

Український державний університет залізничного транспорту

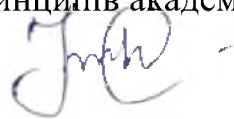
Кафедра управління експлуатаційною роботою

УДОСКОНАЛЕННЯ ПЕРЕВЕЗЕНЬ ПАСАЖИРІВ ШВИДКІСНИМИ І
ЗВИЧАЙНИМИ ПОЇЗДАМИ НА ОСНОВІ МЕТОДІВ АНАЛІЗУ СКЛАДНИХ
МЕРЕЖ

Пояснювальна записка та розрахунки
до кваліфікаційної роботи

УППШ3.300.00.00.000 ПЗ

Розробив студент групи 221 –ОПУТ –Д23
спеціальності 275/275.02 – Транспортні
технології (на залізничному транспорті)
(роботу виконано самостійно, відповідно до
принципів академічної доброчесності)



Богдан ХЛИБИШИН

Керівник: професор, докт. техн. наук
Андрій ПРОХОРЧЕНКО

Рецензент: професор, докт. техн. наук
Олександр ОГАР

2025

АНОТАЦІЯ

Дана кваліфікаційна робота включає в себе 15 слайдів презентації, 72 аркуші пояснювальної записки формату А4, що включає 15 рисунків, 25 літературних джерел.

Ключові слова: ПЕРЕВЕЗЕННЯ ПАСАЖИРІВ, ШВИДКІСНИЙ ПОЇЗД, АНАЛІЗ СКЛАДНИХ МЕРЕЖ.

Об'єктом дослідження є процес перевезень пасажирів на залізничному транспорті України.

Метою дослідження є підвищення ефективності перевезень пасажирів швидкісними і звичайними поїздами на основі методів аналізу складних мереж з метою виявлення структурних закономірностей, що впливають на синхронізацію, надійність та ефективність пасажирських потоків. Це дозволить оптимізувати маршрути руху поїздів, зменшити час пересадок, підвищити стійкість до збоїв у роботі інфраструктури та забезпечити більш ефективне використання пасажирської залізничної мережі.

В межах даної кваліфікаційної магістерської роботи для удосконалення перевезень пасажирів швидкісними і звичайними поїздами застосовано процедуру дослідження просторово-структурних властивостей системи пасажирських перевезень України на основі методів аналізу складних мереж для вивчення її топологічних властивостей.

Вперше: для аналізу макропараметрів функціонування залізничної пасажирської мережі України побудовано та проведено дослідження графа пасажирських залізничних перевезень України на основі теорії складних мереж. Встановлено, що розподіл степенів вершин підпорядковується степеневому закону, що свідчить про належність мережі до безмасштабних структур із властивістю масштабної інваріантності. Удосконалено: для практичного використання застосованого аналізу макропоказників пасажирських перевезень розроблено вимоги до автоматизованої системи для стратегічного, тактичного та оперативного управління розвитком залізничної інфраструктури України в умовах структурних трансформацій і зовнішніх викликів.

ABSTRACT

This qualification work includes 15 presentation slides, 72 sheets of explanatory notes in A4 format, including 15 drawings, 25 literary sources.

Keywords: PASSENGER TRANSPORTATION, HIGH-SPEED TRAIN, ANALYSIS OF COMPLEX NETWORKS.

The object of the study is the process of passenger transportation on the railway transport of Ukraine.

The purpose of the study is to increase the efficiency of passenger transportation by high-speed and conventional trains based on methods of analyzing complex networks in order to identify structural patterns that affect the synchronization, reliability and efficiency of passenger flows. This will allow optimizing train routes, reducing transfer times, increasing resilience to infrastructure failures and ensuring more efficient use of the passenger railway network.

Within the framework of this qualification master's thesis, in order to improve passenger transportation by high-speed and conventional trains, the procedure for studying the spatial-structural properties of the passenger transportation system of Ukraine based on the methods of analysis of complex networks for studying its topological properties was applied.

For the first time: to analyze the macro-parameters of the functioning of the railway passenger network of Ukraine, a study of the graph of passenger railway transportation of Ukraine based on the theory of complex networks was constructed and conducted. It was established that the distribution of degrees of vertices obeys a power law, which indicates that the network belongs to scale-free structures with the property of scale invariance. Improved: for the practical use of the applied analysis of macro-indicators of passenger transportation, requirements for an automated system for strategic, tactical and operational management of the development of the railway infrastructure of Ukraine in conditions of structural transformations and external challenges were developed.

Український державний університет залізничного транспорту

Факультет управління процесами перевезень

Кафедра управління експлуатаційною роботою

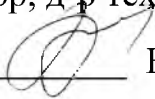
Освітній рівень: магістр

Спеціальність 275 Транспортні технології

275.02 Транспортні технології (на залізничному транспорті)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри,
професор, д-р техн. наук

 Бутько Т.В.

« 19 » березня 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Хлібишину Богдану Юрійовичу

1 Тема роботи «Удосконалення перевезень пасажирів швидкісними і звичайними поїздами на основі методів аналізу складних мереж» керівник Прохорченко Андрій Володимирович, професор, доктор техн. наук затверджена розпорядженням по факультету управління процесами перевезень від від «24» лютого 2025 р. № 04/25.

2 Строк подання студентом роботи 15 червня 2025 року.

3 Вихідні дані до роботи: Техніко-експлуатаційні показники роботи залізничного транспорту України в цілому, технічна характеристика досліджуваного залізничного полігону, нормативна документація щодо розкладу руху пасажирських поїздів на залізницях України.

4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ. 1 Аналіз швидкісних та високошвидкісних пасажирських перевезень. 2. Аналіз попередніх наукових розробок за темою дослідження. 3 Дослідження системи перевезень пасажирів швидкісними і звичайними поїздами на основі методів аналізу складних мереж. 4 Розробка вимог щодо структури системи підтримки прийняття рішень логістичних центрів залізничних вокзалів. 5 Економічна оцінка ефективності впровадження удосконаленої технології роботи залізничного вокзалу в умовах функціонування логістичного центру на залізничній мережі швидкісного і звичайного руху Висновки

5 Перелік графічного матеріалу: Динаміка доходів АТ УЗ за 2019-2023 роки, млрд. грн., Порівняння аналізу динаміки перевезення пасажирів за автомобільним та залізничним транспортом у період 2018-2023 рр, Кількість відправлених пасажирів за 2021-2023 рр, Візуалізація графа Р мережі швидкісних і звичайних пасажирських поїздів згідно зі Службовим розкладом, Діаграма 10 найкращих залізничних вокзалів із найбільшими значеннями степенів вершин відповідно вхідних (In-Degree) і вихідних (Out-Degree)

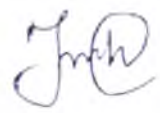
6 Консультанти окремих розділів

Розділ	Прізвище, ініціали, посада та науковий ступінь консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Оцінка економічної ефективності проектного рішення	Наталія ГРИЦЕНКО, доцент, к.е.н		

7. Дата видачі завдання: 20.03.2025.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

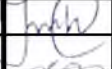
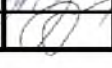
Назва етапів	Строк виконання етапів	Примітка
1 Аналіз швидкісних та високошвидкісних пасажирських перевезень	20.03.25	вик
2. Аналіз попередніх наукових розробок за темою дослідження	25.04.25	вик
3 Дослідження системи перевезень пасажирів швидкісними і звичайними поїздами на основі методів аналізу складних мереж	01.05.25	вик
4 Розробка вимог щодо структури системи підтримки прийняття рішень логістичних центрів залізничних вокзалів	12.05.25	вик
5 Економічна оцінка ефективності впровадження удосконаленої технології роботи залізничного вокзалу в умовах функціонування логістичного центру на залізничній мережі швидкісного і звичайного руху	05.06.25	вик
Висновки. Оформлення роботи.	15.06.25	вик

Студент  - Богдан ХЛИБИШИН

Керівник  Андрій ПРОХОРЧЕНКО

Зміст

Вступ	8
1 Аналіз швидкісних та високошвидкісних пасажирських перевезень	11
1.1 Світовий досвід швидкісних та високошвидкісних перевезень	11
1.2 Аналіз залізничних пасажирських перевезень в Україні	15
2. Аналіз попередніх наукових розробок за темою дослідження	23
3 Дослідження системи перевезень пасажирів швидкісними і звичайними поїздами на основі методів аналізу складних мереж	38
4 Розробка вимог щодо структури системи підтримки прийняття рішень логістичних центрів залізничних вокзалів	51
4.1. Розробка системи підтримки прийняття рішень логістичних центрів залізничних вокзалів з використанням WEB технологій	51
4.2 Розробка схеми транзиту інформаційних потоків в пасажирських перевезеннях при організації структури бази даних в системі підтримки прийняття рішень	56
4.3. Програмна реалізації інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень	57

					УППШЗ.200.00.00 ПЗ			
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Товстопят В.		-	Удосконалення перевезень пасажирів швидкісними і звичайними поїздами на основі методів аналізу складних мереж	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.		Прохорченко					6	64
Реценз.						УкрДУЗТ		
Н. Контр.		Прохорченко						
Затверд.		Буцько						

5 Економічна оцінка ефективності впровадження удосконаленої технології роботи залізничного вокзалу в умовах функціонування логістичного центру на залізничній мережі швидкісного і звичайного руху	59
Висновки	67
Список використаних джерел	70

					УППШЗ. 200.00.00 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вступ

У сучасних умовах реформування транспортної галузі України та підвищення вимог до ефективності пасажирських перевезень особливої актуальності набуває питання оптимізації роботи залізничного транспорту. Швидкісні та звичайні поїзди відіграють ключову роль у забезпеченні мобільності населення, проте існуюча інфраструктура часто не відповідає сучасним вимогам до надійності, швидкості та зручності сполучень. Це обумовлює необхідність пошуку нових підходів до аналізу та удосконалення системи пасажирських перевезень.

Методи аналізу складних мереж, які широко використовуються в дослідженнях транспортних, енергетичних і соціальних систем, дають змогу виявити критичні вузли, оцінити рівень зв'язності, ієрархію та наявність центрів тяжіння в мережі залізничного сполучення. Застосування цих методів у контексті пасажирських перевезень дозволяє виявити структурні недоліки, спрогнозувати вплив змін у графіку руху та складі поїздів, а також обґрунтовано планувати інтеграцію швидкісних маршрутів у наявну інфраструктуру.

Таким чином, удосконалення перевезень пасажирів швидкісними і звичайними поїздами на основі методів аналізу складних мереж є важливим напрямом наукових досліджень і практичного впровадження. Це дозволить підвищити якість транспортного обслуговування, скоротити час у дорозі, збалансувати навантаження на мережу та забезпечити стійкість пасажирських сполучень до зовнішніх впливів.

Метою дослідження є підвищення ефективності перевезень пасажирів швидкісними і звичайними поїздами на основі методів аналізу складних мереж з метою виявлення структурних закономірностей, що впливають на синхронізацію, надійність та ефективність пасажирських потоків. Це дозволить оптимізувати маршрути руху поїздів, зменшити час пересадок,

підвищити стійкість до збоїв у роботі інфраструктури та забезпечити більш ефективне використання пасажирської залізничної мережі.

Основні завдання:

- провести аналіз залізничних пасажирських перевезень в Україні;
- застосувати методи аналізу складних мереж для вивчення топологічних властивостей системи залізничних пасажирських перевезень;
- дослідити закономірності розподілу степенів вершин в залізничній пасажирській маршрутній мережі;
- виявити роль окремих станцій (вокзалів) мережі у формуванні маршрутної структури швидкісних та звичайних пасажирських поїздів та розробити рекомендації з оптимізації маршрутної структури;
- провести економічне обґрунтування від впровадження системи підтримки прийняття рішень щодо розвитку залізничної пасажирської мережі України.

Об'єктом дослідження є процес перевезень пасажирів на залізничному транспорті України.

Предметом дослідження процедура дослідження просторово-структурних властивостей системи пасажирських перевезень України швидкісними та звичайними поїздами на основі методів аналізу складних мереж.

Елементи наукової новизни: В магістерській кваліфікаційній роботі для удосконалення перевезень пасажирів швидкісними і звичайними поїздами застосовано процедуру дослідження просторово-структурних властивостей системи пасажирських перевезень України на основі методів аналізу складних мереж для вивчення її топологічних властивостей.

Вперше:

- для аналізу макропараметрів функціонування залізничної пасажирської мережі України побудовано та проведено дослідження графа пасажирських залізничних перевезень України за даними Службового розкладу руху швидкісних та звичайних поїздів на 2018-2019 рр., на основі

теорії складних мереж. Встановлено, що розподіл степенів вершин підпорядковується степеневому закону, що свідчить про належність мережі до безмасштабних структур із властивістю масштабної інваріантності. Це підтверджено статистично (коефіцієнт $\alpha \approx 2.5$, проведено тест KS-статистика, критерій R). У мережі спостерігається яскраво виражена централізованість, де невелика кількість станцій-хабів має високі значення степеня, посередництва та близькості, тоді як переважна більшість вузлів є слабозв'язаними або периферійними. Знайдено значення діаметра – 5 та ефективного діаметра – 4. Середня довжина найкоротшого шляху у найбільшій компоненті SCC (59 вокзалів) складає 2,5 кроки (пересадки). Визначено наявність асортативного змішування в мережі. Коефіцієнт кластеризації Воттса-Строгаца складає 0,333904, що є помірним. Це свідчить про наявність локальних кластерів чи регіональних підмереж, де станції формують більш щільні з'єднання. Це характерно для мереж з вираженою регіональною спеціалізацією.

Удосконалено:

для практичного використання застосованого аналізу макропоказників пасажирських перевезень розроблено вимоги до автоматизованої системи для стратегічного, тактичного та оперативного управління розвитком залізничної інфраструктури України в умовах структурних трансформацій і зовнішніх викликів.

Матеріали кваліфікаційної магістерської роботи опубліковані у фаховому виданні МОН України [1].

1 Аналіз швидкісних та високошвидкісних пасажирських перевезень

1.1 Світовий досвід швидкісних та високошвидкісних перевезень

Відповідно до [2] високошвидкісна залізниця – це залізничне пасажирське сполучення, що працює на значно вищих швидкостях, ніж звичайні пасажирські поїзди.

Мережа трансєвропейської системи високошвидкісних залізниць включає:

- спеціально побудовані високошвидкісні лінії, обладнані для швидкостей, що зазвичай дорівнюють або перевищують 250 км/год;
- спеціально модернізовані високошвидкісні лінії, обладнані для швидкостей близько 200 км/год;
- спеціально модернізовані високошвидкісні лінії, які мають особливі характеристики внаслідок топографічних, рельєфних або містобудівних обмежень, на яких швидкість має бути адаптована до кожного конкретного випадку.

Високошвидкісні залізниці в основному використовуються для пасажирських перевезень, особливо між містами з великою населеністю, і вони можуть допомогти зменшити затори на дорогах, пропонуючи більш екологічну альтернативу повітряним та автомобільним подорожам. Перша високошвидкісна залізнична лінія була введена в Японії в 1964 році зі знаменитим «поїздом-кулею», і з того часу мережа ВШЗ розширилася в усьому світі, особливо в Азії та Європі, причому Китай міг похвалитися найбільшою мережею станом на 2021 рік [3].

Розвиток високошвидкісного руху почався у 1960 році, коли Французькі залізниці запустили поїзд Le Capitole, що розвивав швидкість 200 км/год та обслуговував маршрут Париж – Тулуза. Японія, Велика

Британія та Сполучені Штати незабаром додали швидші поїзди, і інші європейські країни швидко наслідували цей приклад.

Найвідомішим з перших швидкісних транзитних поїздів був «поїзд-куля» в Японії. Спеціальна електрифікована лінія була побудована для доставки відвідувачів до Токіо на літні Олімпійські ігри 1964 року. Будівництво 515 км спеціальних колій розпочалося в 1959 році та було завершено в 1964 році. Хоча населення рішуче виступало проти дорогого проекту, люди незабаром прийняли високошвидкісну залізничну систему. Поїзди-кулі з двигунами, що нагадують кулі, розвивали швидкість до 210 км/год і могли подолати дистанцію за три години десять хвилин. Пізніші модифікації розширили залізничну мережу та збільшили швидкість поїздів. Через п'ятдесят років після початку руху першого швидкісного поїзда-швидкості, пасажирська залізнична система Японії перевозила десятки мільйонів людей на рік.

У Європі основна увага була зосереджена на розробці поїздів, які могли б використовувати існуючі залізничні колії, а не на створенні системи з нуля. Поїзд Train à Grande Vitesse 1981 року у Франції встановив новий світовий рекорд швидкості - 380 км/год. У 2007 році французький поїзд TGV встановив світовий рекорд швидкості залізниці на сталевих колесах - 474,8 км/год. Рекорд досі дійсний станом на 2022 рік.

Створення та відкриття тунелю під Ла-Маншем у 1994 році ще більше підживило попит на високошвидкісні залізниці в Європі. Тунель під Ла-Маншем з'єднав Велику Британію з Францією, а отже, і з рештою Європи. Поки тунель будувався, Франція побудувала електрифіковану залізничну лінію. Однак у Великій Британії система колій датується вікторіанською епохою; Це було у 2007 році, перш ніж нова лінія High Speed покращила існуючі колії.

Залізнична система США також страждає від старих, існуючих залізничних ліній. Експерти кажуть, що вартість будівництва спеціалізованих колійних систем занадто висока, щоб бути прибутковою чи практичною.

Подорожі високошвидкісними поїздами у Сполучених Штатах обмежені ділянками існуючих ліній, де поїзди можуть розвивати швидкість до 241 км/год. Один з таких маршрутів знаходиться між Вашингтоном, округ Колумбія, та Бостоном.

Системи високошвидкісних залізниць зазнали величезного розвитку в багатьох частинах світу, особливо в Азії та на Близькому Сході. Китай, зокрема, значно розширив свої системи високошвидкісних залізниць. У вересні 2017 року, через шість років після фатального зіткнення, яке призвело до зниження експлуатаційних швидкостей, поїзд Пекін-Шанхай відновив роботу зі швидкістю 350 км/год, що залишається максимальним експлуатаційним показником для пасажирських залізниць у світі. У 2021 році Китай мав найбільшу мережу високошвидкісних залізниць у світі, зі 150 000 кілометрів колій [3].

Більшість локомотивів, що обслуговують високошвидкісні лінії, обладнані дизельно-електричними двигунами, оскільки вони мають електричні трансмісії. Двигун виробляє механічну енергію, а система передачі перетворює її на електричну. Тягові двигуни використовують електроенергію для обертання осей або коліс поїзда. Дизель-електричні поїзди найбільш практичні там, де будівництво електричних джерел живлення для електропоїздів є занадто дорогим.

Багато електропоїздів обладнані електричними джерелами живлення. Самі двигуни не виробляють електроенергію; електростанція генерує енергію та подає її в систему через кабелі, що називаються контактними мережами, та контактні дроти. Двигун оснащений пристроєм для збору енергії. Електропоїзди поширені в Європі та багатьох інших частинах світу. Javelin класу 395, виготовлений у Японії, був розроблений для різних ситуацій. Він може використовувати повітряне джерело живлення або електроенергію від третьої рейки. Javelin має вагон-електровоз спереду та ще один ззаду.

Системи Maglev (магнітна левітація) не мають осей, зубчастих передач або коліс; немає рейок; та немає електричних джерел живлення. Ці

монорейкові поїзди залежать від магнітної сили між парами електромагнітних котушок. Котушки в стінках прямої колії створюють магнітне поле, яке працює разом з котушками в колії, щоб рухати поїзд. Хоча ідея досить давня - її запатентували в 1934 році - система магнітної підвіски не була випробувана до 1987 року. У 2015 році експериментальний магнітний потяг у Японії встановив новий рекорд швидкості 603 км/год (374 милі/год) під час випробувального пробігу, побивши свій попередній рекорд 581 км/год (361 милі/год) у 2003 році. Рекорд чинний станом на 2022 рік[3].

Високошвидкісна залізниця наразі функціонує за двома окремими технологіями:

Удосконалення існуючих залізничних ліній. Перший тип використовує існуючі звичайні залізничні лінії, і його висока швидкість зумовлена головним чином значним покращенням характеристик локомотивів та конструкції поїздів. Їх не можна вважати чисто високошвидкісними поїздами як такими. Англія (Лондон – Единбург), Швеція (Стокгольм – Гетеборг), Італія (Рим – Флоренція та Рим – Мілан) та Сполучені Штати (Бостон – Вашингтон) є прикладами цього типу технології. Поїзди можуть досягати пікової швидкості приблизно 200 км/год у більшості випадків та до 250 км/год в Італії. Однак основним недоліком використання цієї системи є те, що вона повинна використовувати існуючі лінії разом із регулярними пасажирськими та вантажними перевезеннями, що обмежує кількість ниток, доступних для високошвидкісної залізниці.

Ексклюзивні високошвидкісні мережі. На противагу цьому, друга категорія високошвидкісних поїздів курсує по власних ексклюзивних та незалежних коліях. У Японії поїзди можуть досягати швидкості 240 км/год, але поточні проекти щодо підвищення пікової швидкості до 300 км/год спрямовані на підтримку конкурентоспроможності залізничних пасажирських перевезень порівняно з повітряними. У Франції TGV Sud-Est (Trains a Grande Vitesse) досягає швидкості 270 км/год, тоді як TGV Atlantique може курсувати зі швидкістю 300 км/год. Однією з ключових

переваг такої системи є те, що пасажирські поїзди мають власні ексклюзивні колії, що підвищує ефективність залізничних вантажних перевезень, оскільки вони успадковують майже виключне використання звичайної залізничної системи [4].

1.2 Аналіз залізничних пасажирських перевезень в Україні

Українська залізниця є життєво важливою частиною інфраструктури країни, забезпечуючи значну частку як вантажних, так і пасажирських перевезень. За обсягом вантажних перевезень вона посідає четверте місце на Євразійському континенті, а пасажирообіг у 2021 році склав 81,3 мільйона пасажирів. Однак, залізнична система України зіткнулася зі значними викликами, включаючи наслідки нещодавніх подій, таких як війна, що призвела до пошкодження інфраструктури та зміни пасажирських і вантажних потоків. Крім того, існують постійні обмеження, такі як змішаний рух вантажних і пасажирських поїздів та обмеження швидкості для пасажирських поїздів до 160 км/год. 4 Ці фактори підкреслюють нагальну потребу в оптимізації залізничних операцій для підвищення ефективності, надійності та стійкості.

Одним із перспективних підходів до аналізу та оптимізації складних систем, таких як залізниці, є використання теорії складних мереж. У цьому підході залізнична система моделюється як мережа, де станції є вузлами, а колії або послуги сполучення – ребрами. Таке моделювання дає змогу застосовувати інструменти та метрики мережевої науки для аналізу та оптимізації різних аспектів залізничних операцій. Потенційні переваги використання теорії складних мереж для покращення пасажирських перевезень включають підвищення ефективності, покращення стабільності розкладу та підвищення стійкості мережі. Аналіз складної мережі забезпечує

цілісний погляд на залізничну систему, що дає змогу проводити оптимізацію на системному рівні.

Залізничний транспорт України виконує важливу соціальну функцію, забезпечуючи мобільність населення на середніх і далеких відстанях. Проте останніми роками спостерігається суттєве зниження попиту на пасажирські перевезення залізницею, що негативно впливає на фінансові результати діяльності оператора. За підсумками 2024 року збитки від пасажирських перевезень склали 18,1 млрд грн, що свідчить про системну проблему нерентабельності даного сегмента перевезень.

На рисунку 1.1 представлено динаміку доходів АТ "Укрзалізниця" за період 2019–2023 років.

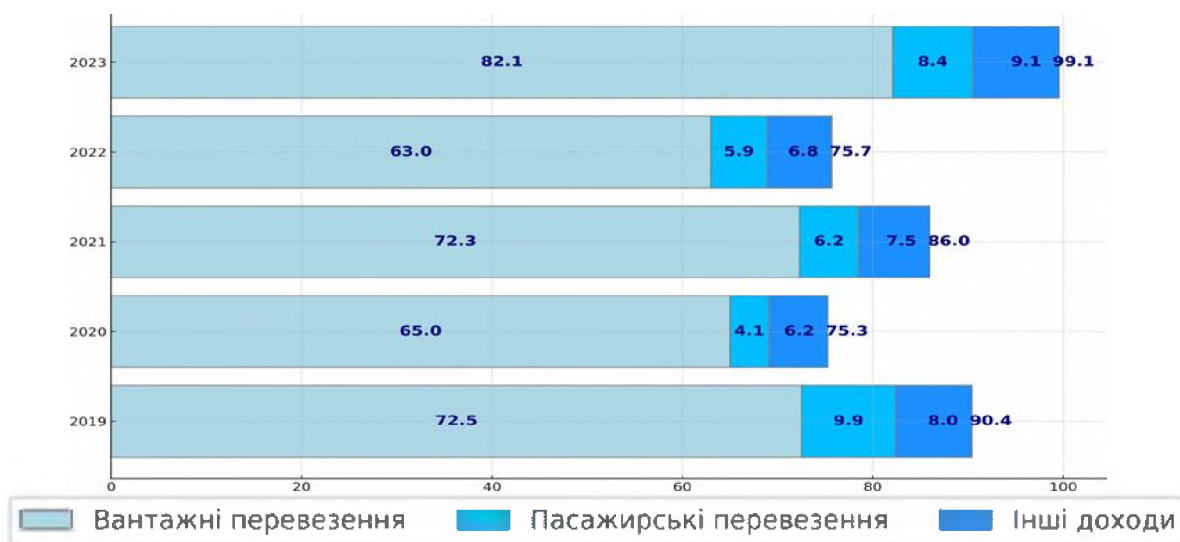


Рисунок 1.1 - Динаміка доходів АТ УЗ за 2019-2023 роки, млрд. грн.

Найбільшу частку в структурі доходів стабільно формують вантажні перевезення (65–82 млрд грн), тоді як доходи від пасажирських перевезень залишаються на низькому рівні та демонструють нестійку тенденцію. З 2020 року спостерігається зниження доходів у цьому сегменті: з 6,8 млрд грн у 2019 році до 4,1 млрд грн у 2023 році. Це є наслідком скорочення кількості

перевезених пасажирів, зменшення кількості рейсів та високої собівартості на фоні обмеженої платоспроможності населення.

Порівняльний аналіз обсягів перевезення пасажирів автомобільним і залізничним транспортом за період 2018–2023 рр. демонструє значне падіння пасажиропотоку обома видами транспорту (рисунок 1.2).

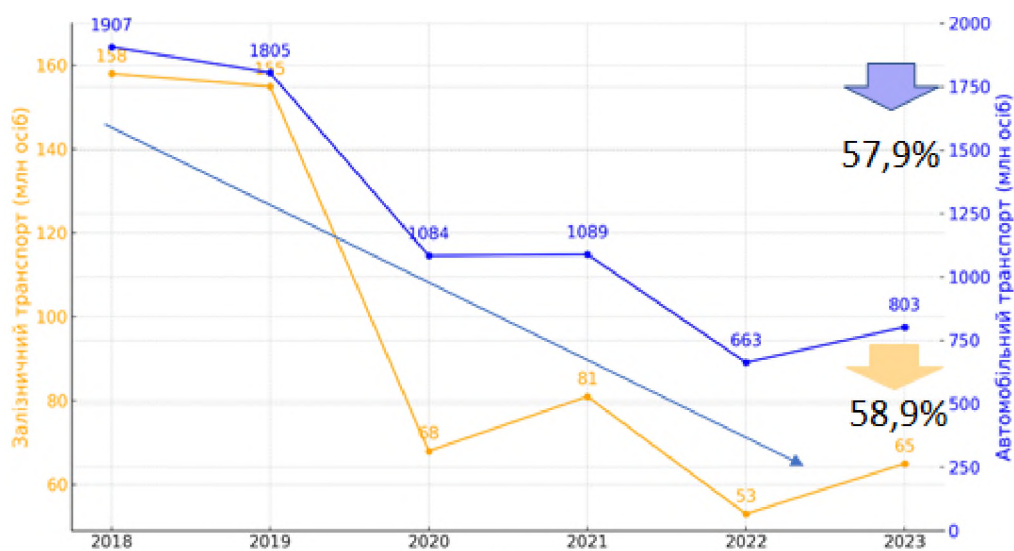


Рисунок 1.2 – Порівняння аналіз динаміки перевезення пасажирів за автомобільним та залізничним транспортом у період 2018-2023 рр

Проте темпи скорочення залізничних перевезень є вищими - 57,9 % проти 58,9 % в автомобільному секторі. У 2023 році частка залізничного транспорту в структурі пасажирських перевезень становила лише 7,5 %, тоді як у 2018 році - 7,7 %, що вказує на збереження, але не зростання ролі залізниці.

На обсяги пасажирських перевезень залізничним транспортом в Україні суттєво вплинула Пандемія COVID-19. Основні аспекти впливу включали:

1. Скорочення обсягів пасажирських перевезень, так у 2020 році пасажиропотік зменшився більш ніж удвічі у порівнянні з 2019 роком. За даними АТ "Укрзалізниця", у 2019 році перевезено 140,7 млн пасажирів, тоді

як у 2020 році – лише 69,4 млн пасажирів (-50,7%). Основною причиною стали жорсткі карантинні обмеження, які включали:

- повне припинення міжміських перевезень у березні-травні 2020 року;
- закриття міжнародних сполучень з більшістю країн;
- обмеження на кількість пасажирів у вагонах.

2. Зміна структури перевезень. Так, найбільше постраждали пасажирські перевезення далекого сполучення, оскільки попит на подорожі різко впав.

Приміські перевезення також скоротилися, але меншою мірою, оскільки частина пасажирів продовжувала користуватися електричками для поїздок на роботу.

Спостерігалось зростання частки автобусних та автомобільних перевезень, особливо після поступового зняття обмежень.

3. Фінансові втрати "Укрзалізниці". За оцінками, втрати від пандемії для пасажирського сектора склали близько 8-10 млрд грн у 2020 році. Відновлення доходів відбулося лише частково у 2021 році, але пасажиропотік все ще не досяг рівня 2019 року.

4. Поступове відновлення перевезень почало спостерігатися у 2021 році, коли було перевезено пасажирів все ще менше, ніж у 2019 році, але значно більше, ніж у 2020 році. Після скасування обмежень на продаж квитків у поїздах дальнього сполучення та відкриття міжнародних рейсів пасажиропотік почав відновлюватися.

5. Впровадження нових заходів безпеки, серед яких:

- обов'язкове носіння масок у вагонах;
- обмеження заповненості вагонів;
- дезінфекція вагонів після кожного рейсу;
- введення "COVID-паспортів" для поїздок у міжнародних напрямках.

6. Довгострокові наслідки:

- зміна транспортних звичок населення – зростання попиту на власний автотранспорт;
- перехід на цифрові сервіси – активне використання онлайн-продажу квитків;
- перегляд бізнес-моделі УЗ – збільшення частки швидкісних та регіональних перевезень.

Як висновок, можна відмітити, що Пандемія COVID-19 призвела до істотного скорочення обсягів пасажирських перевезень залізничним транспортом в Україні, спричинивши фінансові втрати та зміни в організації перевезень. Відновлення пасажиропотоку відбулося поступово, але повне повернення до рівня 2019 року все ще не відбулося через зміну мобільності населення та економічні наслідки пандемії.

Що стосується кількості відправлених пасажирів за період 2021-2023 рр, то після значного падіння у 2022 році, спричиненого військовою агресією російської федерації, у 2023 році спостерігалось відновлення обсягів відправлених пасажирів, рисунок 1.3.

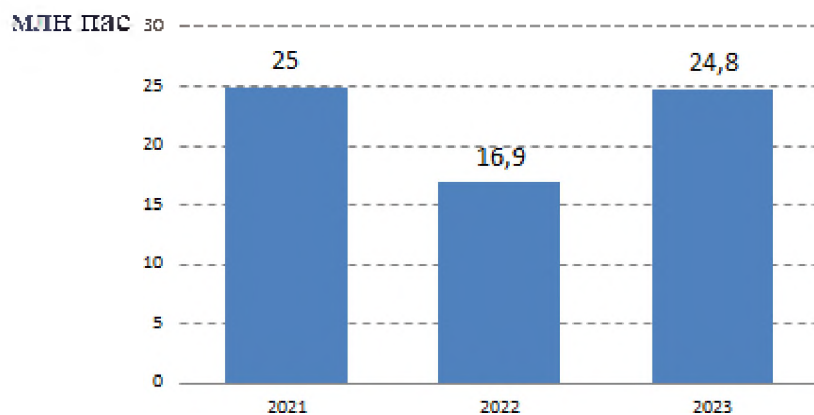


Рисунок 1.3 - Кількість відправлених пасажирів за 2021-2023 рр

Проведеними дослідженнями встановлено, що основну частку, а саме 85,24% на ринку пасажирських послуг залізничного транспорту займають

поїздки в/з відпустки (44,26%) та відвідування друзів чи родичів (40,98%), рисунок 1.4.

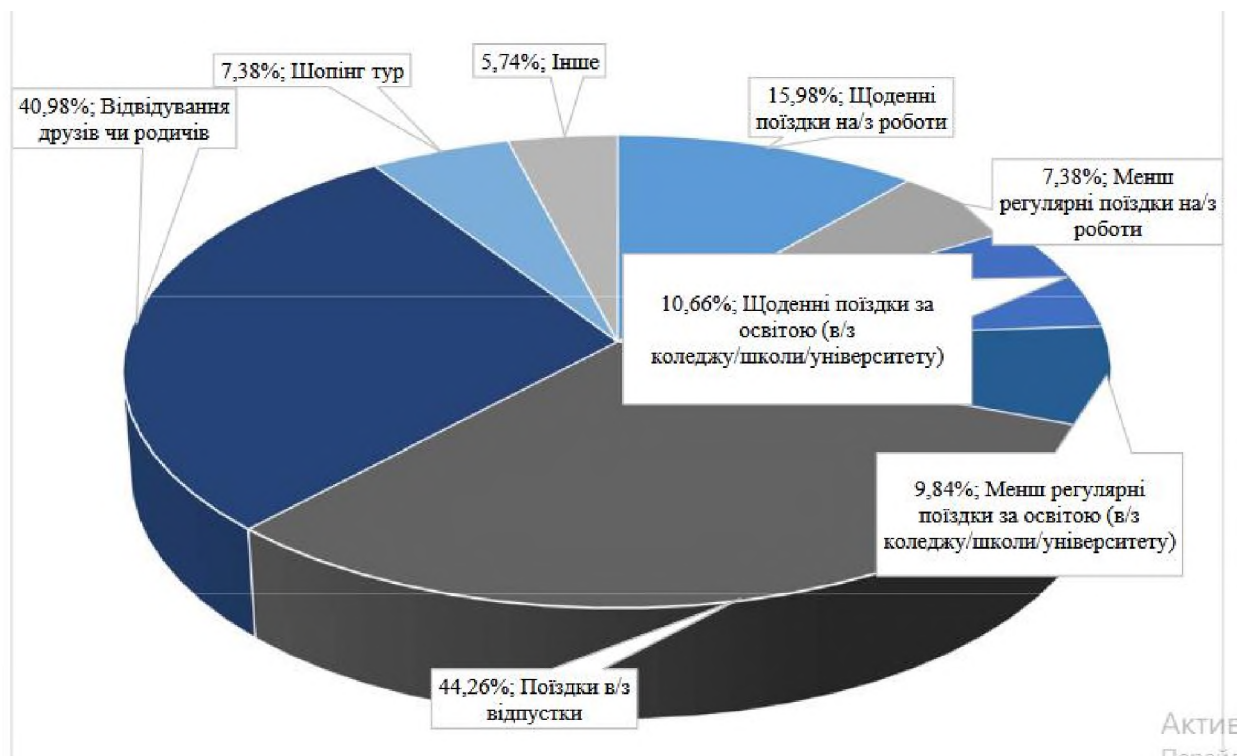


Рисунок 1.4 - Мета подорожі пасажирів філії «Пасажирська компанія» АТ «Укрзалізниця»

Плануючи свою відпустку (до введення воєнного стану в Україні) більшість населення нашої країни користувалося послугами філії «Пасажирська компанія» АТ «Укрзалізниця», абсолютна більшість українців, а саме 67% проводили відпустку в Україні (узбережжя Азовського моря, Одеса, Львів, Харків та рекреаційні центри Закарпаття), і лише третина, а саме 33% – за кордоном. Для даного сегменту пасажирів визначальними факторами виступають безпека, комфорт, висока культура обслуговування, комплекс додаткових сервісних послуг.

Важливим етапом у функціонуванні залізничних пасажирських перевезень є те, що «Укрзалізниця» була змушена виконувати не зовсім звичні функції, від яких залежало саме існування Української держави,

принаймні на початковому етапі агресії. Так, залізницею здійснювалися масштабні евакуаційні заходи – загалом, протягом 2022 р. до західних областей України було евакуйовано 4 млн осіб, ще 600 тис. осіб евакуйовано за кордон. У критичні перші дні російського вторгнення кількість евакуйованих осіб сягала позначки у майже 200 тис. осіб на день, рисунок 1.5.

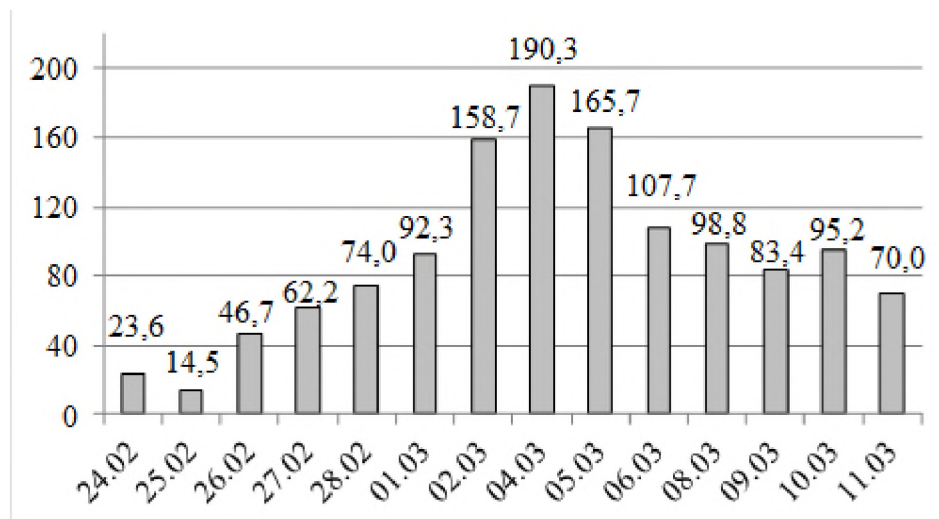


Рисунок 1.5 – Кількість евакуйованих пасажирів АТ «Укрзалізниця»,
тис. пас

Залізничні пасажирські перевезення мають важливе як соціальне, так і економічне значення; на долю залізниць припадає третина загального пасажирообороту країни. При цьому система пасажирських перевезень не позбавлена недоліків, а саме для неї характерні: отримання доходів, недостатніх для покриття навіть поточних експлуатаційних витрат, не говорячи про потребу в інвестиційних ресурсах; недостатньо ефективна система організації пасажирських перевезень; застарілий рухомий склад, значна кількість пільгових категорій громадян та ін.

Перехресне субсидіювання негативно впливає на ефективність діяльності залізничного транспорту, породжує відсутність мотивації щодо

економії витрат та підвищення якості транспортного обслуговування як пасажирів, так і вантажовласників.

Вищезазначене ускладнюється також недосконалістю нормативно-правових актів, що регулюють діяльність залізничного транспорту. У зв'язку з цим виникає потреба гармонізації вітчизняного та міжнародного транспортного законодавства.

Отримані результати свідчать про потребу в глибшому аналізі функціонування системи пасажирських перевезень залізницею з урахуванням мережевої структури, логіки формування графіків руху та адаптації до потреб користувачів. У цьому контексті перспективним напрямом є застосування методів аналізу складних мереж для виявлення неефективних маршрутів, оптимізації системи пересадок, підвищення доступності та конкурентоспроможності швидкісних і звичайних поїздів.

2. Аналіз попередніх наукових розробок за темою дослідження

Провідними вченими і практиками приділялася увага дослідженням щодо стабільності та оптимізації розкладів. Так, дослідження [5] представляє модель складної мережі для опису розкладу поїздів та алгоритм для оптимізації його стабільності. Модель дає змогу використовувати теорію складних мереж для вивчення проблеми оптимізації розкладу, а розроблений алгоритм спрямований на підвищення стійкості розкладу до збоїв в експлуатаційному процесі. Практичність підходу була доведена на прикладі розрахунку, а результати можуть слугувати рекомендаціями для залізничних операторів під час розробки розкладу. Хоча дослідження пропонує практичний спосіб підвищення стійкості розкладу, в анотації не наведено конкретних обмежень або складності впровадження в великих мережах зі змішаним рухом. Тим не менш, стабільність розкладу має вирішальне значення для задоволеності пасажирів та ефективної роботи мережі, а моделювання розкладу як складної мережі дає змогу проводити кількісний аналіз та цілеспрямовану оптимізацію.

В іншому дослідженні [6], розроблено підхід матричного перетворення для моделювання поширення затримок на одноколіній залізничній лінії. Цей підхід дає змогу зрозуміти, як поширюються затримки залежно від розкладу, що є важливим для створення надійних розкладів. Хоча дослідження зосереджено на одній лінії, воно надає цінну методологію для аналізу ключового фактора, що впливає на стабільність розкладу – затримок. Розуміння поширення затримок є основоположним для покращення надійності розкладу, особливо в умовах змішаного руху, де вантажні поїзди можуть вносити додаткову мінливість.

В дослідженні [7], присвяченому прогнозуванню пасажиропотоку, представлено оптимізовану модель Informer, яка інтегрує теорію складних мереж для довгострокового прогнозування пасажиропотоку в міському

залізничному транспорті. Дослідження порівняло запропоновану модель з моделями ARIMA, LSTM та Transformer, продемонструвавши її перевагу в обробці великих обсягів складних транспортних даних, особливо щодо точності довгострокового прогнозування та фіксації мережевих залежностей. Теорія складних мереж була використана для врахування впливу інших станцій. Модель Informer показала значне покращення точності та ефективності прогнозування, забезпечуючи надійну підтримку прийняття рішень для планування та управління міським залізничним транспортом. Переваги цього підходу включають покращену точність прогнозування, ефективну обробку складних даних та фіксацію мережевих залежностей, а також надійну підтримку прийняття рішень для планування та управління. Однак, аналіз великих наборів даних протягом тривалих періодів часу може бути складним з обчислювальної точки зору, а оптимізація багатовимірних даних, що враховують такі фактори, як зв'язність станцій, пасажирський попит та зовнішні впливи, додає складності. Тим не менш, точне прогнозування пасажиропотоку має важливе значення для оптимізації розподілу ресурсів, складання розкладів та підвищення якості обслуговування. Дослідження підкреслює важливість врахування впливу сусідніх станцій на пасажиропотік, припускаючи, що мережевий підхід до прогнозування може дати кращі результати, ніж моделі, орієнтовані на окремі станції. Враховуючи зв'язність та центральність станцій, модель фіксує, як рух пасажирів на одній станції може впливати на інші, що призводить до точніших прогнозів для всієї системи.

В дослідженні [8] щодо оптимізації мережі обслуговування поїздів розроблено модель для оптимізації мережі обслуговування поїздів з метою мінімізації загального часу в дорозі всіх пасажирів. У роботі запропоновано перетворення плану обслуговування поїздів на мережу, де станції є вузлами, а сполучення між станціями – ребрами. Метою оптимізації є мінімізація загального часу, витраченого пасажирами на поїздки, включаючи час у поїзді та час пересадок. Дослідження також надає підхід до розв'язання задачі

оптимізації та включає приклад розрахунку на основі високошвидкісних залізниць Китаю під час снігової бурі. Переваги запропонованого методу включають скорочення загального часу в дорозі пасажирів, надання цінної інформації для керівників залізниць, запропонування системного підходу з використанням теорії складних мереж та врахування глобальної оптимальності шляхом балансування потреб пасажирів, які їдуть без пересадок та з пересадками. Однак, реалізація таких змін у реальній мережі може бути складною та вимагати значних логістичних коригувань. Точність та ефективність оптимізації значною мірою залежать від наявності та точності даних про пасажиропотік, розкладів поїздів та інформації про пропускну здатність залізниці. Хоча загальний час у дорозі може зменшитися, деякі окремі пасажирів можуть зіткнутися зі збільшенням часу в дорозі або більшою кількістю пересадок залежно від конкретних змін, внесених до мережі. Оптимізація великомасштабної мережі обслуговування поїздів може бути обчислювально затратною. Тим не менш, оптимізація мережі обслуговування поїздів з системної точки зору може призвести до значного скорочення загального часу в дорозі. Приклад розрахунку демонструє потенціал моделі у розв'язанні проблем, пов'язаних зі збоями, що особливо актуально для поточної ситуації в Україні. Можливість швидко адаптувати мережу під час надзвичайних ситуацій для мінімізації впливу на пасажирів є важливим аспектом стійкої залізничної системи.

Низка досліджень присвячена проблемі складання розкладу вантажних поїздів у мережах, які спільно використовуються з пасажирськими поїздами [9]. Ці дослідження розробляють оптимізаційні підходи, включаючи математичні формулювання, які враховують як фіксовані маршрути, так і можливість їх зміни. Запропоновано різні евристичні та декомпозиційні алгоритми для розв'язання цієї складної задачі. Загальною метою є мінімізація затримок вантажних поїздів без порушення розкладу пасажирських поїздів. Дослідження [9] показало, що запропоновані алгоритми перевершують існуючі евристичні методи щодо зменшення

загальної затримки поїздів. Декомпозиційні методи виявилися ефективними для обробки великих мереж. Ефективна інтеграція вантажного та пасажирського руху вимагає передових інструментів та алгоритмів складання розкладу, здатних впоратися зі складністю спільних мереж.

Дослідження [10] проаналізувало обчислювальну складність задачі маршрутизації та складання розкладу вантажних поїздів у пасажирській мережі, показавши, що вона є NP-повною навіть для спрощених випадків. Для розв'язання цієї складної задачі було розроблено поетапну евристику диспетчеризації для кількох вантажних поїздів та алгоритм для одного вантажного поїзда. Переваги цього підходу включають розв'язання реальної проблеми, надання практичної евристики для складної задачі, комп'ютерну валідацію та пріоритетність розкладу пасажирських поїздів. Розробка конкретних алгоритмів та евристик свідчить про необхідність індивідуальних рішень для ефективного управління змішаним рухом. Загальні оптимізаційні підходи можуть бути недостатніми для конкретних обмежень та пріоритетів залізниці зі змішаним рухом.

Стійкість залізничної мережі є критично важливим аспектом, особливо в умовах потенційних збоїв. Дослідження [11] вивчало стійкість залізничної мережі за допомогою аналізу складних мереж фізичної інфраструктури та експлуатації. Стійкість оцінювалася за трьома параметрами: доступність, невразливість та відновлюваність. Дослідження моделювало різні типи збоїв та оцінювало ефективність стратегій відновлення на залізничній мережі Китаю. Результати показали, що цілеспрямовані збої завдають значно більшої шкоди, ніж випадкові, а стратегії відновлення, засновані на центральності вузлів, є ефективнішими. Це дослідження надає комплексну основу для кількісної оцінки стійкості, виявлення критичних вразливостей та оцінки ефективності різних стратегій відновлення. Розуміння та підвищення стійкості залізничної мережі має вирішальне значення для мінімізації наслідків збоїв, незалежно від того, чи вони спричинені технічними проблемами, стихійними лихами чи зовнішніми

факторами. Аналіз складних мереж надає інструменти для виявлення вразливостей та оптимізації зусиль з відновлення. Дослідження [12] розробило кількісну основу на основі мережевої науки для вимірювання та порівняння реакції на небезпеки та стратегій відновлення, продемонстровану на прикладі Індійської залізничної мережі. Оцінка показала, що швидше та ефективніше відновлення можливе за допомогою заходів центральності мережі. Це дослідження підкреслює, що показники центральності мережі можуть відігравати вирішальну роль у визначенні пріоритетів зусиль з відновлення після збоїв. Низка інших досліджень та ініціатив також зосереджені на підвищенні стійкості залізничних мереж. Спеціальний випуск журналу "Стійкість залізничних мереж: підвищення безпеки та надійності" закликає до досліджень у галузі штучного інтелекту, аналізу даних, Інтернету речей та інтеграції датчиків для підвищення стійкості до операційних, екологічних та технологічних збоїв. "Рамка стійкості залізниць" обговорює вплив екстремальних погодних явищ та інших ризиків на залізничні системи та представляє рамку для підвищення стійкості активів, операцій та екосистем, наголошуючи на аналітиці даних, резервуванні, різноманітності маршрутів та відновлюваності. Дослідження "Чи достатньо топологічних заходів для оцінки ефективності залізниць? Випадок стійкості проти надійності" виявило, що стійкість (здатність повертатися до бажаного стану після збою) має сильний зв'язок зі статистикою споживчого досвіду.

Аналіз [13] виявив, що центральність Domirank має вищу стійкість на етапах збою та відновлення в міських залізничних мережах. Нарешті, дослідження [14] обговорює різні підходи до аналізу стійкості, зазначаючи, що топологічні підходи вимагають обмежених даних, але не відображають операційну динаміку.

Аналіз мережі високошвидкісних залізниць може надати цінні відомості, які можна застосувати до звичайних залізничних систем. Дослідження [15] вивчало просторово-часовий розподіл населення та промисловості в Китаї у зв'язку з розвитком високошвидкісних залізниць,

виявивши негативну кореляцію між високошвидкісними залізницями та чисельністю населення та позитивний зв'язок з промисловою структурою. Хоча це дослідження зосереджено на високошвидкісних залізницях, воно підкреслює ширший соціально-економічний вплив залізничної інфраструктури. В дослідженні автори зазначають, що з розвитком високошвидкісної залізниці просторово-часова відстань між регіонами скоротилася. Однак дослідження просторово-часового розподілу та кореляції населення та промислової структури, спричинених відкриттям високошвидкісної залізниці, є відносно невеликими. Це дослідження досліджувало вплив високошвидкісної залізниці на населення та промислову структуру, а також просторово-часову агломерацію та тенденцію еволюції. Просторово-часовий розподіл населення, промислової структури та вплив високошвидкісної залізниці вивчалися з використанням панельних даних з 31 китайської провінції з 2006 по 2018 рік за допомогою просторового автокореляційного аналізу, методу еліпса стандартного відхилення та моделі DID. Експериментальні результати показують, що: населення демонструє значну позитивну просторову автокореляцію, тоді як промислова структура – навпаки. Населення та промислова структура переважно централізовані у східних та центральних районах, демонструючи просторовий розподіл за схемою «північний схід-південний захід». Високошвидкісна залізниця та населення негативно корелюють, і існує неоднорідність. Хоча існує позитивний зв'язок між високошвидкісною залізницею та промисловою структурою, також існує чітка регіональна варіабельність. Це дослідження сприяє наданню відповідної теоретичної підтримки та основи для планування ліній високошвидкісної залізниці в різних регіонах та відповідними відомствами для розробки ефективної економічної політики.

Низка інших досліджень надає огляд систем високошвидкісних залізниць, їх переваг та недоліків. Переваги високошвидкісних залізниць включають високу пропускну здатність, надійність та екологічність, тоді як недоліки включають високу вартість та значні потреби в інфраструктурі.

Дослідження в галузі високошвидкісних залізниць також розглядають питання проектування мережі, розташування станцій та складання розкладу пасажирських поїздів. Хоча швидкість української залізничної системи нижча, принципи проектування мережі, оптимізації розкладу та управління пасажиропотоком, розроблені для високошвидкісних залізниць, можуть бути адаптовані для звичайних залізничних систем. Зокрема, акцент на мінімізації часу в дорозі та оптимізації зв'язності мережі є актуальним незалежно від швидкості.

Змішаний рух, при якому швидкі та повільні поїзди курсують одними й тими ж коліями, може значно впливати на пропускну здатність та ефективність залізниці.

У дослідження [16] розглядається задача складання розкладу руху для змішаної багатоколіїної та одноколіїної залізничної мережі. З усіх рішень, що мінімізують максимальний відносний час подорожі, вибирається те, що мінімізує суму відносних часів подорожі. В задачах оптимізації враховуються уподобання користувачів, тобто замість штучно запланованих використовується бажаний час відправлення пасажирів. Для знаходження глобального оптимуму задачі оптимізації використовується алгоритм, заснований на правилі бісекції, для забезпечення чітких верхніх меж цільової функції разом з одним трюком, який дозволяє різко зменшити кількість бінарних змінних, що підлягають оцінці, враховуючи лише ті, які дійсно мають значення. Ці дві стратегії разом дозволяють зменшити вимоги до пам'яті та час обчислення, причому останній експоненціально з кількістю поїздів (на кілька порядків для існуючих мереж), порівняно з іншими методами. Наведено кілька прикладів застосування для ілюстрації можливостей та переваг запропонованого методу. Модель застосовується до випадку існуючої високошвидкісної лінії Мадрид–Севілья (двоколіїної), а також кількох подовжень до Толедо, Валенсії, Альбасете та Малаги, які передбачені в майбутніх планах розвитку мережі високошвидкісних поїздів

Іспанії. Результати показують, що час обчислення значно скорочується, і що в деяких коридорах одноколіїних ліній буде достатньо замість двоколіїних.

Останні роки відзначилися значним прогресом у застосуванні теорії складних мереж та інших передових методів для оптимізації залізничних систем. Дослідження [17] обговорювало виклики та аспекти впровадження загальномережевого планувальника для змішаного руху, посилаючись на досвід Індійських залізниць. У роботі [18] наведено огляд зростаючого використання математичних моделей та методів оптимізації для різних задач планування залізничних перевезень, включаючи маршрутизацію та складання розкладу в умовах змішаного руху. Автори зазначають, що планування та експлуатація залізничних транспортних систем є надзвичайно складним завданням через комбінаторну складність основних дискретних оптимізаційних задач, технічні тонкощі та величезний розмір екземплярів задач. Однак, через це, математичні моделі та методи оптимізації можуть призвести до значних вигод як для клієнтів, так і для операторів залізниць, наприклад, з точки зору зниження витрат або покращення якості обслуговування. В останні роки велика та зростаюча група дослідників у спільноті залізничних перевезень присвятила свою увагу цій галузі, розробляючи математичні моделі та оптимізаційні підходи для вирішення багатьох відповідних проблем у процесі планування залізниць. Однак, все ще існує розрив між теорією та практикою за кількома помітними винятками. У цій статті автори розглядають три історії успіху, а саме: довгострокове маршрутизування вантажних поїздів, середньострокове планування ротації рухомого складу та диспетчеризацію поїздів у режимі реального часу. У кожному випадку описуються реальні, успішні впровадження. Автори обговорюють окремі постановки задач, оглядають літературу з оптимізації та зосереджуються на конкретних аспектах, що розглядаються математичними моделями. Автори демонструють на конкретних прикладах, як математична оптимізація може допомогти в плануванні та експлуатації залізниць. Це доводить, що математична оптимізація може допомогти в

плануванні ресурсів рухомого складу. Таким чином, математичні моделі та оптимізація можуть призвести до підвищення ефективності залізничних операцій та слугуватимуть потужним та інноваційним інструментом для вирішення останніх викликів залізничної галузі.

Автори зазначають, що одним із перших кроків у процесі планування залізничної компанії є пошук стратегічного маршруту для розрахункового попиту транспортної мережі. Розрізняють два типи перевезень. З одного боку, є пасажирські перевезення з маршрутом, який здебільшого визначається політичними та історичними умовами. Крім того, маршрути пасажирських поїздів обмежені кількома запланованими проміжними зупинками зі строгими часовими вікнами та деякими запланованими пересадками на інші поїзди.

Також широко вважається, що пасажирів очікують стабільного та часто повторюваного обслуговування. З іншого боку, є вантажні перевезення з часто менш суворими вимогами до часу відправлення та прибуття та менш обмеженими маршрутами. Крім того, попит на вантажні поїзди набагато більш мінливий порівняно з повторюваною кількістю пасажирів. Метою для обох типів перевезень є пошук маршрутів для набору пар пунктів відправлення та прибуття, які відповідають пропускній здатності мережі та мінімізують результуючі витрати. Типовими функціями витрат для пасажирських перевезень є експлуатаційні витрати або досвідчений час подорожі. У випадку громадського транспорту це добре вивчена проблема.

Залізничні системи в Європі експлуатуються змішаним рухом. Вантажні та пасажирські поїзди майже у всіх районах мають однакову інфраструктурну мережу та споруди. Таким чином, ці два типи перевезень не можна розглядати окремо, а їх необхідно розглядати в комплексному підході для забезпечення обґрунтованих стратегічних прогнозів. Спільною властивістю всіх залізничних мереж є те, що зміни інфраструктури завжди є капіталомісткими та довгостроковими проектами. Отже, необхідно проаналізувати існуючу мережу, щоб оцінити та найкраще використати

доступну потужність. Вантажні перевезення в цьому відношенні мають основну перевагу, що майбутній попит може бути набагато легше розподілений на доступну потужність. У статті автори зосереджуються на маршрутизації вантажних поїздів на рівні стратегічного планування у спрощеній (макроскопічній) транспортній мережі. Головна мета полягає у визначенні макроскопічних маршрутів для вантажних поїздів, враховуючи доступну залізничну інфраструктуру та інваріантний пасажиропотік. Вони починають з опису проблеми маршрутизації вантажних поїздів та вводять конкретні нелінійні питання нашої моделі оптимізації. Також повідомляється про інтеграцію реалізації запропонованого алгоритму в IT-ландшафт відділу розвитку та моделювання перевезень (GSV) Deutsche Bahn Mobility Logistics AG.

Автори наводять залізничну мережу, яка використовується певною кількістю пасажирських поїздів, та модельний день, розділений на кілька інтервалів. Кожен часовий проміжок представляє особливу дорожню ситуацію дня та складається з кількох годин, наприклад, ранкового та денного піку робочого дня або ночі з досить невеликою кількістю пасажиропотоку. Автори класифікують поїзди на різні стандартні типи поїздів, які описують залежні від колії характеристики поїздів, наприклад, час руху, час інтервалу або спеціальні технічні вимоги до колії. Час інтервалу визначає мінімальну різницю в часі між двома поїздами, що в'їжджають на одну й ту саму колію в мережі. Однією з поширених спеціальних вимог до типу поїзда для колії є електрифікація колії. Заданий пасажиропотік просто описується кількістю поїздів певного типу поїзда для кожного часового проміжку. Зокрема, немає інформації про фактичний розклад руху поїздів. Нам відомо лише, що ці поїзди споживають пропускну здатність колії протягом відповідного часового проміжку. З боку попиту вантажні поїзди визначаються парою пунктів відправлення та призначення, часом відправлення та типом поїзда. Завдання полягає в тому, щоб знайти маршрут для кожного вантажного поїзда, який не перевищує задану відстань та

обмеження часу руху, а також мінімізувати очікувані затримки. За допомогою обмежень відстані та часу руху можна контролювати відхилення від найкоротшого або найшвидшого маршруту. Оскільки в дослідженні розглядається лише стратегічний маршрут із приблизним часом, мінімальні очікувані затримки повинні забезпечити існування доцільного розкладу руху або принаймні збільшити ймовірність його існування. У цьому дослідженні проблеми все ще відсутня пропускна здатність колій, і незрозуміло, як виміряти очікувану затримку. Моделювання пропускної спроможності залізниць є технічно дуже складним, і тому прогнозування заторів та часу очікування є серйозною проблемою. Тим не менш, вирішальним фактором є те, що часу очікування майже немає, доки суміш розподілених поїздів може бути оброблена пропускною спроможністю інфраструктури. Як тільки досягнуто ліміту пропускної спроможності, починаються затори, і безперебійна робота більше неможлива. Чим ближче до ліміту пропускної спроможності, тим більша затримка виникає для поїздів, які знаходяться в кінці розкладу. Як тільки кількість поїздів перевищує ліміт пропускної спроможності, можлива затримка зростає ще швидше і в певний момент стає визначеною. Оскільки ми знаємо лише кількість поїздів, але не фактичний розклад, призначення очікуваних затримок конкретним поїздам неможливе.

Застосування моделей складних мереж для аналізу та оптимізації розкладу руху поїздів в Україні є перспективним напрямком. Моделювання розкладу як мережі може допомогти виявити критичні точки, де збої можуть мати найбільший вплив, що дасть змогу впровадити цільові заходи та резервні часові вікна, особливо з урахуванням впливу вантажного руху та потенційних збоїв. Розуміння того, як затримки, спричинені вантажним рухом, впливають на розклад пасажирських поїздів, має вирішальне значення для розробки надійніших розкладів. Ці знання можуть лягти в основу розробки розкладів, які мінімізують ланцюгові наслідки затримок та підвищують загальну пунктуальність пасажирських перевезень.

Інтегрована модель Informer, яка використовує теорію складних мереж, може бути застосована для довгострокового прогнозування пасажиропотоку на українській залізниці з урахуванням сезонних коливань та впливу зовнішніх факторів. Точне прогнозування допоможе оптимізувати планування пропускної здатності, особливо на маршрутах зі змінним попитом. Мережевий підхід до моделювання взаємозалежностей між станціями може призвести до точніших прогнозів попиту та кращого планування послуг.

Моделі, спрямовані на мінімізацію загального часу в дорозі пасажирів, можуть бути використані для оптимізації маршрутів та схем зупинок поїздів в Україні з урахуванням обмежень змішаного руху та існуючої інфраструктури. Стратегічні коригування маршрутів та зупинок можуть покращити сполучення та скоротити час пересадок для пасажирів навіть у межах існуючих обмежень швидкості. Модель оптимізації для надзвичайних ситуацій може бути застосована в українському контексті для швидкої адаптації послуг у разі непередбачених подій.

Для покращення складання розкладу вантажних поїздів без порушення пасажирських перевезень можуть бути застосовані поетапні евристики диспетчеризації та інші оптимізаційні алгоритми. Пріоритетність розкладу пасажирських поїздів при ефективній інтеграції вантажних перевезень має важливе значення для мінімізації затримок та максимізації загальної ефективності мережі. У довгостроковій перспективі слід розглянути можливість спеціалізації залізничних напрямків для розділення вантажних та пасажирських перевезень там, де це географічно можливо. Операційні стратегії, такі як гармонізація швидкості та об'єднання поїздів у групи, також можуть бути використані на окремих коридорах для зменшення негативного впливу змішаного руху.

Використання рамки для вимірювання стійкості на основі теорії складних мереж може допомогти виявити критичні вузли та зв'язки в українській залізничній мережі та оцінити її вразливість до різних збоїв.

Метрики центральності мережі можуть бути використані для визначення пріоритетів зусиль з відновлення після пошкодження інфраструктури або інших збоїв. Сучасні технології, такі як ШІ, аналіз даних та IoT, можуть відігравати важливу роль у створенні більш стійкої української залізничної системи

Отже, взявши до уваги проведені дослідження можна виділити кілька напрямків удосконалення системи пасажирських перевезень в Україні:

1. Впровадження оптимізації розкладу на основі складних мереж: Рекомендується впровадити методи моделювання складних мереж для аналізу та оптимізації існуючих розкладів руху поїздів, зосереджуючись на виявленні потенційних точок нестабільності та включенні резервних часових вікон на основі історичних даних про затримки, особливо з урахуванням впливу змішаного вантажного руху. Слід також вивчити алгоритми, які можуть динамічно коригувати розклади у відповідь на збої в реальному часі, враховуючи пріоритетність пасажирських поїздів та впроваджуючи правила перепланування вантажних поїздів для мінімізації їх впливу на пасажирські перевезення.

2. Покращення можливостей прогнозування пасажиропотоку: Рекомендується інвестувати в передові системи прогнозування пасажиропотоку, які інтегрують теорію складних мереж для моделювання взаємозалежностей між станціями та підвищення точності прогнозів попиту на різних маршрутах та в різний час, можливо, використовуючи оптимізовану модель Informer. Також слід включити зовнішні фактори (наприклад, прогнози погоди, великі події, економічні показники) до моделей прогнозування для подальшого підвищення їх точності та забезпечення більш цілісного розуміння пасажирського попиту.

3. Оптимізація мережі обслуговування поїздів: Пропонується провести комплексний аналіз поточної мережі обслуговування поїздів з використанням оптимізаційних моделей для виявлення можливостей скорочення загального часу в дорозі пасажирів шляхом стратегічного

коригування маршрутів, оптимізованих схем зупинок та ефективного складання розкладу, враховуючи обмеження змішаного руху та існуючої інфраструктури. Слід надати пріоритет оптимізації ключових коридорів з високим пасажиропотоком та вивчити можливість запровадження більш прямих сполучень між великими містами.

4. Покращення управління змішаним рухом: Рекомендується поетапний підхід до покращення управління змішаним рухом, починаючи з впровадження передових алгоритмів складання розкладу, які надають пріоритет пасажирським поїздам, ефективно інтегруючи вантажні перевезення, можливо, використовуючи інструменти моделювання для тестування різних сценаріїв розкладу. У довгостроковій перспективі слід вивчити можливість розвитку виділених вантажних коридорів або стратегічного розділення вантажних та пасажирських перевезень на існуючих лініях там, де це географічно та економічно доцільно. Слід також дослідити потенціал операційних стратегій, таких як гармонізація швидкості та об'єднання поїздів у групи, на окремих коридорах для покращення потоку руху.

5. Підвищення стійкості залізничної мережі: Рекомендується провести ретельну оцінку стійкості української залізничної мережі з використанням багатовимірної рамки, яка враховує доступність, невразливість та відновлюваність, застосовуючи аналіз складних мереж для виявлення критично важливих компонентів інфраструктури (вузлів та зв'язків) та потенційних вразливостей до різних збоїв, включаючи ті, що спричинені конфліктом. Слід розробити та впровадити цілеспрямовані стратегії для підвищення стійкості цих критичних компонентів, включаючи заходи резервування, диверсифікацію маршрутів та надійні плани відновлення на основі метрик центральності мережі, з чітко визначеними протоколами реагування на різні типи збоїв. Також слід інвестувати в сучасні технології, такі як системи моніторингу в реальному часі, інструменти прогнозування технічного обслуговування та інтелектуальні системи управління для

покращення здатності мережі передбачати, витримувати та відновлюватися після збоїв, включаючи кіберзагрози.

6. Використання даних та технологій: Наголошується на важливості інвестицій у можливості збору та аналізу даних для підтримки впровадження стратегій оптимізації на основі складних мереж, включаючи збір вичерпних даних про пасажиропотоки, розклади поїздів, затримки та стан інфраструктури. Рекомендується вивчити використання методів ШІ та машинного навчання для різних аспектів залізничних операцій, включаючи складання розкладів у реальному часі, управління рухом, прогнозування технічного обслуговування інфраструктури та рухомого складу, а також підвищення кібербезпеки.

7. Поетапне впровадження та пілотні проекти: Пропонується поетапне впровадження рекомендованих стратегій, починаючи з пілотних проектів на окремих коридорах для оцінки їх ефективності та вдосконалення підходів перед ширшим розгортанням по всій українській залізничній мережі, забезпечуючи, щоб уроки, отримані в результаті цих пілотних проектів, враховувалися на наступних етапах впровадження.

Аналіз наукової літератури виявив низку методів та підходів, які можуть бути використані для покращення стабільності розкладу, прогнозування пасажиропотоку, оптимізації мережі обслуговування поїздів, управління змішаним рухом та підвищення стійкості мережі. Враховуючи специфічний контекст української залізничної системи, включаючи змішаний рух, обмеження інфраструктури та поточні виклики, важливо адаптувати та поступово впроваджувати ці стратегії. Застосування підходу, орієнтованого на дані та системи, з використанням теорії складних мереж та сучасних технологій, може призвести до підвищення ефективності, надійності, безпеки та стійкості пасажирських залізничних перевезень в Україні, сприяючи покращенню досвіду пасажирів та загальній стійкості транспортної системи.

3 Дослідження системи перевезень пасажирів швидкісними і звичайними поїздами на основі методів аналізу складних мереж

Запропонований підхід для аналізу залізничної системи перевезень пасажирів базований на зображенні взаємозв'язків між залізничними станціями у вигляді графової структури, де вершинами графа є початкові і кінцеві залізничні станції за маршрутами руху пасажирських поїздів, а дугам відповідають призначення швидкісних і звичайних пасажирських поїздів відповідної категорії. Для проведення такого сітьового аналізу була використана інформація зі «Службового розкладу руху пасажирських поїздів», складеного відповідно до графіка руху за 2018-2019 рр. [20]. Для узагальнення інформації була створена база даних щодо переліку початкових і кінцевих пунктів прямування поїздів, їхніх номерів із віднесенням до категорії відповідно до класифікації [21]. Створення та візуалізація графа, проведення розрахунків виконано в середовищі Python. Побудований граф Р складається з 61 вершини і 135 дуг. У табл. 3.1 наведено кількість сполучень мережі графа Р за категоріями пасажирських поїздів.

Таблиця 1

Категорії пасажирських поїздів і кількість сполучень мережі графа Р

Категорія	Кількість	Відсоток
пасажирський	6	4.4 %
швидкий пасажирський	70	51.9 %
швидкісні (IC, IC+)	25	18.5 %
пасажирський сезонний	8	5.9 %
швидкий сезонний	19	14.1 %
пасажирський	6	4.4 %
Kyiv Borispil Express	1	0.7 %
Разом	135	100 %

З таблиці видно чітке домінування «швидкого пасажирського» сегмента, який становить 51,9 % усіх маршрутів. Це свідчить про пріоритетне розвинення поїздів середнього рівня, що з'єднують великі міста і регіональні центри. На другому місці є «швидкісні» поїзди денного руху (IC, IC+) - 18,5 %, що відображує активне впровадження сполучень із маршрутною швидкістю відповідно від 80 та 90 км/год і більше, але ще не на рівні абсолютного домінування. Такі поїзди є найбільш комфортними та мають сидячі місця з тривалістю руху до 6 год. Сезонні маршрути (пасажирські сезонні 5,9 % і швидкі сезонні 14,1 %) у сумі складають понад 20 % мережі, що вказує на значну адаптацію розкладу до літніх пікових потоків відпочивальників. Натомість цілорічні поїзди «пасажирський цілорічний» (4,4 %) складають малу частку, що говорить про обмежений кількість маршрутів із постійною віддачею. Така категоріальна структура мережі демонструє націленість на підвищення швидкості та якості обслуговування основних пасажирських потоків. Візуалізація графа Р мережі швидкісних і звичайних пасажирських поїздів відповідно до графіка руху за 2018-2019 рр. наведено на рисунку 3.1.

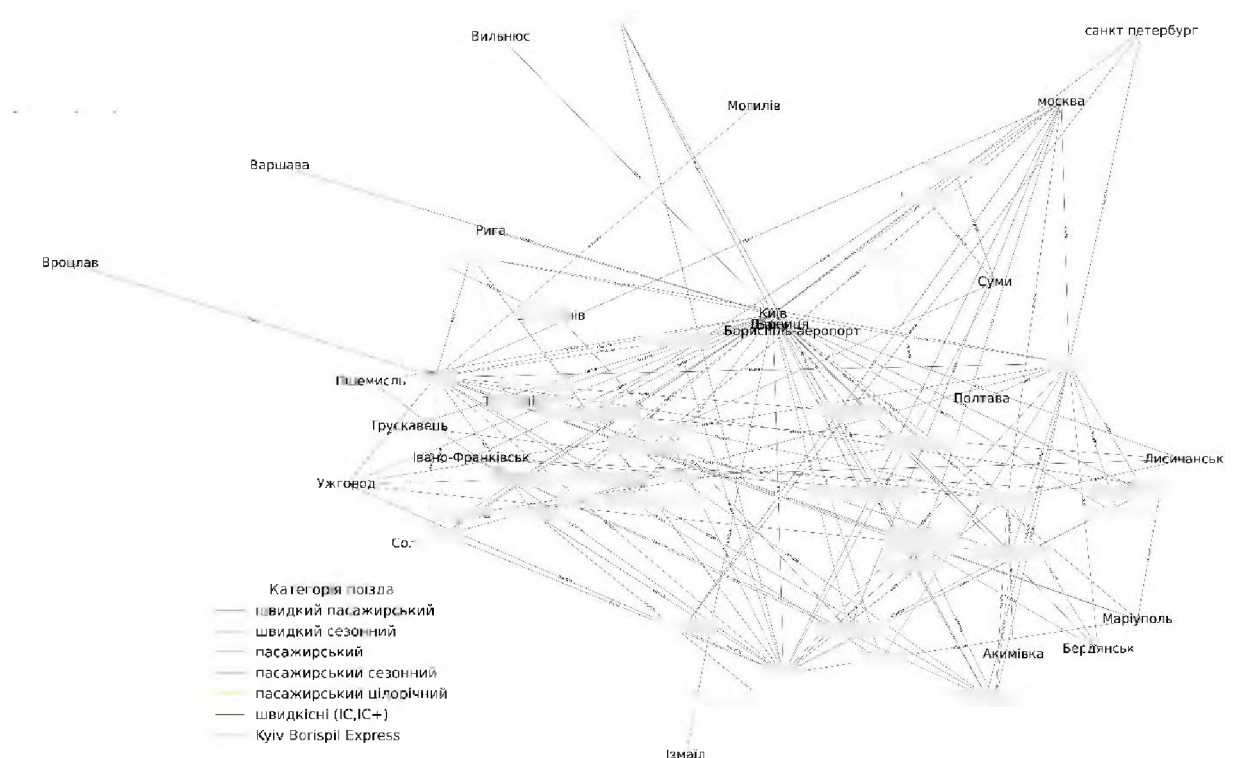


Рисунок 3. 1 - Візуалізація графа Р мережі швидкісних і звичайних пасажирських поїздів згідно зі Службовим розкладом

На першому етапі дослідження системи перевезень пасажирів здійснено статистичне оцінювання топології графа. Основними характеристиками транспортної активності кожної станції (вокзалу) у системі перевезень прийнято показники вхідні (In-Degree) і вихідні (Out-Degree) степені вершин графа Р. На рисунку 3. 2 наведено діаграму степенів вершин.

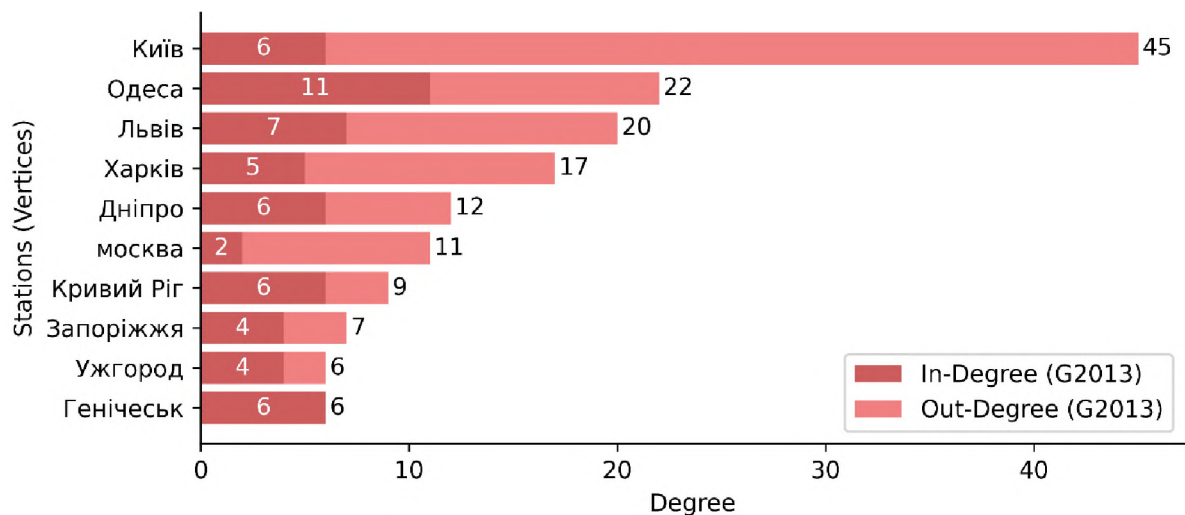


Рисунок 3.2 - Діаграма 10 найкращих залізничних вокзалів із найбільшими значеннями степенів вершин відповідно вхідних (In-Degree) і вихідних (Out-Degree)

Найвищий сумарний ступінь вершини має вокзал Київ-Пасажирський (All-Degree - 45), що підтверджує його роль як головного національного залізничного хабу з переважанням вихідних маршрутів (Out-Degree - 39). Це означає, що з Києва відправляють найбільше пасажирських маршрутів. Така концентрація маршрутів свідчить про радіальну структуру мережі з надмірною залежністю від столиці. Інші високозв'язні вокзали, такі як Одеса, Львів, Харків і Дніпро, відіграють роль регіональних центрів, що забезпечують зв'язність мережі в межах Сходу, Заходу і Півдня України,

виконуючи важливу роль для децентралізації пасажирських потоків. Наявність іноземної станцій підтверджує ступінь інтеграції мережі УЗ у міжнародні пасажирські перевезення, актуальні на момент складання графіка. Москва має лише два вхідних призначення з України, але дев'ять маршрутів виходить в Україну, що може бути пов'язано зі збереженням напрямків через Київ або Харків. Такі вокзали, як Кривий Ріг, Запоріжжя, Ужгород, Генічеськ, мають помірну роль у системі залізничних перевезень, але з помітними транспортними функціями, що пов'язані з їхнім географічним або курортним розташуванням (наприклад Генічеськ є морським курортом, Ужгород - прикордонною станцією).

Асиметрія між вхідними та вихідними степенями деяких вокзалів (особливо в Києва) свідчить про функціональну спеціалізацію вокзалів як відправних, так і приймальних центрів пасажиропотоку. Центральна роль Києва у транспортній топології робить систему вразливою до перевантажень і функціональних збоїв.

Для детального аналізу степеня центральності вершин графа мережі призначень пасажирських поїздів у дослідженні було застосовано алгоритм кластеризації K-means, який поділив значення вершин на чотири кластери відповідно для вхідного (In-degree), вихідного (Out-degree) і загального (All-degree) степеня вершин (рисунок 3.3).

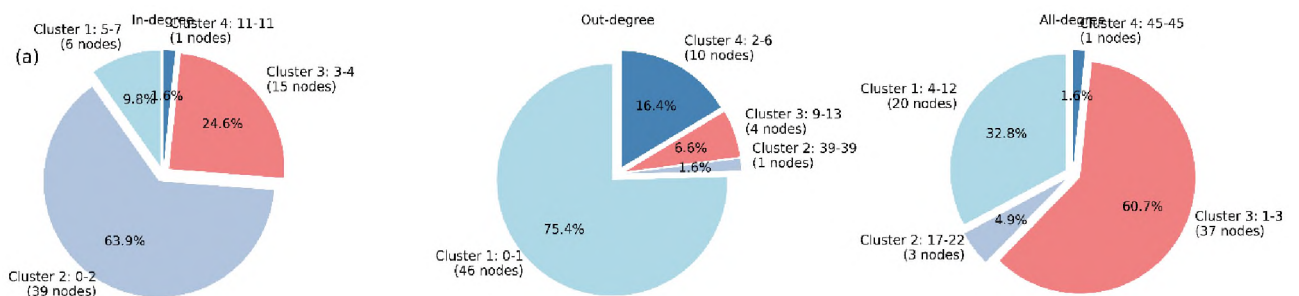


Рисунок 3.3 - Діаграма розподілу значень степеня вершин у мережі призначень ПФПП за чотирма кластерами: а - вхідний степінь (In-Degree); б - вихідний степінь (Out-Degree); в - загальний степінь (All-Degree)

Аналіз показує (рисунок 3.3), що для вхідного ступеня центральності переважає кластер 2 із найменшими значеннями (0-2), який охоплює 63,9 % вершин (39 станцій). Це свідчить про наявність значної кількості малих станцій з обмеженою кількістю призначень пасажирських поїздів. Другим за розміром є кластер 3 (значення ступенів 3-4), що містить 24,6 % станцій (15 станцій), що може свідчити про середні за значенням станції, які мають регіональне значення. Щодо вихідного ступеня центральності, то переважає кластер 1 (0-1 ступінь), який містить 75,4 % вузлів (46 станцій). Це свідчить про значну кількість станцій, із яких відправляють лише обмежену кількість маршрутів поїздів. Наступним за значенням є кластер 4 (ступені 2-6), що охоплює 16,4 % вузлів (10 станцій), які є більш значущими вузлами для відправлення поїздів. Для загального ступеня центральності найбільшим за розміром є кластер 3 (ступені 1-3), який займає 60,7 % вершин (37 станцій), що свідчить про домінування в мережі станцій із низькими показниками центральності. Кластер 1 (ступені 4-12) включає 32,8 % вузлів (20 станцій), які відіграють важливу роль у забезпеченні пасажирського руху. Отримані результати свідчать про домінування у графі мережі швидкісних і звичайних пасажирських поїздів станцій із низьким і середнім ступенем центральності, а також обмеженою кількістю високозв'язних вузлів. Така структура мережі може свідчити про централізованість системи, яка залежить від невеликої кількості великих станцій-хабів, що впливає на стабільність функціонування мережі та вразливість до збоїв у роботі цих вузлів.

Виявлення станцій-хабів (англ. hubs) є характерною особливістю безмасштабних мереж (free-scale networks) [22,23]. За таких умов важливим є деталізація аналізу та перевірка відповідності емпіричного розподілу ступеня вершин графа степеневому закону (power-law) [22]. Для емпіричної перевірки належності мережі призначень пасажирських поїздів до цього класу мереж було застосовано статистичні тести відповідності степеневому розподілу та експоненційному розподілу. На рисунку 3.4 подано зіставлення емпіричних

(спостережуваних) частот загальних степенів вершин із теоретично очікуваними за степеневим (power-law) та експоненційним (exponential) розподілами.

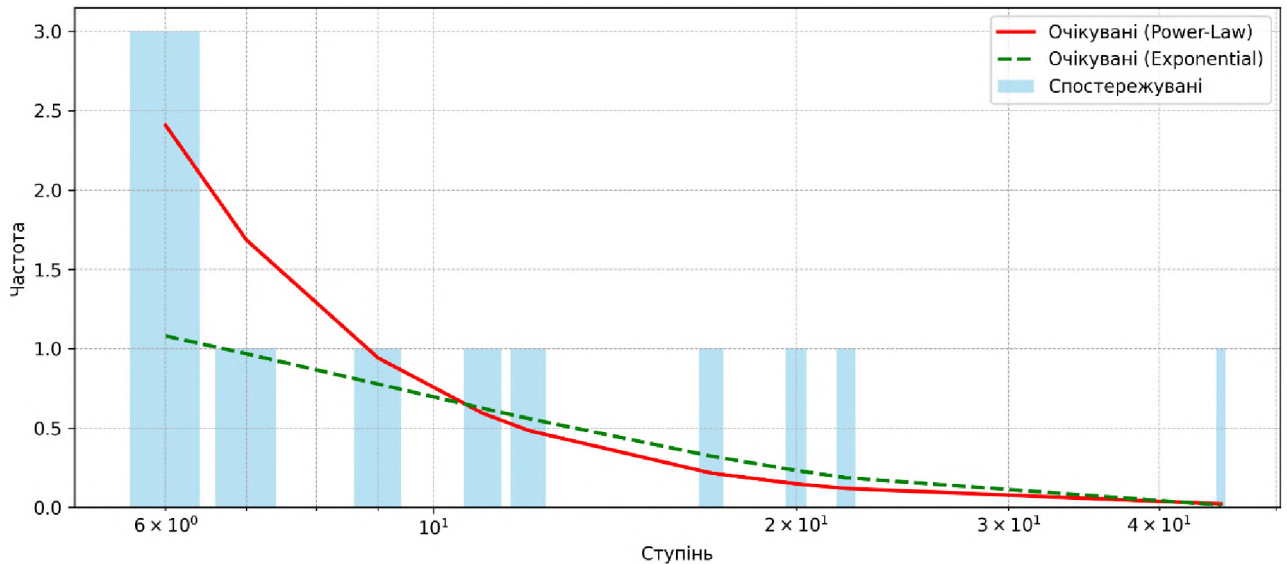


Рисунок 3.4 - Діаграма відповідності розподілів емпіричних імовірностей загальних степенів вершин графа ступеневому розподілу та експоненційному розподілу

Результати показали, що значення показника степеневого розподілу (α) для загального степеня центральності становить 2,502, що відповідає типовим значенням для безмасштабних мереж ($2 < \alpha < 3$) [22]. Це підтверджує припущення про степеневий розподіл вершин. Отримане значення KS-статистики для загальних степенів у моделі power-law становить 0,068, що демонструє гарну відповідність емпіричних даних степеневому розподілу. KS-статистика для експоненційного розподілу значно більша (0,248), що підтверджує гіршу відповідність цього розподілу. Порівняння інформаційних критеріїв AIC також свідчить на користь степеневого розподілу ($AIC_{powerlaw} = 123,95$) порівняно з експоненційним ($AIC_{exponential} = 134,12$). Додатково проведено аналіз критерію R, який порівнює моделі степеневого та експоненційного закону розподілу ($R_{power_vs_exp}$). Для

загальних степенів значення критерію R становить 1,726 за відповідного значення $p\text{-value} = 0,084$. Оскільки значення R є додатним і суттєво перевищує 1, це підтверджує, що степеневий розподіл краще описує спостережувані дані, ніж експоненційний.

З урахуванням отриманих результатів і проведених тестів можна висунути гіпотезу про належність досліджуваної мережі швидкісних і звичайних пасажирських поїздів графа P до класу безмасштабних мереж. Це підкреслює існування окремих центральних вузлів, які мають вирішальний вплив на стабільність і робастність мережі, що важливо враховувати під час планування та експлуатації залізничної пасажирської системи.

Аналіз компонент зв'язності графа мережі швидкісних і звичайних пасажирських поїздів свідчить, що граф не є ні сильно, ні слабо зв'язаним, містить 41 сильну зв'язану компоненту, із яких лише одна велика (розміром 21 вершина), а решта лише поодинокі вузли. Виявлено дві слабо зв'язані компоненти, де основна (59 вершин) та одна мала (дві вершини). Така структура мережі зумовлює суттєві обмеження у використанні традиційних показників центральності за близькістю (англ. *closeness centrality*), оскільки класична близькість не може бути коректно розрахована через неможливість досягнення ізольованих компонентів із головної компоненти. Щоб уникнути цієї проблеми, у дослідженні запропоновано використовувати показник гармонійної центральності (англ. *harmonic centrality*) [23]. На рисунку 3.5 наведено функції кумулятивного розподілу гармонійної центральності за близькістю графе P .

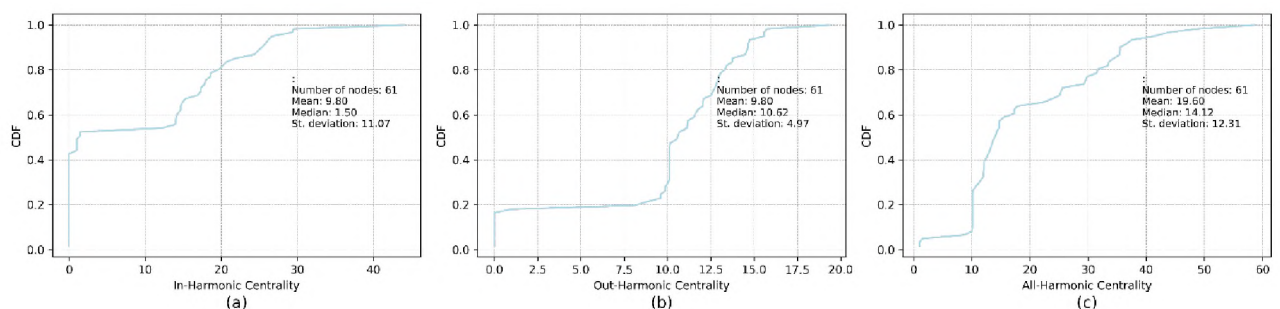


Рисунок 3.5 -Діаграма функцій кумулятивного розподілу гармонійної центральності за близькістю графа Р: а - in-harmonic centrality; б - out-harmonic centrality; в - all-harmonic centrality

За вхідною гармонійною центральністю (рисунок 3.5, а) середнє значення дорівнює 9,80 за медіани 1,50 і стандартного відхилення 11,07. Значна розбіжність між середнім і медіаною свідчить про велику неоднорідність і суттєву концентрацію високих значень центральності в невеликої кількості станцій. Майже 60 % вершин мають дуже низькі значення (< 5), що вказує на слабу доступність багатьох станцій у мережі. За вихідною центральністю (рис. 5, б), середнє значення аналогічне попередньому – 9,80, але медіана суттєво вища і складає 10,62, а стандартне відхилення нижче – 4,97. Більша однорідність розподілу свідчить про більш рівномірні можливості станцій щодо досягнення інших вузлів, хоча також є група станцій із низькими показниками центральності.

За загальною центральністю (рисунок 3.5, в) середнє значення складає 19,60, медіана відповідає 14,12, а стандартне відхилення має значення 12,31. Розподіл демонструє помірну нерівномірність, що свідчить про існування групи вузлів із високою центральністю, які ефективно зв'язують між собою окремі підмережі.

Проведений аналіз гармонійної центральності підтверджує нерівномірність зв'язності у графі Р, наявність централізованих вузлів-хабів і суттєву частку малодоступних станцій.

Аналіз центральності за посередництвом підтверджує наявність яскраво вираженої ієрархічності та централізованості мережі швидкісних і звичайних пасажирських поїздів. На рисунку 3.6 подано діаграми функцій кумулятивного розподілу (CDF) центральності за посередництвом для графа Р як для всієї мережі (рис. 3.6, а), так і окремо для найбільшої сильно зв'язаної компоненти (SCC) (рис. 3.6, б).

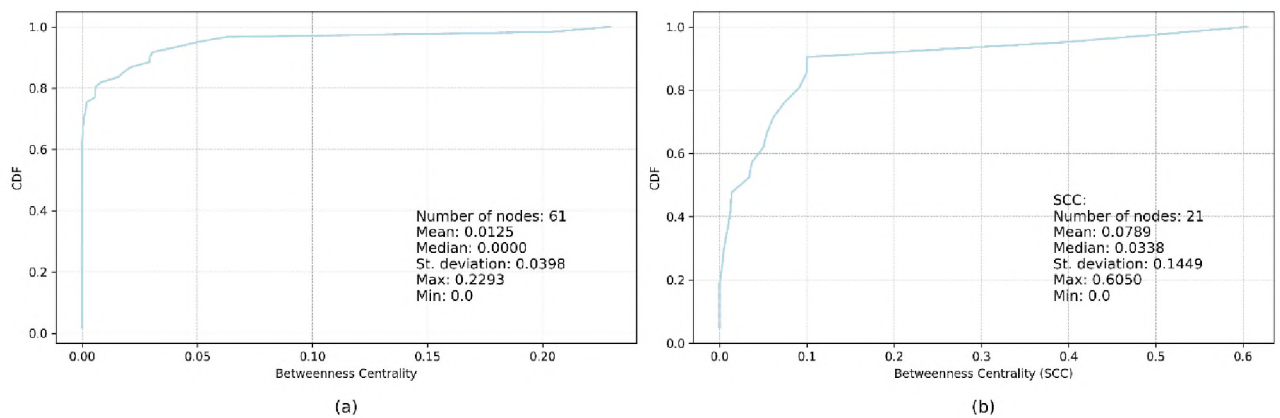


Рисунок 3.6 - Діаграма функцій кумулятивного розподілу центральності за посередництвом графа Р: а - центральність за близькістю для всієї мережі; б - центральність за близькістю для SCC

Для вершин загального графа Р (рис. 3.6, а) середнє значення центральності за посередництвом по всій мережі дуже низьке, складає 0,0125, медіана дорівнює 0, стандартне відхилення складає 0,0398. Максимальне значення центральності становить 0,2293. Форма кривої CDF показує, що понад 80 % вершин мають близькі до нуля значення центральності за посередництвом. Це свідчить про те, що лише невелика кількість станцій виконує роль важливих вузлів-транзитерів, через які проходять оптимальні маршрути пасажирських поїздів у мережі. Такий розподіл вказує на високий ступінь централізованості мережі, де кілька основних вузлів забезпечують зв'язок між іншими станціями. Форма кривої CDF для SCC (рис. 3.6, б) демонструє, що близько 30 % вершин компоненти мають центральність за посередництвом вищу за 0,1, що означає наявність декількох критичних вузлів, які забезпечують трафік всередині компоненти і мають високу стратегічну важливість для зв'язності компонентів графа. Для найбільш сильно зв'язаної компоненти SCC середнє значення центральності суттєво вище, складає 0,0789, медіана також вища – 0,0338, а стандартне відхилення – 0,1449. Максимальне значення центральності в SCC досягає 0,6050, що є суттєво більшим порівняно із загальною мережею.

Для дослідження асортативного змішування (англ. assortative mixing), що характеризує тенденції вузлів з'єднуватися з іншими вузлами, які мають подібні значення ступенів, у роботі застосовано коефіцієнти кореляції Пірсона та Спірмена для графа Р [24]. За значеннями таблиці 3. 2, зв'язок між вхідним і вихідним степенями (Pearson Input-Output) за коефіцієнтом Пірсона має дуже сильну статистичну значущість ($p\text{-value} = 7.10 \times 10^{-5}$), але за кореляцією Спірмена залежність відсутня. Це вказує на помірно позитивну лінійну залежність між кількістю вхідних і вихідних зв'язків вузлів. Вузли, що мають високий ступінь вхідних зв'язків, помірно ймовірно матимуть також більше вихідних зв'язків.

Таблиця 3.2

Коефіцієнти кореляції Пірсона та Спірмена для графа Р

Показник	Коефіцієнт кореляції	p-value
Pearson Input-Output	0.4863	7.1
Spearman Input-Output	0.2325	0.0
Pearson All-Input vs All-Output	0.7052	2.2
Spearman All-Input vs All-Output	0.8348	6.2
Pearson Out-All Degree	0.9624	4.1
Spearman Out-All Degree	0.6586	7.9

Зв'язок між загальним ступенем входу і виходом (All-Input vs All-Output) за коефіцієнтом Пірсона є статистично дуже значущим результатом ($p\text{-value} = 2.22 \times 10^{-10}$). Кореляція Спірмена для цих показників ще сильніша. Це свідчить про те, що станції з високим загальним ступенем мають значні як вхідні, так і вихідні поїздопотоки, що типово для центральних вузлів, які виконують роль хабів у мережі. Зв'язок між вихідним і загальним ступенем (Out-All Degree) за кореляцією Пірсона надзвичайно сильна й статистично значуща залежність ($p\text{-value} = 4.19 \times 10^{-35}$). За коефіцієнтом Спірмана кореляція теж висока та значуща. Ці результати вказують, що саме вихідний

ступінь є основним фактором, що визначає загальну центральність вузла. Вузли з великою кількістю вихідних зв'язків майже завжди мають великий загальний ступінь, що підтверджує їхню функцію основних точок у поширенні пасажирських поїздів у мережі.

Отже, така пасажирська залізнична мережа демонструє асортативне змішування, що свідчить про наявність вираженої ієрархічної структури, у якій станції з високим ступенем тяжіють до з'єднання з іншими станціями аналогічного високого ступеня. Це має важливі наслідки для стабільності та стійкості мережі, оскільки в асортативних мережах видалення центральних вузлів менш драматично впливає на загальну зв'язність порівняно з дисасортативними мережами [24].

Для визначення макрохарактеристик системи залізничних пасажирських перевезень важливо розрахувати основні параметри графа Р, що наведені в таблиці 3.3.

Таблиця 3

Розрахункові параметри графа Р мережі швидкісних і звичайних пасажирських поїздів згідно зі Службовим розкладом за 2018-2019 рр.

Параметр графа	Значення
Щільність	0.036885
Діаметр	5.0
Ефективний діаметр	4.0
Кількість вершин у найбільшій сильно зв'язаній компоненті (SCC)	21.0
Середня довжина найкоротшого шляху в SCC	2.5
Коефіцієнт кластеризації Воттса-Строгаца	0.333904
Транзитивність	0.060472

Щільність графа (табл. 3.3) зі значенням 0,036885 вказує на невисоку кількість реалізованих зв'язків у мережі відносно максимально можливої [24]. Незважаючи на те, що подібні значення характерні для транспортних систем, за отриманим показником можна припустити наявність потенціалу для подальшого розширення мережі та водночас відобразити проблему ресурсних обмежень, насамперед недостатню кількість пасажирського рухомого складу у філії «Пасажирська компанія» АТ «Укрзалізниця».

Значення діаметра 5 означає, що максимальна кількість пересадок між двома будь-якими досяжними станціями не перевищує п'яти, а ефективний діаметр 4 вказує на те, що більшість пасажирських маршрутів складаються з чотирьох або менше пересадок. Такі значення відповідають структурним властивостям безмасштабних мереж, де маршрути між вершинами скорочені за рахунок центральних вузлів. Слід зазначити, що короткий діаметр мережі є показником її ефективною архітектури, орієнтованою на високий рівень мобільності та комфорту пасажирів, що має особливе значення в контексті конкурентоспроможності залізничного транспорту порівняно з автомобільним або авіаційним.

Середня довжина найкоротшого шляху в найбільшій компоненті SCC [24] складає 2,5 кроку і свідчить про високу доступність станцій у цій компоненті. Пасажири можуть швидко і зручно переміщуватися між основними вузлами без значних часових витрат на пересадки. Коефіцієнт кластеризації Воттса-Строгаца [24] складає 0,333904, що є помірним. Це свідчить про наявність локальних кластерів чи регіональних підмереж, де станції формують більш щільні з'єднання. Це характерно для мереж із вираженою регіональною спеціалізацією. Водночас транзитивність графа [24] складає 0,060472, що є досить низьким значенням, що свідчить про загальну слабу структурну зв'язність станцій на макрорівні. Це підкреслює, що багато зв'язків організовані переважно за принципом «центр-периферія» через основні вузли-хаби, а не за принципом повної взаємної досяжності [25].

Отримані параметри (табл. 3.3) підтверджують, що досліджувана мережа має типову для транспортних систем структуру з вираженою централізацією [25], короткими шляхами між основними станціями та помірною локальною кластеризацією. Однак низький рівень транзитивності свідчить про потенційну вразливість мережі, адже виведення з ладу центральних вузлів може суттєво знизити загальну зв'язність. Для підвищення стійкості та ефективності функціонування мережі важливо посилити взаємозв'язки між периферійними станціями та розвивати додаткові альтернативні маршрути, які зменшать навантаження на центральні вузли.

Отже, для зменшення високої централізованості мережі одним і напрямків удосконалення залізничної пасажирської системи є поступовий перехід до більш децентралізованої конфігурації, що передбачає розширення кількості маршрутів між периферійними станціями з метою зменшення критичної залежності від центральних вузлів. Рекомендується підвищення зв'язності слабо інтегрованих компонент шляхом створення додаткових сполучень, що дозволить розширити найбільшу сильно зв'язану компоненту та покращити загальну навігацію мережі.

Особливу увагу слід приділити модернізації інфраструктури та створенню логістичних центрів найбільш зв'язних вузлів (вокзалів), які відіграють роль транзитних та комутаційних центрів і є критично важливими для збереження функціональності системи.

4 Розробка вимог щодо структури системи підтримки прийняття рішень логістичних центрів залізничних вокзалів

4.1. Розробка системи підтримки прийняття рішень логістичних центрів залізничних вокзалів з використанням WEB-технологій

В роботі пропонується створення в структурі управління позакласного залізничного вокзалу логістичного центру (ЛЦ) для координації пасажирів при впровадженні швидкісного та високошвидкісного руху. Функціонування ЛЦ вимагає тісної взаємодії з пасажирськими компаніями, що дозволить організувати роботу з управління пасажиропотоками за рахунок більш ефективної системи орієнтування, за рахунок чого можна підвищити комфорт пасажирів та скоротити час посадки у поїзд.

Реалізувати систему орієнтування пасажирів на залізничних вокзалах неможливо без розвиненої інформаційної платформи, яка надасть можливість оптимізувати канали збору інформації та забезпечити підтримку прийняття рішень на етапах аналізу, оцінки та вибору орієнтування пасажирів щодо раціональних маршрутів та дій з прямого втручання за рахунок зміни технічних і технологічних параметрів вокзалів (закриття приміщень, виключення ескалаторів, розставлення тимчасових щитів для огороження місць небезпеки, тощо). Механізмом реалізації інформаційного простору є інформаційно-керуюча система (ІКС), яка представляє собою багаторівневу інформаційну систему, що гарантує автоматизоване управління всіма підсистемами системи пасажирських перевезень.

На даний час на залізницях України функціонує Автоматизована система керування пасажирськими перевезеннями на залізницях України (АСК ПП УЗ-Є), що являє собою територіально-розгалужену інформаційно-аналітичну систему, яка працює в реальному масштабі часу за єдиним технологічним процесом обслуговування пасажирів і працівників залізниць.

Метою створення і розвитку АСК ПП УЗ-Є є автоматизація цілої низки технологічних функцій для об'єднання в одній системі процесів, що пов'язані з обліком місць у поїздах, оформленням проїзду пасажирів та перевезень багажу, обліком ремонту та експлуатації пасажирських вагонів, інформаційним забезпечення пасажирів та персоналу залізниць, фінансовим обліком та розподілом доходів, статистичним аналізом показників.

АСК ПП УЗ-Є є інтегрованою системою, до якої входять наступні блоки автоматизованих систем – складових АСК ПП УЗ-Є : АС „Керування обчислювальним процесом”; АС „Оформлення проїзду (перевезень)”; АС „Облік доходних надходжень та їх розподіл”; АС „Інформаційно-пошукові системи”; АС „Аналітично-інформаційна робота”; АС „Регулювання транспортним процесом”; АС „Термінальне обладнання”; АС „Вагонний парк”; АС „Вокзальне господарство”; АС „Комплексна система захисту інформації”; АС „Сервіс”.

Аналіз функцій підсистем показав, що АСК ПП УЗ-Є охоплює лише рівні оперативного та тактичного управління перевізним процесом через рішення функціональних задач на автоматизованих робочих місцях (терміналах), які встановлюються для всіх працівників залізниць, діяльність яких пов'язана з використанням можливостей системи. В той же час в АСК ПП УЗ-Є не існує реалізації функцій стратегічного управління пасажирськими перевезеннями на залізничному транспорті України.

Програма створення ІКС передбачає декілька етапів: удосконалення та розвиток існуючої системи збору та обробки інформації; розвиток ІКС з метою автоматизації підтримки прийняття рішень. Головною метою другого етапу є створення системи підтримки прийняття рішень (СППР) як підсистеми ІКС, що дозволить підвищити якість оперативних, тактичних та стратегічних рішень. Перший етап можна розглядати як процес розвитку ІКС, який в даний час вже реалізовано на залізничному транспорті України (АСК ПП УЗ-Є). В той же час, питання розробки СППР до сих пір є одним із найбільш актуальних та необхідних напрямків підвищення якості управління.

Виходячи із вище описаного, в роботі запропоновано впровадити до АС „Вокзальне господарство” систему підтримки прийняття рішень для орієнтування пасажирів на залізничному вокзалі на основі формування локальної комп’ютерної мережі з розробкою комплексу додаткових задач на АРМ логіста вокзалу на основі роботи запропонованої інтелектуальної моделі прогнозування пасажиропотоків, що інтегрована до системи АСК ПП УЗ-Є.

В роботі пропонується підхід до розробки інтерактивної СППР на основі організації локальної комп’ютерної мережі з використанням WEB-ресурсів технологічного призначення. Однією із найбільш прогресивних технологій побудови СППР є Intranet-архітектура.

Архітектура Intranet об’єднала у собі кращі риси централізованих систем і системи “клієнт-сервер” та характеризується такими ознаками:

- на сервері народжується кінцевий продукт – інформація у формі, яка призначена для подання користувачу;
- для обміну інформацією між клієнтом і сервером використовується протокол відкритого стандарту (TCP/IP);
- інформація передається у вигляді, придатному для сприймання людини;
- прикладна система сконцентрована на сервері (у клієнта є лише програми – навігатори, Web-браузери).

Необхідність швидкої передачі інформації та аналіз інформаційних зв’язків в системі оперативного управління перевезеннями обумовлює специфіку проектування локальної мережі на основі топології “зірка”, в якій головна машина одержує і обробляє всі дані з периферійних пристроїв як активний вузол обробки даних. Концепція такої топології може бути організована на базі технології передачі інформації Ethernet.

Організація обміну інформації в мережі здійснюється відповідно до протоколу передачі гіпертексту HTTP на основі використання логічної архітектури “Web-сервер-Web-клієнт”, в якій програма-сервер (Web-сервер) здійснює обробку запитів, що надходять від програми-клієнта (Web-клієнта), рисунок 4.1. Таким чином, в СППР реалізована схема тонкого клієнта, що працює з віддаленим Web-сервером за допомогою програми Web-навігації, в якості якої може використовуватись стандартний Web-браузер: Mozilla Firefox, Internet Explorer та інші. Такий підхід дозволяє скоротити витрати на апаратне і програмне забезпечення та знизити експлуатаційні витрати на її супровід.

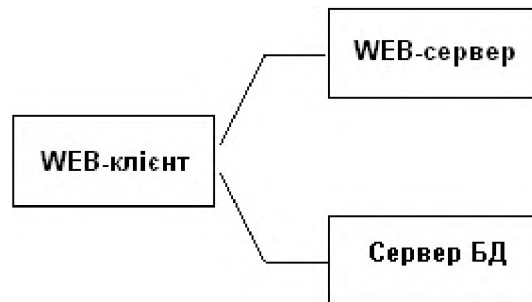


Рисунок 4.1 – Доступ до бази даних на стороні клієнта

Структурна схема локальної мережі в системі логістичних центрів залізничних вокзалів на рисунку 4.2.

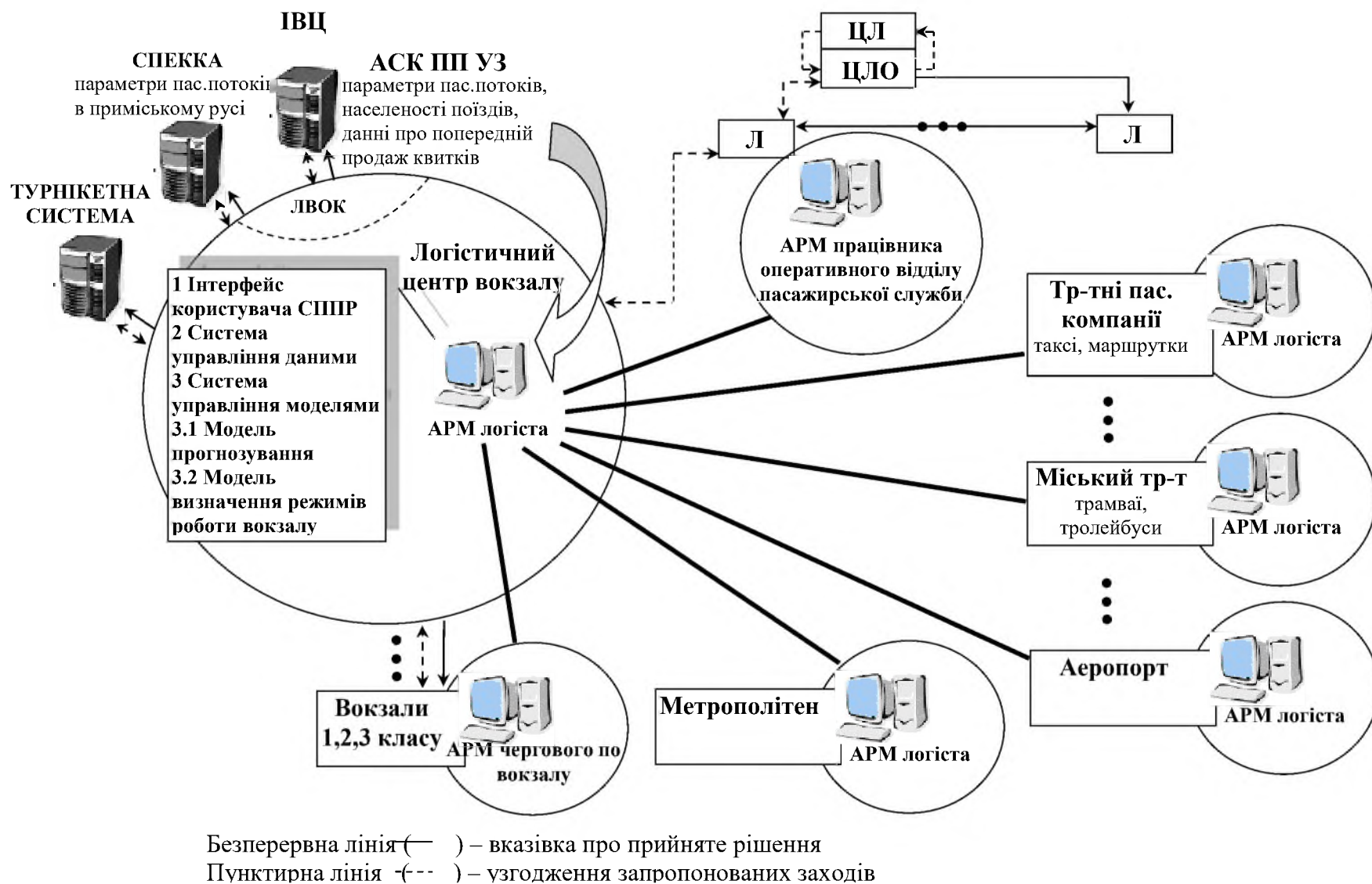


Рисунок 4.2 – Структурна схема локальної мережі в системі логістичних центрів залізничних вокзалів

4.2 Розробка схеми транзиту інформаційних потоків в пасажирських перевезеннях при організації структури бази даних в системі підтримки прийняття рішень

Рішення питань моделювання пасажиропотоків та розробки розкладу роботи залізничного пасажирського терміналу в умовах реалізації системи підтримки прийняття рішень потребує широкої інформаційної бази щодо пасажиропотоків та показників роботи пасажирських поїздів на маршрутах курсування.

Розгалужена інформаційна база системи АСК ПП УЗ, “СПЕКА-00” (РРО) та турнікетної системи дозволяє побудувати принципову схему передачі інформації та організації БД в розробленій СППР, рисунок 4.3.

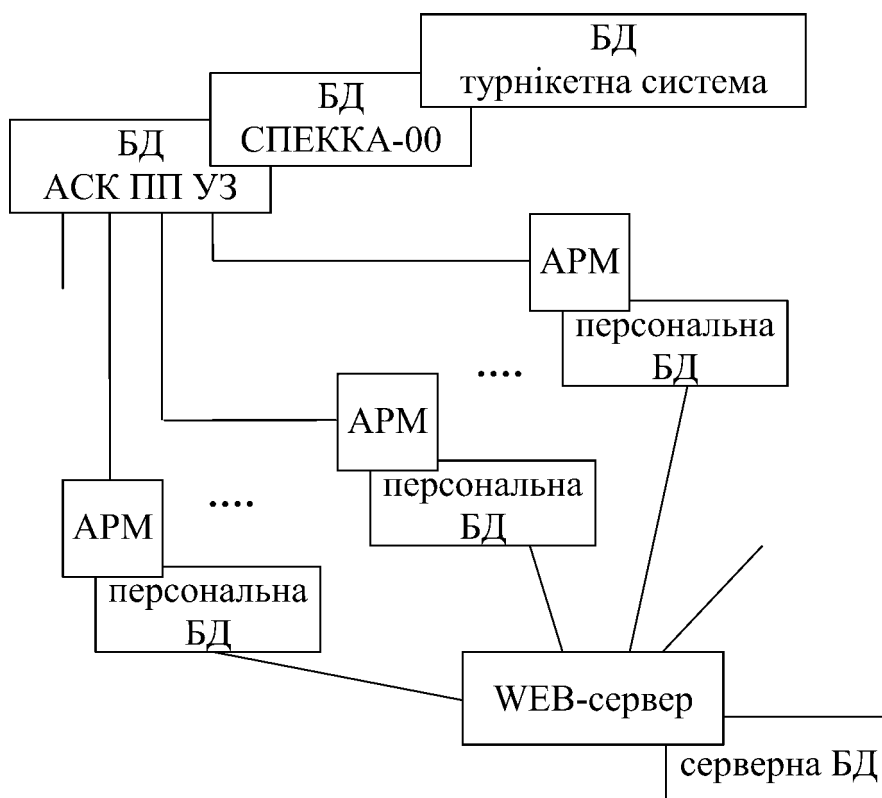


Рисунок 4.3 – Структурна схема передачі інформації при функціонуванні СППР логістичного центру

Нові інформаційні технології в АСК ПП УЗ забезпечують ведення баз даних “Поїзда”, “Місця”, які містять повну інформацію про поїзди, що відправляються з полігонів залізниць формування, на які здійснюються продаж місць та інші квитково-касові операції. Інформація в базах даних АСК ПП УЗ постійно оновлюється та підтримується в актуальному стані. Для повноти забезпечення інформації про пасажиропотоки необхідним є взаємодія з реєстраторами розрахункових операцій “СПЕККА-00” (РРО) в приміському сполученні та з автоматизованою системою контролю доступу пасажирів (турнікетна система) на вокзалі.

4.3. Програмна реалізації інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень

Програмна реалізація СППР логістичних центрів залізничних вокзалів складається з серверної та клієнтської частин. Серверна частина СППР представляє собою комплекс математичних моделей ведення адаптивної технології управління пасажиропотоками на залізничному вокзалі написаний на мові C++, що розташовується безпосередньо на Web-сервері. Розроблений комплекс моделей виконує розрахунки в різних режимах роботи та відрізняється від клієнтської частини тим, що не має елементів управління.

Для спрощення процесу розробки незалежного програмного продукту використано підхід на основі технології написання комплексу математичних моделей в середовищі MATLAB з наступним конвертуванням до незалежно виконуваної програмної реалізації на мові C++. Процес переведення m-коду на мову C++ виконано за допомогою спеціальної утиліти – MATLAB Compiler 7.0 . Структура програми дозволяє легко додавати нові моделі для нарощування функціональних можливостей СППР.

Інтерфейс системи достатньо простий для використання, що дозволяє швидко засвоїти основні етапи застосування розроблених програм. На рисунку 4.4 наведена стартова WEB-сторінка СППР.

Логічна архітектура форм стартової WEB-сторінки дозволяє користувачу за допомогою елементів навігації (гіперпосилання, підкреслений текст) отримувати доступ до роботи з базами даними та окремими компонентами системи, що супроводжується різними формами сторінок.

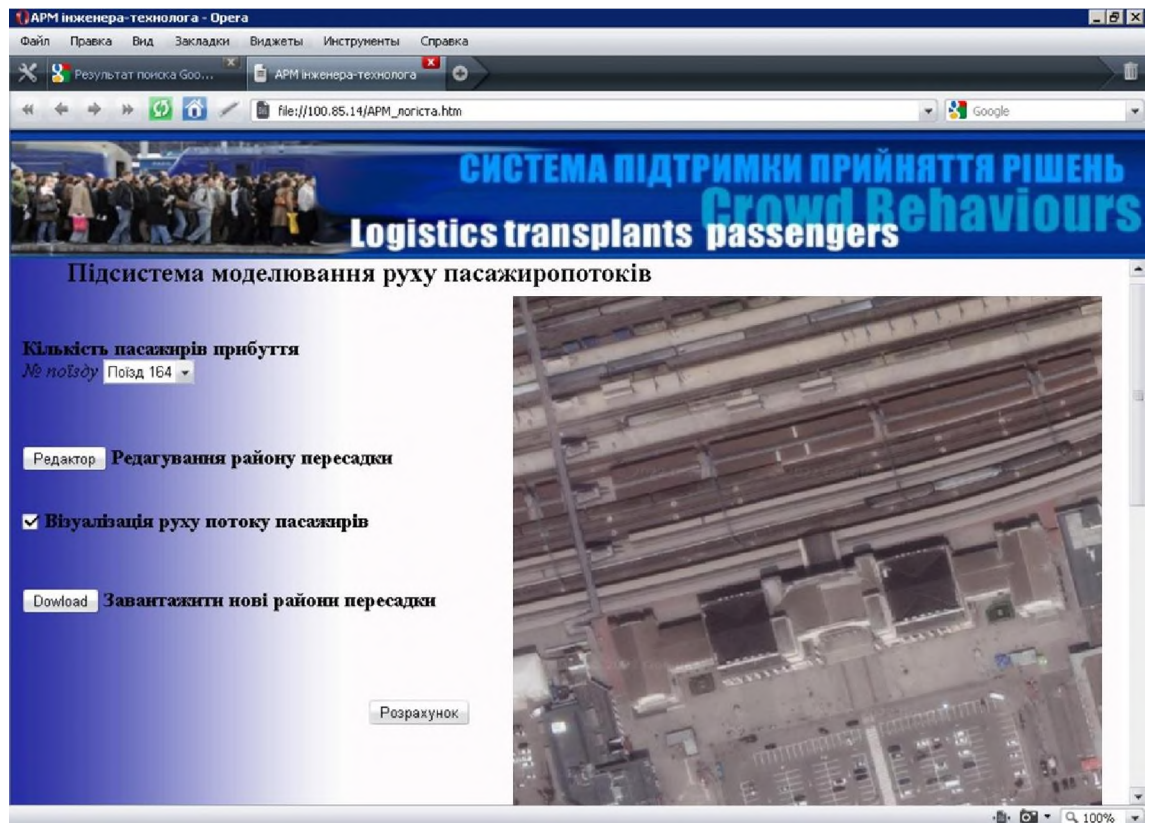


Рисунок 4.4 – Основне вікно системи підтримки прийняття рішень

Особливістю розроблених програмних засобів СППР є можливість управління розрахунками на кожному з етапів автоматизованого режиму роботи системи.

Висновки

Аналіз динаміки перевезення пасажирів залізничним і автомобільним транспортом в Україні у період з 2018 по 2023 рік засвідчив загальну тенденцію до зниження обсягів пасажирських перевезень обома видами транспорту. Особливо суттєвим це зниження було в період 2020-2022 років, що збігається з глобальними карантинними обмеженнями, спричиненими пандемією COVID-19, а також із початком повномасштабної війни в Україні у 2022 році. За результатами дослідження встановлено, що кількість пасажирів, перевезених автомобільним транспортом (автобусами), зменшилася з 1907 млн осіб у 2018 році до 803 млн осіб у 2023 році. Це становить зниження на 57,9 відсотка. У найгірший період 2022 року цей показник сягнув лише 663 млн осіб. Аналогічно, залізничний транспорт продемонстрував зменшення обсягів перевезень з 158 млн осіб у 2018 році до 65 млн осіб у 2023 році, що відповідає скороченню на 58,9 відсотка. Мінімальний рівень 53 млн осіб зафіксовано у 2022 році. У 2023 році в обох видах транспорту спостерігається часткове відновлення обсягів перевезень порівняно з 2022 роком. Це свідчить про поступову адаптацію транспортної системи до нових умов та відновлення мобільності населення, хоча рівні перевезень залишаються значно нижчими, ніж у довоєнний період.

Аналіз динаміки доходів від пасажирських перевезень АТ «Укрзалізниця» у 2019-2023 роках свідчить про хронічну збитковість цього сегмента. Упродовж досліджуваного періоду частка доходів від пасажирських перевезень залишалася порівняно невеликою в загальній структурі, при цьому мала тенденцію до скорочення та нестабільності. Це підтверджується й тим, що за 2024 рік задекларовано збитки від пасажирських перевезень у розмірі 18,1 млрд грн, що демонструє системний характер фінансової нерентабельності даного виду діяльності. У 2019 році доходи від пасажирських перевезень становили 9,9 млрд грн, що було

найбільшим показником за аналізований період. Уже у 2020 році, під впливом пандемії COVID-19, вони зменшилися до 4,1 млрд грн. У 2023 році дохід від пасажирських перевезень зріс до 8,4 млрд грн. Однак навіть це зростання не дозволило вийти на докризовий рівень 2019 року. Крім того, при збереженні високих витрат на утримання рухомого складу та надання соціально орієнтованих послуг, цього доходу недостатньо для покриття витрат.

На основі застосування методу аналізу складних мереж для вивчення топологічних властивостей системи залізничних пасажирських перевезень проведено мережевий аналіз пасажирської залізничної системи України за графом мережі руху швидкісних та звичайних поїздів 2018-2019 рр. із використанням методів теорії складних мереж. Виявлено, що розподіл ступенів вершин підпорядковується степеневому закону, мережа характеризується високою централізованістю, асортативністю та коротким ефективним діаметром. Оцінено коефіцієнт кластеризації, транзитивність, центральність ступеня, посередництва та гармонійної близькості.

На основі дослідження закономірностей розподілу ступенів вершин в залізничній пасажирській маршрутній мережі доведена відповідність розподілів емпіричних ймовірностей загальних ступенів вершин графу степеневому розподілу. Результати показали, що значення показника степеневому розподілу (α) для загального ступеня центральності становить 2,502, що відповідає типовим значенням для безмасштабних мереж ($2 < \alpha < 3$). Це підтверджує припущення про степеневий розподіл вершин. Отримане значення KS-статистики для загальних ступенів у степеневій моделі (power-law) становить 0,068, що демонструє гарну відповідність емпіричних даних степеневому розподілу. З урахуванням отриманих результатів та проведених тестів можна висунути гіпотезу про належність досліджуваної мережі швидкісних та звичайних пасажирських поїздів графу P до класу безмасштабних мереж. Це підкреслює існування окремих центральних вузлів, які мають вирішальний вплив на стабільність і робастність мережі, що

важливо враховувати під час планування та експлуатації залізничної пасажирської системи. На основі результатів запропоновано рекомендації щодо децентралізації маршрутів, посилення зв'язності периферійних залізничних вокзалів.

У результаті впровадження удосконаленої технології роботи залізничного вокзалу в умовах функціонування логістичного центру приріст прибутку залізничного вокзалу від запропонованої технології складе 8,6 %, коефіцієнт рентабельності становить 18,08 термін окупності – 0,06 року.

Список використаних джерел

1. Дослідження системи перевезень пасажирів швидкісними і звичайними поїздами на основі методів аналізу складних мереж А. М. Киман, Д.Р.Хаченко, Г. О.Прохорченко, Б. Ю. Хлібишин, Е. Л. Акопян Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. 2025. № 212 С. 21-27.
2. Statistics Explained. Glossary: High-speed rail URL: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Glossary:High-speed_rail (дата звернення: 09 травня 2025 р.).
3. High-speed Rail EBSCO/URL: <https://www.ebsco.com/research-starters/applied-sciences/high-speed-rail#types-of-high-speed-systems> (дата звернення: 09 травня 2025 р.).
4. Rodrigue, J.-P. The Geography of Transport Systems. SIXTH EDITION. – New York: Routledge, 2024. – 402 с. – ISBN 9781032380407. – DOI: 10.4324/9781003343196.
5. Complex network model for railway timetable stability optimisation URL: <https://digital-library.theiet.org/doi/full/10.1> (дата звернення: 09 травня 2025 р.).
6. Моделювання залежного від розкладу поширення затримок на одноколінійній залізничній лінії: підхід матричного перетворення.
7. Long-Term Passenger Flow Forecasting for Rail Transit Based on Complex Networks and Informer // PubMed. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39517791> (дата звернення: 15 травня 2025 р.).
8. Оптимізація мережі обслуговування поїздів з метою скорочення часу в дорозі URL: https://www.researchgate.net/publication/294139557_Train_Service_Network_Optimization_in_View_of_Reducing_Travel_Time (дата звернення: 15 травня 2025 р.).

9. Scheduling freight trains traveling on complex networks: https://www.researchgate.net/publication/227427080_Scheduling_freight_trains_traveling_on_complex_networks (дата звернення: 15 травня 2025 р.).
10. Маршрутизація та складання розкладу вантажних поїздів у пасажирській залізничній мережі: обчислювальна складність та поетапна евристика диспетчеризації.
11. Dong, T., Li, Y., Sun, K., Chen, J. Research on the Resilience of a Railway Network Based on a Complex Structure Analysis of Physical and Service Networks // *Applied Sciences*. – 2023. – Vol. 15, № 9. P 20-28.
12. Bhatia, U., Kumar, D., Kodra, E., Ganguly, A.R. Network Science Based Quantification of Resilience Demonstrated on the Indian Railways Network // *PLoS One*. – 2015. – Vol. 10, № 11. – DOI: 10.1371/journal.pone.0141890
13. Pagani, A., Mosquera, G., Alturki, A. та ін. Resilience or robustness: identifying topological vulnerabilities in rail networks // *R Soc Open Sci*. – 2019. – Vol. 6, № 2. – DOI: 10.1098/rsos.181301.
14. Pal, A.K., Ganguly, A.R. Topological Determinants of Resilience in Urban Rail Networks Facing Multi-Hazard Disruptions. URL: <https://arxiv.org/html/2407.06359v1> (дата звернення: 16 травня 2025 р.).
15. Xia, X., Li, H., Wang, K., Liu, Y. Analysis of the impact of high-speed rail on the spatio-temporal distribution of residential population and industrial structure // *Heliyon*. – 2023. – Vol. 9, № 10. – DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e21088.
16. Castillo, E., Gallego, I., Urena, J., Coronado, J.M. Timetabling optimization of a mixed double- and single-tracked railway network // *Applied Mathematical Modelling*. – 2011. – Vol. 35, № 2. – DOI: 10.1016/j.apm.2010.07.041.
17. Kumar, S.I., Shahbaz, K., Tyagi, M., Singh, S.P. Network-wide mixed-rail traffic scheduler: challenges and implementation aspects // *Transportation Research Procedia*. – 2025. – Vol. 82, № 2. – DOI: 10.1016/j.trpro.2024.12.193.

18. Borndörfer, R., Klug, T., Lamorgese, L., Mannino, C. Recent success stories on integrated optimization of railway systems // *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. – 2017. – Vol. 74, № 2. – DOI: 10.1016/j.trc.2016.11.015.
19. Службовий розклад руху пасажирських поїздів, запроваджено з 09.12.2018 року / філія «Пасажирська компанія» АТ «Українська залізниця». Київ, 2018. 703 с.
20. Про затвердження Змін до Правил перевезення пасажирів, багажу, вантажобагажу та пошти залізничним транспортом України: Наказ Міністерства інфраструктури України від 01.12.2011 р. № 586, зареєстр. в Міністерстві юстиції України 16.12.2011 р. за № 1463/20201. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1463-11#Text> (дата звернення: 16 травня 2025).
21. Albert R. and Barabási A.-L. Statistical mechanics of complex networks. *Reviews of Modern Physics*. 2002. 74 (1). P. 47–97. DOI: 10.1103/RevModPhys.74.47.
22. Prokhorchenko A. (2014). Investigation of scale-invariant property of organization system of train traffic volume based on the percolation theory. *Science and Transport Progress Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*. Vol. 5 (53). P. 56-64. DOI:10.15802/stp2014/30471.
23. Marchiori M., Latora V. Harmony in the small-world. *Physical Review Letters*. 2000. Vol. 87(19). P. 198701. DOI: 10.1103/PhysRevLett.87.198701.
24. Wasserman S., Faust K., *Social Network Analysis: Methods and Applications*. Cambridge University Press, New York, 1994.
25. Krnc M. & Škrekovski R. Group degree centrality and centralization in networks. *Mathematics*. 2020. Vol. 8(10). P. 1810. DOI:10.3390/math8101810.