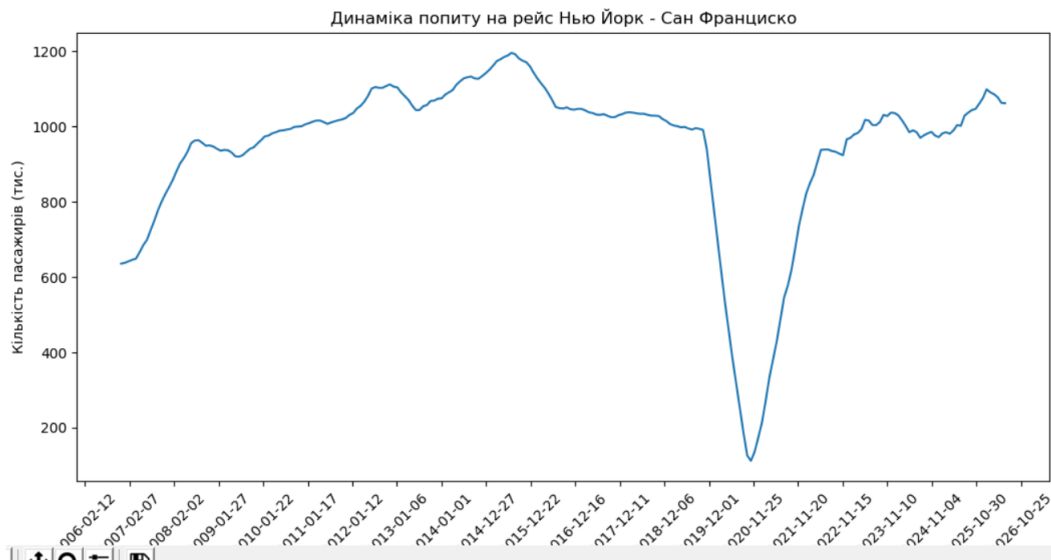


Рисунок 4.23 – Прогноз попиту на рейс Нью Йорк – Сан-Франциско

З отриманого результату можна зробити висновок про коливання попиту на даний рейс в майбутньому, з загальною тенденцією до зростання кількості пасажирів.

В шостому тесті проведений прогноз попиту на рейси з Нью Йорка до Маямі. На рис. 4.24 зображено динаміку попиту на даний рейс. Можна помітити аномальне зростання кількості пасажирів на даному напрямку після зняття більшої частини карантинних обмежень, до величин, які вдвічі перевищують допандемійні. Варто зазначити, що в штаті Флорида, де знаходиться місто Маямі, значна кількість карантинних обмежень була знята раніше, ніж в більшості інших штатів, що може бути поясненням такого надзвичайного росту кількості пасажирів і ажіотажного попиту.

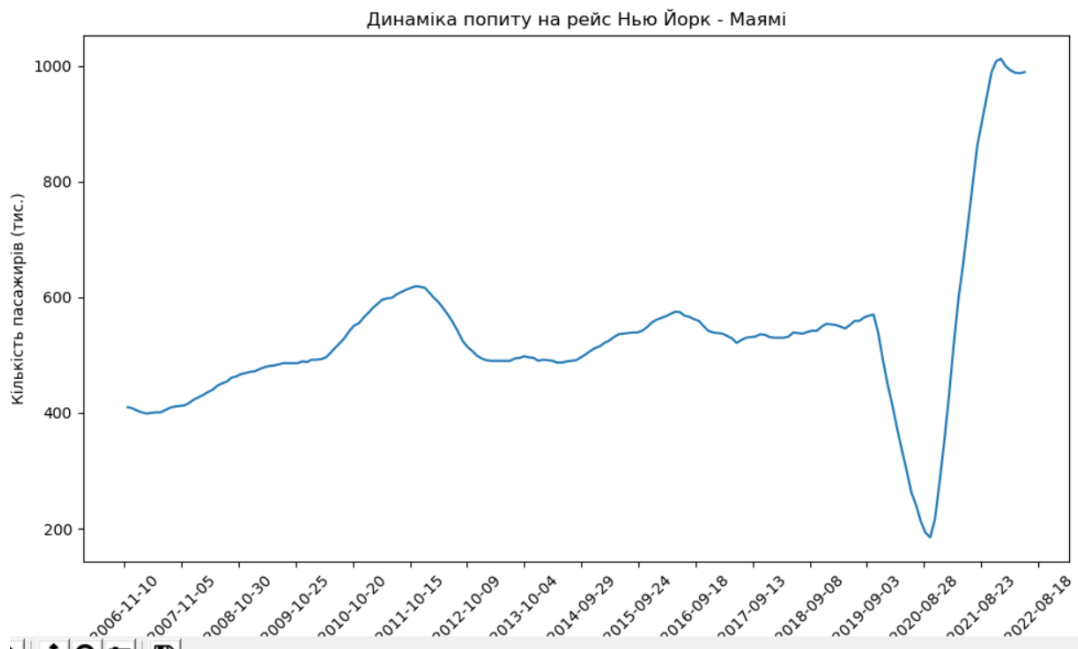


Рисунок 4.24 – Динаміка попиту на рейс Нью Йорк – Маямі

На рис. 4.25 – графік прогнозу майбутнього попиту на рейс Нью Йорк – Маямі.

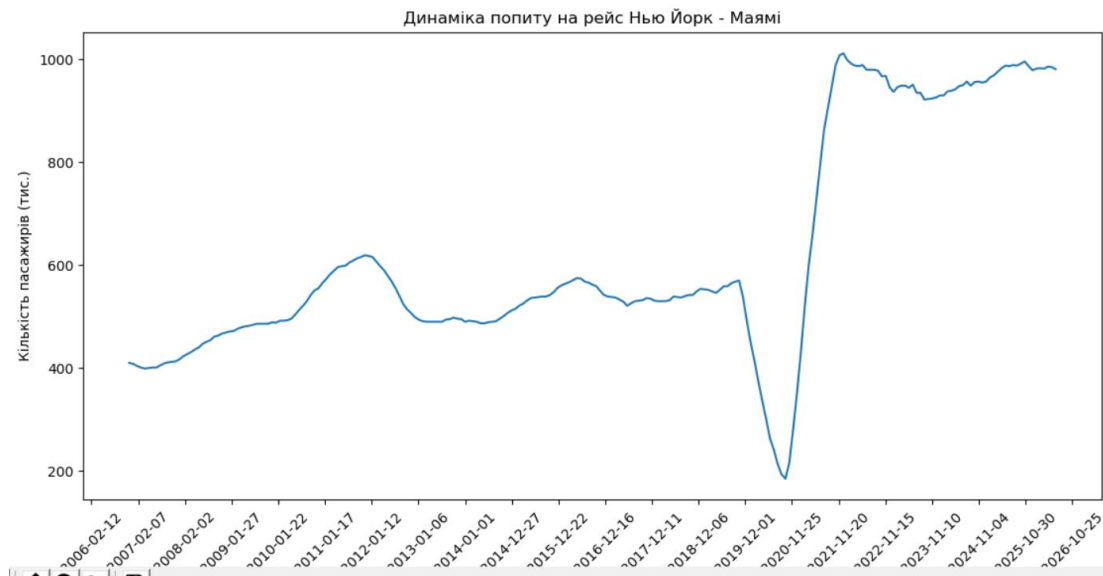


Рисунок 4.26 – Прогноз попиту на рейс Нью Йорк – Маямі

Даний результат прогнозування свідчить про тренд до спаду попиту, що почнеться в найближчому майбутньому, проте загалом кількість пасажирів на даному напрямку залишатиметься на досить високому рівні.

Висновки до розділу 4

В даному розділі вирішувалася основна задача даної роботи – проведення прогнозу динаміки пасажирського попиту на обрані авіаційні маршрути, з метою визначення потенційної прибутковості або збитковості.

Для розв'язання поставленої задачі як засіб розробки було обрано рекурентну нейронну мережу з архітектурою LSTM, що має кілька шарів: видимий рівень з 1-м входом, прихований рівень з 4-ма блоками і вихідний рівень, в якому робиться прогнозування єдиного значення. Для блоків використовується стандартна функція активації сигмоїд.

В якості мови програмування обрано Python, середовище розробки – PyCharm, до основних бібліотек, які використані в програмі, відносяться Pandas і Darts. Код програми наведено в додатку А.

Всього було проведено 6 тестів, в яких створювався прогноз щодо попиту на рейси між містом Нью Йорк та 6-ма містами США: Лос-Анджелес,

Орландо, Сан Хуан, Форт-Лодердейл, Сан-Франциско і Маямі. Було визначено, що попит на 3-х напрямках в майбутньому зростатиме, на одному напрямку зафіксовано тренд спаду, ще на двох напрямках зафіксовано прогноз стабільності попиту. Отримані результати показують можливість рекурентної нейронної мережі передбачити майбутній попит на конкретні напрямки авіаційних перевезень з високим рівнем точності, що свідчить про рівень ефективності даного методу для розв'язання задач подібного типу.

ВИСНОВКИ

Під час виконання магістерської кваліфікаційної роботи використовувалися методи інтелектуального аналізу даних, а також методи інтелектуального прогнозування на основі даних з навчальної вибірки. Було проведено дослідження попиту пасажирів і трендів на їх змінення, проаналізовані різні чинники, що впливають на ці зміни, а також створено інтелектуальну систему для прогнозування подальшого тренду попиту за допомогою рекурентної нейронної мережі.

Метою дослідження було підвищення ефективності розширення мережі авіаційних маршрутів методом створення інтелектуальної системи для прогнозу динаміки попиту на рейси між аеропортами.

Для досягнення встановленої мети було виконано наступні завдання:

- досліджено особливості діяльності авіаційної галузі на різних ринках та при різних економічних умовах;
- проведено аналіз та узагальнення існуючих моделей та підходів, що використовуються для розширення мережі авіаційних маршрутів;
- проведено моделювання різних сценаріїв впровадження нових маршрутів в авіаційній галузі;
- розроблено інтелектуальну систему для розширення мережі авіаційних маршрутів на базі рекурентної нейронної мережі;
- проведено дослідження ефективності інтелектуальної системи для розширення мережі авіаційних маршрутів.

В першому розділі було проаналізовано основні моменти дослідження, проведеного Федеральним Управлінням Авіації США (Federal Aviation Administration, FAA), яке розробило ряд припущень і прогнозів, які відповідають новим тенденціям і структурним змінам, що відбуваються в авіаційній галузі.

В другому розділі розглянуто декілька моделей, щодо яких було проведено дослідження динамік клієнтського попиту, порівняння кількості

дохідних пасажирських миль і порівняння кількості доступних посадкових миль – на внутрішньому американському і міжнародному ринках.

В третьому розділі була висвітлена проблема невизначеності при створенні прогнозів. Розглянуто альтернативні прогнози щодо кількості посадок літаків, кількості дохідних пасажирських миль, пропускної спроможності, коефіцієнту завантаженості, а також прибутковості.

В четвертому розділі вирішувалася основна задача роботи – проведення прогнозу динаміки пасажирського попиту на обрані авіаційні маршрути, з метою визначення потенційної прибутковості або збитковості. Для розв'язання поставленої задачі як засіб розробки було обрано рекурентну нейронну мережу з архітектурою LSTM. Отримані результати показують можливість рекурентної нейронної мережі передбачити майбутній попит на конкретні напрямки авіаційних перевезень з високим рівнем точності, що свідчить про рівень ефективності даного методу для розв'язання задач подібного типу.

У спеціальній методичній частині магістерської кваліфікаційної роботи було використано навички з дисципліни «Нейромеревеві методи обчислювального інтелекту» для створення практичних робіт. Було створено практичну роботу на тему «Вибір літака для оновлення системи повітряного транспорту. Багатокритеріальна проблема прийняття рішень. Метод АНР». Визначено мету та завдання практичної роботи. Наведено короткі теоретичні відомості з досліджуваного питання та приклад виконання практичного завдання.

У спеціальній частині з охорони праці та безпеки при надзвичайних ситуаціях проводився розрахунок ергономічної оцінки робочого місця оператора на підприємстві. Були описані основні заходи безпеки, яких варто дотримуватися в разі терористичного акту, а також захоплення будівлі. Описано заходи безпеки під час проведення евакуації з будівлі закладу освіти, описано заходи, які мають бути вжиті педагогами в даній ситуації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Federal Aviation Administration. FAA Aerospace Forecast URL: https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/2022-06/FY2022_42_FAA_Aerospace_Forecast.pdf (дата звернення: 19.12.2022).
2. Exception for Limited Recreational Operations of Unmanned Aircraft. Federal Register URL: <https://www.federalregister.gov/documents/2019/05/17/2019-10169/exception-for-limited-recreational-operations-of-unmanned-aircraft> (дата звернення: 19.12.2022).
3. National Academy of Public Administration: Federal Aviation Administration; Assessment of Compliance with and Effectiveness of Registration for Small Unmanned Aircraft URL: <https://napawash.org/academy-studies/federal-aviation-administration-assessment-of-compliance-with-and-effective> (дата звернення: 19.12.2022).
4. Federal Aviation Administration. Operations Over People General Overview URL: https://www.faa.gov/uas/commercial_operators/operations_over_people (дата звернення: 19.12.2022).
5. MITRE. Threaded Track: Geospatial Data Fusion for Aircraft Flight Trajectories URL: <https://www.mitre.org/news-insights/publication/threaded-track-geospatial-data-fusion-aircraft-flight-trajectories> (дата звернення: 19.12.2022)
6. National Aeronautics and Space Administration. NASA Embraces Urban Air Mobility, Calls for Market Study URL: <https://www.nasa.gov/aero/nasa-embraces-urban-air-mobility> (дата звернення: 19.12.2022)
7. Joby Aviation. Joby Completes Flight of More Than 150 Miles with Electric Vertical Take-Off Air Taxi URL: <https://www.jobyaviation.com/news/joby-completes-flight-of-more-than-150-miles/> (дата звернення: 19.12.2022)

8. Bureau of Transportation Statistics. TranStats URL: <https://www.transtats.bts.gov/airports.asp> (дата звернення: 19.12.2022)
9. Simplilearn. A Complete Guide To Get A Grasp Of Time Series Analysis URL: <https://www.simplilearn.com/tutorials/statistics-tutorial/what-is-time-series-analysis> (дата звернення: 19.12.2022)
10. Simplilearn. Recurrent Neural Network (RNN) Tutorial URL: <https://www.simplilearn.com/tutorials/deep-learning-tutorial/rnn> (дата звернення: 19.12.2022)
11. Hojjat Salehinejad and etc. Recent Advances in Recurrent Neural Networks URL: <https://arxiv.org/pdf/1801.01078.pdf> (дата звернення: 19.12.2022)
12. Y. LeCun, Y. Bengio, and G. Hinton, “Deep learning,” *Nature*, vol. 521, no. 7553, pp. 436–444, 2015.
13. G. E. Hinton, S. Osindero, and Y.-W. Teh, “A fast learning algorithm for deep belief nets,” *Neural computation*, vol. 18, no. 7, pp. 1527–1554, 2006.
14. Y. Bengio, N. Boulanger-Lewandowski, and R. Pascanu, “Advances in optimizing recurrent networks,” in *Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 2013 IEEE International Conference on*. IEEE, 2013, pp. 8624–8628.
15. Y. Bengio, P. Simard, and P. Frasconi, “Learning long-term dependencies with gradient descent is difficult,” *IEEE transactions on neural networks*, vol. 5, no. 2, pp. 157–166, 1994.
16. I. Sutskever, J. Martens, and G. E. Hinton, “Generating text with recurrent neural networks,” in *Proceedings of the 28th International Conference on Machine Learning (ICML-11)*, 2011, pp. 1017–1024.
17. T. Mikolov, A. Joulin, S. Chopra, M. Mathieu, and M. Ranzato, “Learning longer memory in recurrent neural networks,” *arXiv preprint arXiv:1412.7753*, 2014.
18. S. Haykin, *Neural networks: a comprehensive foundation*. Prentice Hall PTR, 1994.

19. T. Mikolov, M. Karafi'at, L. Burget, J. Cernock `y, and S. Khudanpur, "Recurrent neural network based language model." in Interspeech, vol. 2, 2010, p. 3.
20. I. Sutskever, J. Martens, G. Dahl, and G. Hinton, "On the importance of initialization and momentum in deep learning," in International conference on machine learning, 2013, pp. 1139–1147.
21. Y. Bengio, Y. LeCun et al., "Scaling learning algorithms towards ai," Large-scale kernel machines, vol. 34, no. 5, pp. 1–41, 2007.
22. A. Krizhevsky, I. Sutskever, and G. E. Hinton, "Imagenet classification with deep convolutional neural networks," in Advances in neural information processing systems, 2012, pp. 1097–1105.
23. I. Sutskever, "Training recurrent neural networks," University of Toronto, Toronto, Ont., Canada, 2013.
24. R. J. Williams and D. Zipser, "Gradient-based learning algorithms for recurrent networks and their computational complexity," Backpropagation: Theory, architectures, and applications, vol. 1, pp. 433–486, 1995.
25. G. V. Puskorius and L. A. Feldkamp, "Neurocontrol of nonlinear dynamical systems with kalman filter trained recurrent networks," IEEE Transactions on neural networks, vol. 5, no. 2, pp. 279–297, 1994.
26. S. Ma and C. Ji, "A unified approach on fast training of feedforward and recurrent networks using em algorithm," IEEE transactions on signal processing, vol. 46, no. 8, pp. 2270–2274, 1998.
27. L.-W. Chan and C.-C. Szeto, "Training recurrent network with blockdiagonal approximated levenberg-marquardt algorithm," in Neural Networks, 1999. IJCNN'99. International Joint Conference on, vol. 3. IEEE, 1999, pp. 1521–1526.
28. S. Ruder, "An overview of gradient descent optimization algorithms," arXiv preprint arXiv:1609.04747, 2016.

29. R. Pascanu, T. Mikolov, and Y. Bengio, “On the difficulty of training recurrent neural networks,” in International Conference on Machine Learning, 2013, pp. 1310–1318.
30. P. J. Werbos, “Backpropagation through time: what it does and how to do it,” Proceedings of the IEEE, vol. 78, no. 10, pp. 1550–1560, 1990.
31. Q. V. Le, N. Jaitly, and G. E. Hinton, “A simple way to initialize recurrent networks of rectified linear units,” arXiv preprint arXiv:1504.00941, 2015.
32. J. A. P´erez-Ortiz, F. A. Gers, D. Eck, and J. Schmidhuber, “Kalman filters improve lstm network performance in problems unsolvable by traditional recurrent nets,” Neural Networks, vol. 16, no. 2, pp. 241–250, 2003.
33. T. Mikolov and G. Zweig, “Context dependent recurrent neural network language model.” SLT, vol. 12, pp. 234–239, 2012.
34. Y. A. LeCun, L. Bottou, G. B. Orr, and K.-R. M ¨uller, “Efficient backprop,” in Neural networks: Tricks of the trade. Springer, 2012, pp. 9–48.
35. B. T. Polyak, “Some methods of speeding up the convergence of iteration methods,” USSR Computational Mathematics and Mathematical Physics, vol. 4, no. 5, pp. 1 17, 1964.
36. A. Cotter, O. Shamir, N. Srebro, and K. Sridharan, “Better mini-batch algorithms via accelerated gradient methods,” in Advances in neural information processing systems, 2011, pp. 1647–1655.
37. J. Martens and I. Sutskever, “Training deep and recurrent networks with hessian free optimization,” Neural networks: Tricks of the trade, pp. 479–535, 2012.
38. Y. Bengio, P. Lamblin, D. Popovici, and H. Larochelle, “Greedy layerwise training of deep networks,” in Advances in neural information processing systems, 2007, pp. 153–160.
39. Loh, H. S., 2020, Airport selection criteria of low-cost carriers: A fuzzy analytical hierarchy process, Journal of Air Transport Management, 83,101759.
40. Du, Y., 2020, Decision-making method of heavy-duty machine tool remanufacturing based on AHP-entropy weight and extension theory, Journal of Cleaner Production, 252, 119607.

41. Batouei, A., 2020, Components of airport experience and their roles in eliciting passengers' satisfaction and behavioral intentions, *Research in Transportation Business & Management*, 37, 100585.
42. Celik, E. and Akyuz, E., 2018, An interval type-2 fuzzy AHP and TOPSIS methods for decision-making problems in maritime transportation engineering: the case of ship loader, *Ocean Engineering*, 155, 371-381.
43. Zaim, H., 2009, Analysing business competition by using ahp weighted topsis method: An example of turkish domestic aviation industry, in *International Symposium on Sustainable Development*, Citeseer.
44. Liu, Y., Eckert, C. M. and Earl, C., 2020, A review of fuzzy AHP methods for decisionmaking with subjective judgments, *Expert Systems with Applications*, 113738.
45. Janic, M. and Reggiani, A., 2002, An application of the multiple criteria decision making (MCDM) analysis to the selection of a new hub airport, *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, 2(2/3), 121-134.
46. Pamucar, D., 2021, Multi-criteria decision analysis towards robust service quality measurement, *Expert Systems with Applications*, 170, 114508.
47. Bakioglu, G. and Atahan, A. O., 2021, AHP integrated TOPSIS and VIKOR methods with Pythagorean fuzzy sets to prioritize risks in self-driving vehicles, *Applied Soft Computing*, 99, 106948.
48. Saaty, T. L., 2004, Decision making—the analytic hierarchy and network processes (AHP/ANP), *Journal of systems science and systems engineering*, 13(1), 1 35.
49. Zhou, H., Y. Li, and Y. Gu., 2021, Research on evaluation of airport service quality based on improved AHP and Topsis methods. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers Transport*. Thomas Telford Ltd.
50. Освітній Омбудсмен України. Дії учасників освітнього процесу в разі надзвичайних ситуацій URL: <https://eo.gov.ua/dii-uchasnykiv-osvitnoho-protsesu-v-razi-nadzvychaynykh-sytuatsiy/2022/01/18/> (дата звернення: 19.12.2022)