

Доктор філософії КИМАН А. М., асп. ХАРЧЕНКО Д. Р.,
канд. техн. наук ПРОХОРЧЕНКО Г. О.,
магістранти ХЛІБИШИН Б. Ю., АКОПЯН Е. Л.
(Український державний університет залізничного транспорту)

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



Анотація. У статті проведено мережевий аналіз пасажирської залізничної системи України за графом мережі руху швидкісних і звичайних поїздів за 2018-2019 рр. із використанням методів теорії складних мереж. Виявлено, що розподіл степенів вершин підпорядкований степеневому закону, мережа має високу централізованість, асортативність і короткий ефективний діаметр. Оцінено коефіцієнт кластеризації, транзитивність, центральність степеня, посередництва та гармонійної близькості. На основі результатів запропоновано рекомендації щодо децентралізації маршрутів, посилення зв'язності периферійних залізничних вокзалів. Проведені дослідження можуть бути використані для стратегічного і тактичного управління розвитком залізничної інфраструктури України в умовах структурних трансформацій і зовнішніх викликів.

Ключові слова: залізнична система, макроаналіз, пасажирський поїзд, поїздопотік, мережа, розклад руху, безмасштабність, комплексні мережі.

Вступ.

Після початку російського широкомасштабного вторгнення в Україну у 2022 році залізничний транспорт виявився єдиним видом транспорту, здатним оперативно евакуювати значні обсяги пасажирів із прифронтових і тимчасово окупованих територій [1-3]. За цих умов пасажирський залізничний транспорт набув стратегічного значення в контексті реалізації транспортної стратегії розвитку пасажирської мобільності, відіграючи головну роль у забезпеченні доступу населення до безпечних регіонів, а також підтримці сталого функціонування економіки України [4].

Одними з основних нормативних документів, що регламентують функціонування пасажирських перевезень на залізницях України, є План формування пасажирських поїздів (ПФПП) і Нормативний графік руху поїздів (НГРП) [5]. Ці документи об'єднані у спеціалізоване зведення – нормативний документ за назвою «Службовий розклад руху пасажирських поїздів» (далі Службовий розклад) [6], який виданий на момент введення НГРП і визначає напрямки руху, нумерацію, регулярність курсування, а також схеми формування составів для всіх категорій пасажирських поїздів, як звичайних, так і швидкісних. Незважаючи на наявність процедур, розроблення маршрутів пасажирських поїздів і розкладів руху ґрунтується на експертних методах, що досить складно оцінити, і це, як наслідок, впливає на ефективність пасажирських перевезень.

Сучасні підходи для аналізу ПФПП не дають змогу повною мірою оцінити просторову організацію пасажиропотоків, ступінь завантаження залізничних вокзалів, взаємозалежність між станціями, а також інші основні макропараметри функціонування залізничної пасажирської мережі. Це обумовлює необхідність застосування нових дослідницьких підходів, які ґрунтуються на системному баченні об'єкта дослідження.

У зв'язку з цим перспективним є використання методів аналізу складних мереж [7, 8] для виявлення структурних властивостей транспортних систем, дослідження їхньої надійності, стійкості до збоїв, ефективності функціонування та взаємозв'язків між елементами мережі. Застосування цих методів аналізу системи пасажирських залізничних перевезень відкриває нові можливості для оптимізації маршрутної мережі, підвищення адаптивності системи перевезень і стратегічного планування в умовах воєнного і післявоєнного відновлення України.

Отже, вирішення завдання дослідження структури та властивостей системи пасажирських залізничних перевезень України на основі теорії складних мереж є актуальним і має важливе практичне значення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Наукові дослідження в напрямі дослідження системи перевезень пасажирів різними видами транспорту із застосуванням методів аналізу складних мереж представлені досить широко в сучасній науковій літературі [9-12]. Загалом ці дослідження можна поділити на кілька основних напрямів.

Перший напрям пов'язаний із використанням мережевого аналізу для оцінювання ефективності та стійкості транспортних систем. У роботах [9, 11, 12] досліджено вплив топології мережі залізничних перевезень на її продуктивність і робастність. Автори використовують такі показники, як центральність вершин, модульність мережі, середня довжина шляху між вузлами та коефіцієнт кластеризації для оцінювання впливу окремих вузлів і маршрутів на загальну ефективність залізничної системи. У дослідженні [13] також зроблено акцент на аналізі впливу збоїв і затримок у мережі швидкісних пасажирських поїздів, що є особливо важливим для пасажирських перевезень, де своєчасність руху критично впливає на рівень обслуговування.

Другий напрям досліджень зосереджено на аналізі пасажирських потоків у мережах із різною швидкістю руху поїздів [14, 15]. Зокрема, у роботі [15] проведено порівняльний аналіз руху швидкісних і звичайних поїздів із використанням агентно-орієнтованого моделювання, що дає змогу більш детально враховувати поведінку пасажирів під час вибору маршруту.

Третій напрям пов'язаний з оптимізацією графіка руху поїздів і розподілом пропускної спроможності залізничної інфраструктури з використанням мережевих моделей [16-18]. У роботі [18] запропоновано багатоцільову оптимізаційну модель розподілу пропускної спроможності міської залізничної транспортної мережі на основі багатоджерельних даних про пасажиропотік Пекінського метро. Доведено важливість аналізу сітьової структури перевезень для визначення завантаженості станцій і ліній. Однак такі дослідження не проводили для залізничної системи України.

Цікавими є дослідження, присвячені аналізу системи залізничних пасажирських перевезень України. Зокрема, у статті [19] проаналізовано перспективи впровадження швидкісного руху в Україні, урахувавши світовий досвід. Розглянуто технічні, економічні та організаційні аспекти реалізації проєктів швидкісних залізниць. Однак у цьому дослідженні недостатньо висвітлено застосування сучасних методів аналізу складних мереж для дослідження ефективності пасажирських перевезень. Загалом українські дослідження в галузі пасажирських перевезень швидкісними та звичайними поїздами дають важливу інформацію про поточний стан і перспективи розвитку залізничного транспорту [20-22]. Проте існує потреба в застосуванні методів аналізу складних мереж для дослідження залізничної системи пасажирських перевезень України, що дасть змогу більш ефективно перерозподілити навантаження на вокзали та покращити якість обслуговування пасажирів.

Визначення мети та завдання дослідження.

Метою роботи є дослідження просторово-структурних властивостей системи пасажирських

перевезень України швидкісними та звичайними поїздами на основі методів теорії складних мереж для виявлення закономірностей організації поїздопотоків, визначення ролі головних вокзалів і маршрутів, а також формування наукових засад удосконалення плану формування пасажирських поїздів з урахуванням підвищених мобільності населення.

Досягнення поставленої мети здійснено шляхом вирішення таких завдань дослідження:

- застосовано методи аналізу складних мереж для вивчення топологічних властивостей системи залізничних пасажирських перевезень, зокрема таких показників, як центральність, ступінь зв'язності, діаметр, ефективний діаметр, щільність, коефіцієнт кластеризації, транзитивність;

- для підтвердження масштабної інваріантності в мережі швидкісних і звичайних пасажирських поїздів досліджено закономірності розподілу степенів вершин мережі;

- виявлено роль окремих станцій (вокзалів) мережі у формуванні маршрутної структури швидкісних і звичайних пасажирських поїздів та оцінено тенденції формування зв'язків між станціями;

- на основі отриманих результатів розробити рекомендації з оптимізації маршрутної структури, підвищення стійкості мережі та подальших напрямів дослідження, зокрема інтеграції пасажиропотоків і динамічного моделювання еволюції топології.

Викладення основного матеріалу.

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. [6]. Для узагальнення інформації була створена база даних щодо переліку початкових і кінцевих пунктів прямування поїздів, їхніх номерів із віднесенням до категорії відповідно до класифікації [23]. Створення та візуалізація графа, проведення розрахунків виконано в середовищі Python. Побудований граф P складається з 61 вершини і 135 дуг. У табл. 1 наведено кількість сполучень мережі графа P за категоріями пасажирських поїздів. 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 обмежену 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 рис. 1.

Таблиця 1

Категорії пасажирських поїздів і кількість сполучень мережі графа Р

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

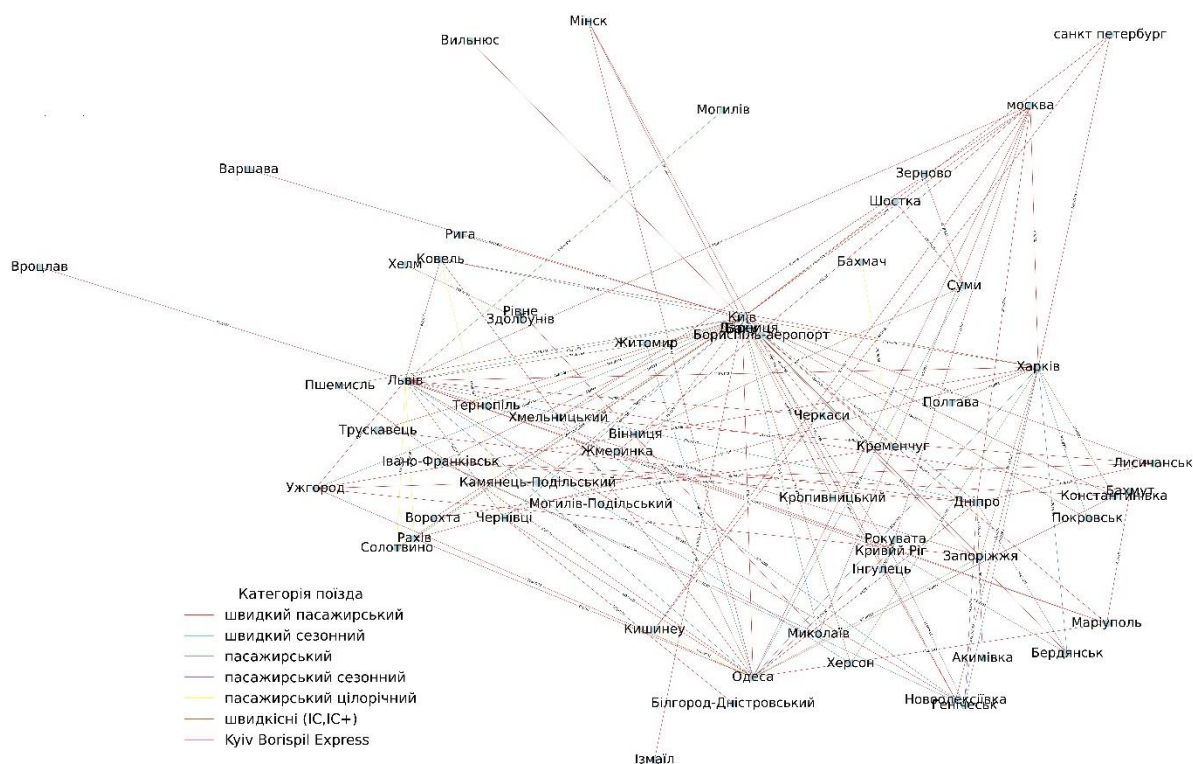


Рис. 1. Візуалізація графа Р мережі швидкісних і звичайних пасажирських поїздів згідно зі Службовим розкладом

На першому етапі дослідження системи перевезень пасажирів здійснено статистичне оцінювання топології графа. Основними характеристиками транспортної активності кожної станції (вокзалу) в системі перевезень прийнято

показники вхідні (In-Degree) і вихідні (Out-Degree) степені вершин графа Р. На рис. 2 наведено діаграму степенів вершин.

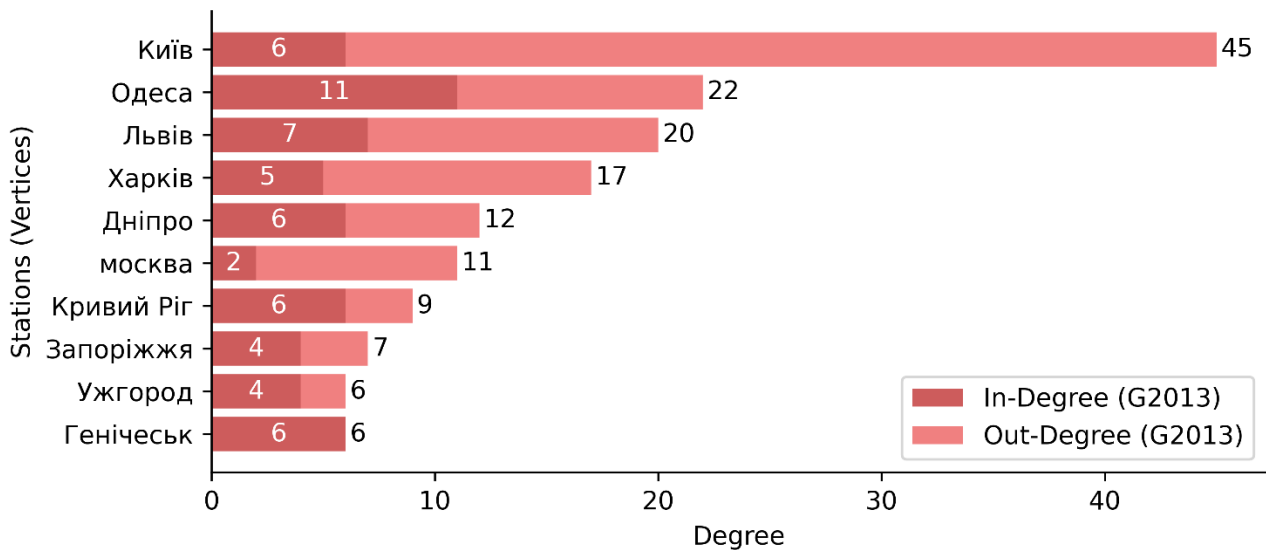


Рис. 2. Діаграма 10 найкращих залізничних вокзалів із найбільшими значеннями степенів вершин відповідно вхідних (In-Degree) і вихідних (Out-Degree)

Найвищий сумарний степінь 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 міжнародної станції підтверджує ступінь інтеграції мережі УЗ у міжнародні пасажирські перевезення, актуальні на момент складання графіка. Така станція 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 (рис. 3).

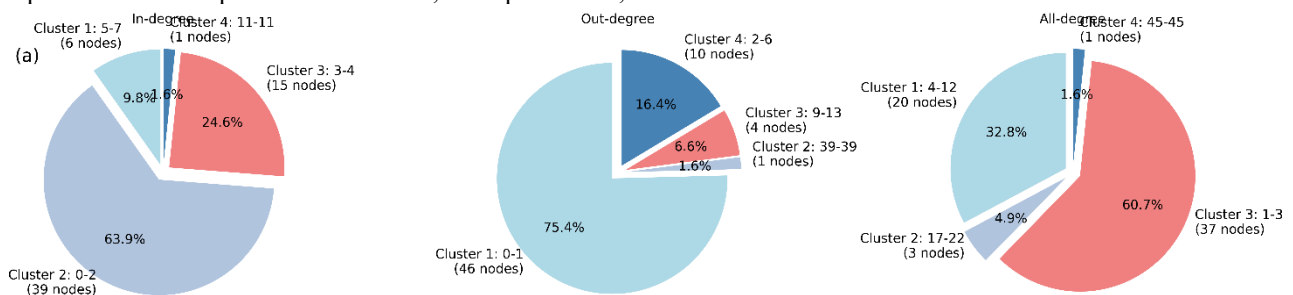


Рис. 3. Діаграма розподілу значень степеня вершин у мережі призначень ПФПП за чотирма кластерами: а – вхідний степінь (In-Degree); б – вихідний степінь (Out-Degree); в – загальний степінь (All-Degree)

Аналіз показує (рис. 3), що для вхідного степеня 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 степенів 3-4), що містить 24,6 % станцій (15 станцій), що може свідчити про середні за значенням станції, які мають регіональне значення. Щодо вихідного степеня центральності, то переважає кластер 1 (0-1 степені), 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 (степені 2-6), що охоплює 16,4 % вузлів (10 станцій), які є більш значущими вузлами для відправлення поїздів. Для загального степеня центральності найбільшим за розміром є кластер 3 (степені 1-3), який займає 60,7 % вершин (37 станцій), що свідчить про домінування в мережі станцій із низькими показниками центральності. Кластер 1 (степені 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 високоев'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) [24, 25]. За таких умов важливим є деталізація аналізу та перевірка відповідності емпіричного розподілу степеня вершин графа степеневому закону (power-law) [24]. Для емпіричної перевірки належності мережі призначень пасажирських поїздів до цього класу мереж було застосовано статистичні тести відповідності степеневому розподілу та експоненційному розподілу. На рис. 4 подано зіставлення емпіричних (спостережуваних) частот загальних степенів вершин із теоретично очікуваними за степеневим (power-law) та експоненційним (exponential) розподілами.

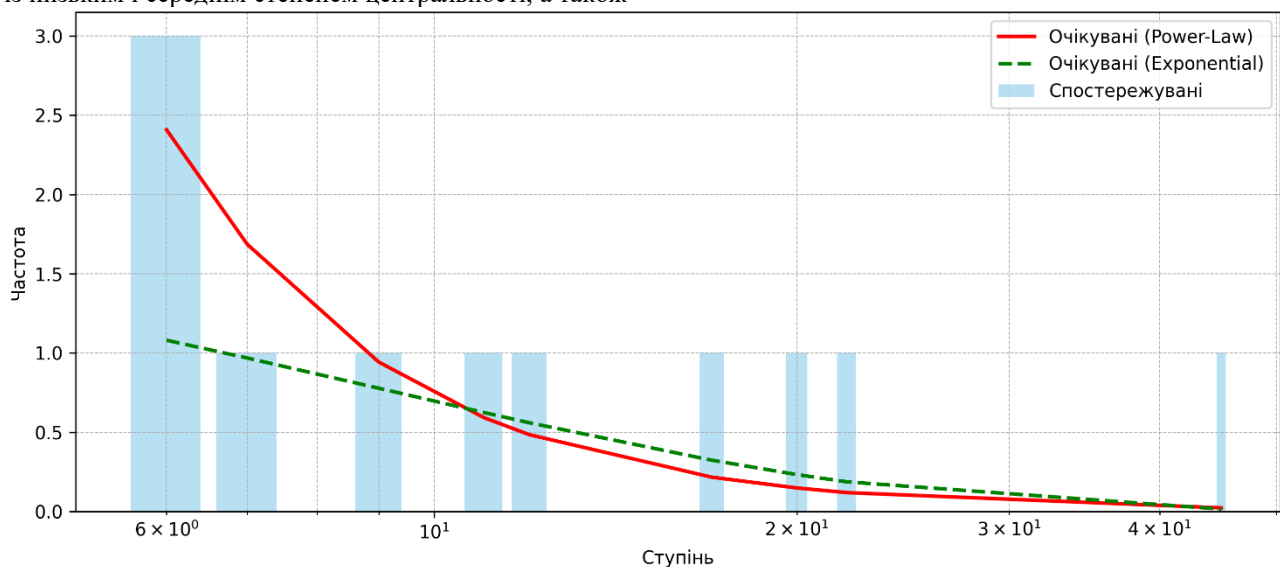


Рис. 4. Діаграма відповідності розподілів емпіричних імовірностей загальних степенів вершин графа степеневому розподілу та експоненційному розподілу

Результати показали, що значення показника степеневому розподілу (α) для загального степеня центральності становить 2,502, що відповідає типовим значенням для безмасштабних мереж ($2 < \alpha < 3$) [24]. 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 степеневому розподілу ($AIC_{powerlaw} = 123,95$) порівняно з експоненційним

($AIC_{exponential} = 134,12$). Додатково проведено аналіз критерію R, який порівнює моделі степеневому та експоненційному закону розподілу ($R_{power_vs_exp}$). Для загальних степенів значення критерію R становить 1,726 за відповідного значення p-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 Р 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) [25]. На рис. 5 наведено функції кумулятивного розподілу гармонійної центральності за близькістю графу Р.

За вхідною гармонійною центральністю (рис. 5, а) середнє значення дорівнює 9,80 за медіани 1,50 і

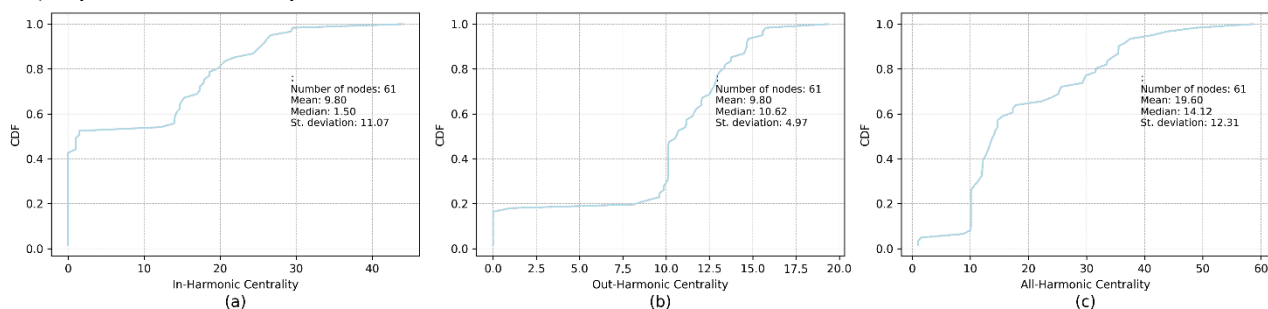


Рис. 5. Діаграма функцій кумулятивного розподілу гармонійної центральності за близькістю графа Р: а – in-harmonic centrality; б – out-harmonic centrality; в – all-harmonic centrality

ієрархічності та централізованості мережі швидкісних і звичайних пасажирських поїздів. На рис. 6 подано діаграми функцій кумулятивного розподілу (CDF) центральності за посередництвом для графа Р як для всієї мережі (рис. 6, а), так і окремо для найбільшої сильно зв'язаної компоненти (SCC) (рис. 6, б).

Аналіз центральності за посередництвом підтверджує наявність яскраво вираженої

стандартного відхилення 11,07. Значна розбіжність між середнім і медіаною свідчить про велику неоднорідність і суттєву концентрацію високих значень центральності в невеликій 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 (рис. 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.

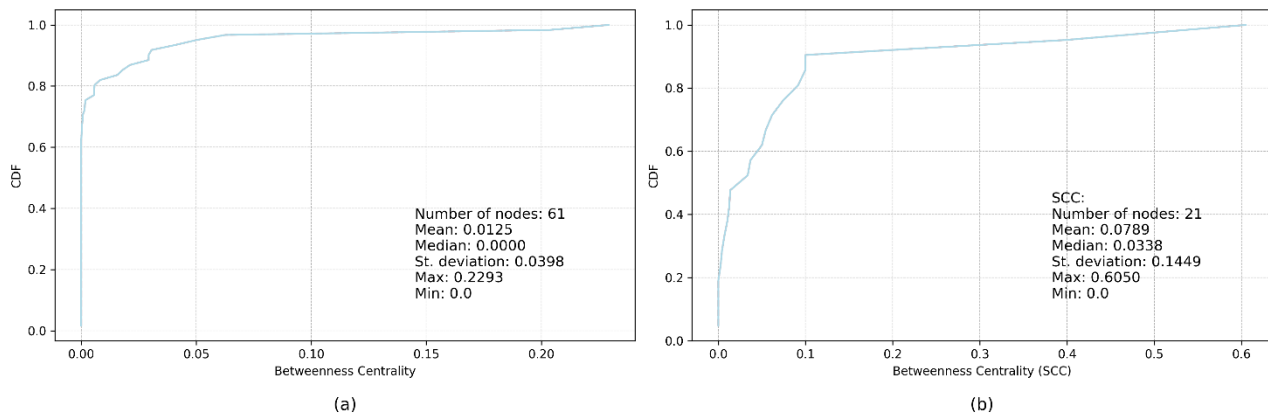


Рис. 6. Діаграма функцій кумулятивного розподілу центральності за посередництвом графа P: а – центральність за близькістю для всієї мережі;
б – центральність за близькістю для SCC

Для вершин загального графа P (рис. 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. 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 степенів, у роботі застосовано коефіцієнти кореляції Пірсона та Спірмена для графа P [27]. За значеннями табл. 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 помірну 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 2

Коефіцієнти кореляції Пірсона та Спірмена для графа P

Показник	Коефіцієнт кореляції	p-value
Pearson Input-Output	0.4863	7.1e-05
Spearman Input-Output	0.2325	0.0714
Pearson All-Input vs All-Output	0.7052	2.22e-10
Spearman All-Input vs All-Output	0.8348	6.22e-17
Pearson Out-All Degree	0.9624	4.19e-35
Spearman Out-All Degree	0.6586	7.99e-09

Зв'язок між загальним степенем 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 степенем 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 степенем (Out-All Degree) за кореляцією Пірсона надзвичайно сильна й статистично значуща залежність ($p\text{-value} = 4.19 \times 10^{-35}$). За коефіцієнтом Спірмена 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 [7].

Для визначення макрохарактеристик системи залізничних пасажирських перевезень важливо розрахувати основні параметри графа Р, що наведені в табл. 3. Щільність графа (табл. 3) зі значенням 0,036885 вказує на невисоку кількість реалізованих зв'язків у мережі відносно максимально можливої [7]. 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».

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

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 вкладаються в чотири 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 ефективної архітектури, орієнтованої 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 [7] 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 [7] 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 [7] 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 [27].

Отримані параметри (табл. 3) підтверджують, що досліджувана мережа має типову для транспортних систем структуру з вираженою централізацією [27], короткими шляхами між основними станціями та помірно 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.

Висновки.

Проведене дослідження графа пасажирських залізничних перевезень України, побудованого за Службовим розкладом руху швидкісних і звичайних поїздів на 2018-2019 рр., дало змогу виявити основні властивості функціонування залізничної пасажирської системи та сформулювати відповідні рекомендації для її подальшого розвитку. Встановлено, що розподіл ступенів вершин підпорядкований ступеневому 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 спостерігають яскраво виражену централізованість, де невелика кількість станцій-хабів має високі значення ступеня, посередництва та близькості, тоді як більшість вузлів є слабо зв'язаними або периферійними. Значення діаметра – 5 та ефективного діаметра – 4 свідчать про короткі шляхи між більшістю пар станцій, що є типовим для безмасштабних мереж. Визначено наявність асортативного змішування в мережі, що підтверджує тенденцію вузлів із подібними характеристиками ступеня утворювати між собою зв'язки, характерну для розвинутих транспортних структур. Ураховуючи виявлену високу централізованість мережі, одним із напрямів 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. Крім того, рекомендовано підвищення зв'язності слабо інтегрованих компонент шляхом створення додаткових сполучень, що дасть змогу розширити найбільшу сильно зв'язану компоненту і покращити загальну навігацію мережі. Особливу увагу можна приділити модернізації інфраструктури найбільш зв'язних вузлів, які відіграють роль транзитних і комутаційних центрів і є критично важливими для збереження функціональності системи. У подальших дослідженнях доцільно зосередитися на інтеграції пасажиропотоків у графову модель, що дасть змогу кількісно оцінити рівень навантаження на окремі вузли та виявити потенційні точки перевантаження в мережі. Перспективним напрямом також є динамічне моделювання змін топології мережі в часовому розрізі, зокрема на основі порівняння структур графів різних сезонів року (літній-зимовий), для відстеження еволюції системи під впливом зміни динаміки попиту, ресурсних обмежень і зовнішніх умов.

Запропонований напрям дослідження на основі методів аналізу складних мереж формує наукове підґрунтя для створення інструментарію стратегічного та тактичного управління розвитком залізничної інфраструктури України в умовах структурних трансформацій і зовнішніх викликів.

Список використаних джерел

1. Головка В. Вторгнення. 2022. Широкомасштабна агресія Росії проти України /відповідальний ред. В. Смолій; НАН України. Інститут історії України. Київ: Інститут історії України, 2023. 602 с.
2. Павленко О. І., Павленко І. П. Роль залізничного транспорту в евакуації населення в період воєнних дій в Україні. *Транспортні системи та технології перевезень*. 2022. Вип. 23. С. 74-78. URL: <https://doi.org/10.15802/tstt2022/261658>.
3. Прохорченко А. В., Золотарьов О. Ф., Сондей О. В. Удосконалення технології роботи залізничного вокзалу в умовах організації евакуаційних поїздів. *Тези доповіді 35-ї Міжнар. наук.-практ. конф. «Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті» (11 листопада 2022 р., Харків). Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2022. Вип. 3 (дод.). С. 51-52. URL: <http://lib.kart.edu.ua/bitstream/123456789/12608/1/Прохорченко.pdf> (дата звернення: 15.02.2025).
4. Національна транспортна стратегія України на період до 2030 року: затв. Постановою Кабінету Міністрів України від 27 грудня 2024 р. № 1550. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1550-2024-%D0%BF#Text> (дата звернення: 19.02.2025).
5. Бутько Т. В., Константинов Д. В., Малахова О. А., Прохорченко А. В. Пасажирські перевезення (залізничний транспорт). Харків : Дім Райдер, 2014. 254 с.
6. Службовий розклад руху пасажирських поїздів, запроваджено з 09.12.2018 року. Київ: Філія «Пасажирська компанія» АТ «Українська залізниця», 2018. 703 с.
7. Wasserman S., Faust K. *Social Network Analysis: Methods and Applications*. Cambridge University Press, New York. 1994. 868 p.
8. Newman M. E. The Structure and Function of Complex Networks. *SIAM Rev.* 2003. Vol. 45. P. 167-256.
9. Haznaghy A., Fi I., London A. & Németh T. Complex network analysis of public transportation networks: A comprehensive study. *Proceedings of the 2015 International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems (MT-ITS)*. 2015. P. 371-378.
10. Peng H., Wu L., Wei Q. The Literature Review of High-Speed Railway Network Analysis Based on Complex Network. *2024 IEEE 4th International Conference on Digital Twins and Parallel Intelligence (DTPI)*. Wuhan, China. 2024. P. 448-452. doi: <https://doi.org/10.1109/DTPI61353.2024.10778888>.
11. Xu Q., Mao B., Bai Y. Network structure of subway passenger flows. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*. 2016. Vol. 3. 033404. <https://doi.org/10.1088/1742-5468/2016/03/033404>.
12. Hajdu L., Bota A., Kresz M., Khani A., Gardner L. M. Discovering the hidden community structure of public transportation networks. 2018. arXiv preprint arXiv:1801.03857. URL: <https://arxiv.org/abs/1801.03857>.
13. Ma J., Ma S., Xie X., Gui W. Robustness Analysis of High-Speed Railway Networks Against Cascading Failures: From a Multi-Layer Network Perspective. *IEEE Transactions on Network Science and Engineering*. 2024. Vol. 11(6). P. 6522-6534. doi: <https://doi.org/10.1109/TNSE.2024.3451118>.
14. Dolia O. Analysis of modern scientific approaches to calculating the number of passengers on air transport. *International Science Journal of Engineering & Agriculture*. 2022. Vol. 1(3). P. 247-272. <https://doi.org/10.46299/j.isjea.20220103.20>.
15. Kong X., Wang K., Hou M., Xia F., Karmakar G. & Li J. Exploring Human Mobility for Multi-Pattern Passenger Prediction: A Graph Learning Framework. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2022. Vol. 23(12). P. 23456-23467. <https://doi.org/10.1109/TITS.2022.3148116>.
16. Yao J., Meng F., Piao X., Zhou X. Research on Cascading Failure of Complex Networks Based on Edge Weight and Capacity Allocation Strategy. In: Wang, Z., Wang, S., Xu, H. (eds) *Service Science, ICSS 2023. Communications in Computer and Information Science*. 2023. Vol. 1844. https://doi.org/10.1007/978-981-99-4402-6_6.
17. Di Z., Zuo H., Zhou H., Qi J., Zhang S. Integrated Optimization of Train Schedules and Transportation Plans for a Passenger-Freight Metro Line.

Sustainability. 2025. Vol. 17. 730. <https://doi.org/10.3390/su17020730>.

18. Wang B., Huang J. Xu J. Capacity optimization and allocation of an urban rail transit network based on multi-source data. *J Ambient Intell Human Comput*. 2019. Vol. 10. P. 373–383. <https://doi.org/10.1007/s12652-017-0599-9>.

19. Ковальов А. О., Грищенко В. О. Перспективи розвитку швидкісних пасажирських перевезень в Україні на основі світового досвіду. *Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп.* 2015. Вип. 154. С. 20–24. DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.154.2015.65638>.

20. Черніков В. Д., Семенов С. О., Молякова К. М. Аналіз функціонування пасажирських комплексів на залізничному транспорті. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2015. Вип. 1. С. 143–147. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VISUNU_2015_1_33.

21. Козаченко Д. М., Коробйова Р. Г., Рубець А. В. Проблеми розвитку пасажирських перевезень залізничним транспортом в Україні. *Транспортні системи та технології перевезень*. 2016. Вип. 12. С. 45–50. <https://doi.org/10.15802/tstt2016/85883>.

22. Руденко М. Комплексна оцінка якості наданих послуг пасажиром залізничного транспорту як стратегічний інструмент для забезпечення економічного успіху залізничних підприємств. *Herald of Khmelnytskyi National University. Economic Sciences*. 2024. Vol. 326(1). P. 233–246. <https://doi.org/10.31891/2307-5740-2024-326-38>.

23. 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: 10.01.2025).

24. 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.

25. 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.

26. Marchiori M., Latora V. Harmony in the small-world. *Physical Review Letters*. 2000. Vol. 87(19). P. 198701. DOI: 10.1103/PhysRevLett.87.198701.

27. Krnc M. & Škrekovski R. Group degree centrality and centralization in networks. *Mathematics*. 2020. Vol. 8(10). P. 1810. DOI:10.3390/math8101810.

STUDY OF THE SYSTEM OF PASSENGER TRANSPORTATION BY HIGHER-SPEED AND CONVENTIONAL TRAINS BASED ON THE METHODS OF ANALYSIS OF COMPLEX NETWORKS

Ph.D. (Tech.) Andrii Kyman, PhD student Dmytro Kharchenko,

Ph.D. (Tech.) Halyna Prokhorchenko, Master's student B. Yu. Khlibyshyn, Master's student E. L. Akopyan

Abstract. In this paper, a comprehensive analysis of Ukraine's passenger rail system is conducted on the network graph of high-speed and conventional trains for 2018-2019, employing methods from complex network theory. The study aims to reveal the spatial-structural patterns governing passenger flows, to identify the role of key hub stations, and to formulate scientifically grounded recommendations for optimising the route network. Vertex degrees (in-, out- and total-degree) were clustered, and it was shown that the distribution of total degrees follows a power-law with scale-free exponent $\alpha \approx 2.5$, confirming the network's scale-free, self-similar character. The following topological macro-parameters were computed: network density 0.0369, diameter 5, effective diameter 4, Watts-Strogatz clustering coefficient 0.334 and transitivity 0.0605. Strongly and weakly connected component analyses further characterised the graph's cohesion. Node centrality was evaluated via harmonic closeness and betweenness measures, while Pearson and Spearman correlation coefficients between in-, out- and total-degrees demonstrated pronounced assortative mixing, indicative of a clear hierarchical structure. The network exhibits marked centralisation, with short path lengths between major stations and moderate local clustering. Based on these findings, we propose decentralising the route network by developing alternative links among peripheral stations, strengthening connectivity within weakly integrated components, and prioritising the modernisation of principal hub stations. These results provide a solid foundation for both strategic and tactical management of Ukraine's railway infrastructure under conditions of structural transformation and external challenges.

Keywords: railway system, macro analysis, passenger train, train flow, network, timetable, scale-free, complex networks.

Киман Андрій Миколайович, кандидат технічних наук, доцент кафедри управління вантажною та комерційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-4000-3287. Тел.: +38 (057) 730-10-75. Е-mail: kyman.am@kart.edu.ua.

Харченко Дмитро Романович, аспірант, Український державний університет залізничного транспорту.

ORCID iD: 0009-0005-3174-3231. Тел: +38 (096) 50-53-057. E-mail: harchenko95@kart.edu.ua.

Прохорченко Галина Олегівна, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0003-1158-3953. Тел.: +38 (066) 413-43-01. E-mail: g.o.prokhorchenko@kart.edu.ua.

Акопян Еміль Левонович, магістрант кафедри управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0009-0001-0404-3513. Тел.: +38 (057) 730-10-88. E-mail: uermp@kart.edu.ua.

Хлібишин Богдан Юрійович, магістрант кафедри управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0009-0009-0659-881X. Тел.: +38 (057) 730-10-88. E-mail: bohdankhlibyshin@icloud.com.

Kyman Andrii Mykolaiovych, PhD (Tech. Sci.), Associate Professor of the Department of Freight and Commercial Operations Management, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-4000-3287. Тел.: +38 (057) 730-10-75. E-mail: kyman.am@kart.edu.ua.

Kharchenko Dmytro Romanovych, PhD student of the Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0009-0005-3174-3231. Тел.: +38 (096) 50-53-057. E-mail: harchenko95@kart.edu.ua.

Prokhorchenko Halyna Olehivna, PhD (Tech. Sci.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Railway Operations Management, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0003-1158-3953. Тел.: +38 (066) 413-43-01. E-mail: g.o.prokhorchenko@kart.edu.ua.

Akopyan Emil Levonovych, Master's student of the Department of Railway Operations Management, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0009-0001-0404-3513. Тел.: +38 (057) 730-10-88. E-mail: uermp@kart.edu.ua.

Khlibyshyn Bohdan Yuriiovych, Master's student of the Department of Railway Operations Management, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0009-0009-0659-881X. Тел.: +38 (057) 730-10-88. E-mail: bohdankhlibyshin@icloud.com.