

УДК 656.2

**МАКРОАНАЛІЗ СТРУКТУРНОЇ ТРАНСФОРМАЦІЇ ЗАЛІЗНИЧНОЇ МЕРЕЖІ
ВАНТАЖНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ ЯК ОСНОВА УПРАВЛІННЯ ЇЇ РОЗВИТКОМ**

Д-р філософії А. М. Киман

**MACRO-LEVEL ANALYSIS OF STRUCTURAL TRANSFORMATION OF A RAILWAY
FREIGHT NETWORK AS A BASIS FOR ITS DEVELOPMENT MANAGEMENT**

Ph.D. (Tech.) Andrii Kyman

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.215.2026.358861>



***Анотація.** У статті досліджено структурну трансформацію залізничної мережі вантажних перевезень України на основі макроаналізу перевізного процесу із використанням мережевого подання плану формування поїздів (ПФП). Результати порівняльного аналізу мереж, сформованих на основі ПФП за 2012-2013 і 2018-2019 роки, свідчать про істотні зміни топології, ієрархії та просторової організації транспортних процесів. Виявлено скорочення кількості функціональних спільнот, зниження модульності та ентропії їх розподілу, зростання середнього розміру спільнот і розширення найбільшої кліки, що відображає консолідацію мережі та посилення міжгрупових зв'язків. Практична значущість дослідження полягає в обґрунтуванні можливості використання результатів макроаналізу перевізних процесів як інформаційної основи для формування управлінських рішень про розвиток і модернізацію залізничної мережі вантажних перевезень у довгостроковій перспективі.*

***Ключові слова:** залізнична мережа, вантажні перевезення, план формування поїздів, вагонопотік, теорія складних мереж, управління розвитком залізничної мережі.*

***Abstract.** This paper investigates the structural transformation of Ukraine's freight railway network based on a macro-level analysis of transport processes using a network representation of the Train Formation Plan (TFP). The aim of the study is to substantiate approaches to the development of methods for managing the evolution of the railway network under conditions of changing freight volumes and partial infrastructure loss. The methodological framework of the research is based on complex network theory, which enables the formalization of the regulatory TFP document in the form of directed graphs for the years 2013 and 2019. A set of macro-level indicators is applied, including network portraits, the network portrait divergence index, hierarchical network organization analysis, community structure metrics, modularity, community entropy, and clique characteristics. The results of the comparative analysis of networks constructed from the TFP data for the periods 2012–2013 and 2018–2019 reveal significant changes in the topology, hierarchy, and spatial organization of transport processes. A reduction in the number of functional communities, a decrease in modularity and community entropy, an increase in the average community size, and an expansion of the largest clique are identified, indicating network consolidation and strengthened inter-community connectivity. The obtained results confirm the ability of the railway network to adapt to partial infrastructure loss through the reconfiguration of spatial hierarchy and the redistribution of roles among key nodes. The practical significance of the study lies in substantiating the possibility of using the results of macro-level transport process analysis as an informational basis for decision-making in the management of freight railway network development and modernization in the long term.*

ISSN (p) 1994-7852
ISSN (online) 2413-3795
© Киман А. М., 2026.

Keywords: railway, freight transportation, train formation plan, wagon flow, complex network theory, railway network development management.

Вступ. Залізнична мережа вантажних перевезень є базовим елементом транспортної системи України, що забезпечує просторову зв'язаність економіки, стійкість логістичних ланцюгів та ефективне функціонування промислових і аграрних регіонів. В умовах структурних зрушень, зумовлених змінами економічної кон'юнктури, геополітичними чинниками та частковою втратою інфраструктурних елементів, постає проблема не лише відновлення, а і цілеспрямованого управління розвитком залізничної мережі. За таких умов традиційні підходи щодо планування, ґрунтовані переважно на локальних техніко-експлуатаційних показниках, виявляються недостатніми для формування ефективних управлінських рішень на стратегічному рівні. Розвиток залізничної мережі потрібно розглядати як процес структурної трансформації складної транспортної системи, що відбувається під впливом зовнішніх і внутрішніх чинників і супроводжений перерозподілом функцій між окремими вузлами-станціями, зміною ієрархії зв'язків і просторової організації перевезень [1, 2]. У цьому контексті особливої актуальності набуває застосування методів макроаналізу транспортних процесів, які допомагають досліджувати мережу не як сукупність ізольованих об'єктів, а як цілісну систему з властивостями адаптивності, стійкості та самоорганізації.

Одним з основних інструментів управління вантажними перевезеннями на залізничному транспорті України є план формування поїздів (ПФП) [3], який відображає прийняту логіку організації вагонопотоків, взаємодію станцій і розподіл функціонального навантаження в межах залізничної мережі. Із позицій мережевого підходу ПФП може бути інтерпретований як формалізована модель транспортної мережі, структура якої безпосередньо визначає характер транспортних процесів і, відповідно, впливає на напрями розвитку залізничної системи [4]. Аналіз змін такої структури в різні періоди функціонування

мережі створює передумови для виявлення закономірностей її трансформації та формування обґрунтованих управлінських рішень. У зв'язку з цим важливим є проведення макроаналізу структурної трансформації залізничної мережі вантажних перевезень на основі мережевого подання плану формування поїздів та обґрунтування можливостей використання отриманих результатів для формування методів управління розвитком залізничної мережі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У наукових дослідженнях залізничний транспорт дедалі частіше розглядають як складну мережеву систему, функціонування якої визначено не лише технічними параметрами інфраструктури, а і структурною організацією транспортних процесів. Такий підхід дає змогу аналізувати залізничну мережу на макрорівні з урахуванням взаємозв'язків між вузлами, ієрархії маршрутів і просторового розподілу вантажопотоків [5-7].

Значна кількість наукових праць присвячена аналізу топологічних властивостей саме залізничних мереж, зокрема дослідженню ступеневих розподілів, центральності вузлів і ролі сортувальних і вузлових станцій у формуванні потоків [8-10]. У цих дослідженнях показано, що залізничні мережі зазвичай мають виражену ієрархічну структуру з домінуванням окремих хабів, що забезпечують ефективність перевезень, але водночас підвищують вразливість системи до збоїв і втрати інфраструктурних елементів. Окремий напрям досліджень стосується стійкості та надійності залізничних мереж в умовах аварійних впливів, перевантажень або втрати частини мережі [11-13]. Автори зазначають, що здатність мережі до компенсації втрат визначена не лише кількістю альтернативних маршрутів, а і характером зв'язності між кластерами та рівнем їхньої внутрішньої консолідації. Це безпосередньо пов'язує мережеві характеристики із

завданнями управління розвитком і модернізації залізничної інфраструктури.

У межах української наукової школи залізничного транспорту зростає увага до питань моделювання стійкості та надійності функціонування мережі в умовах змінних навантажень і деструктивних впливів. Так, у роботі [14] досліджено умови надійного функціонування технологічних залізничних маршрутів за рахунок впливу параметрів структури мережі на показники безперервності виробничих процесів, що безпосередньо пов'язано з питанням компенсації втрат мережі внаслідок пошкоджень або перевантажень. Водночас зазначене дослідження орієнтоване переважно на локальні технологічні маршрути і виробничі ланцюги і не розглядає структурні зміни залізничної мережі на макрорівні, зокрема перерозподіл ролей вузлів і зміну ієрархії зв'язків у масштабі всієї транспортної системи. Крім того, у роботі [15] запропоновано оптимізаційну процедуру стратегічного управління вантажними транспортними комплексами, що може бути використана як основа для включення мережевих показників у систему управління розвитком залізничної інфраструктури. Разом із тим у зазначеній роботі мережеві характеристики використовують опосередковано, без явної формалізації залізничної мережі як складної графової структури та без кількісного оцінювання глибини її структурної трансформації під впливом зовнішніх чинників. Дослідження [16] охоплює питання організації експлуатаційної роботи і використання приватного тягового рухомого складу на залізничному транспорті України, що має значення для оцінювання ефективності структурних змін мережі в умовах значних обсягів перевезень. Однак акцент у роботі зроблено на операційному рівні управління перевезеннями, тоді як взаємозв'язок між експлуатаційними рішеннями та довгостроковою еволюцією структури залізничної мережі залишається

недостатньо розкритим. У роботі [17] запропоновано метод автоматизованого розрахунку плану формування поїздів із використанням генетичних алгоритмів, що дає змогу підвищити ефективність ухвалення рішень за умов складної комбінації вагонопотоків. Разом із тим запропонований підхід орієнтований переважно на оптимізацію ПФП на операційному рівні і не враховує макроструктурні властивості залізничної мережі, зокрема зміну ієрархії вузлів і топології зв'язків між ними. Аналіз публікацій свідчить, що план формування поїздів як джерело інформації про структурну організацію залізничної мережі практично не розглядають у мережевому контексті. Переважна більшість робіт використовує графи фізичної інфраструктури або розкладів руху, тоді як потенціал ПФП для макроаналізу транспортних процесів і формування управлінських рішень залишається недостатньо реалізованим.

Отже, незважаючи на значний обсяг досліджень, присвячених мережевому аналізу залізничного транспорту, існує наукова прогалина відносно використання результатів макроаналізу структурної трансформації мережі для обґрунтування методів управління її розвитком. Це зумовлює доцільність подальших досліджень, спрямованих на інтеграцію мережевих макропоказників, отриманих на основі плану формування поїздів, у систему стратегічного управління розвитком залізничної мережі вантажних перевезень.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою роботи є макроаналіз структурної трансформації залізничної мережі вантажних перевезень на основі мережевого подання плану формування поїздів для виявлення закономірностей еволюції транспортних процесів та обґрунтування підходів щодо формування методів управління розвитком залізничної мережі в умовах зміни обсягів перевезень і часткової втрати інфраструктури.

Поставленої мети досягали через вирішення таких завдань дослідження:

– порівняльний аналіз мережевих структур ПФП у різні періоди функціонування залізничної системи з використанням комплексу показників макrorівня, що допомагають оцінити зміну топології, ієрархії та просторової організації транспортних процесів;

– обґрунтування можливості використання результатів макроаналізу транспортних процесів на основі ПФП як інформаційної основи для формування управлінських рішень про розвиток залізничної мережі вантажних перевезень.

Викладення основного матеріалу. У межах цього дослідження залізничну мережу вантажних перевезень розглянуто як складну систему, структурна організація

якої сформована планом формування поїздів і визначає логіку перерозподілу вагонопотоків між станціями. Для аналізу еволюції такої системи здійснено мережеву формалізацію ПФП у вигляді орієнтованих графів призначень для двох періодів функціонування залізничної мережі України у 2012-2013 і 2018-2019 роках. Приклад візуалізації перетворення інформації з ПФП 2012-2013 року для станції Джанкой у граф з вершиною і дугами наведено на рис. 1, із якого видно, що станція Джанкой має 15 призначень, але в процесі оцифрування виявлено, що з 13 дуг, які відповідають категоріям поїздів «наскрізний» і «дільничний», залишилися не включеними два призначення, які за умовами дослідження не враховували в цій роботі – це категорія поїздів «диспетчерський локомотив».

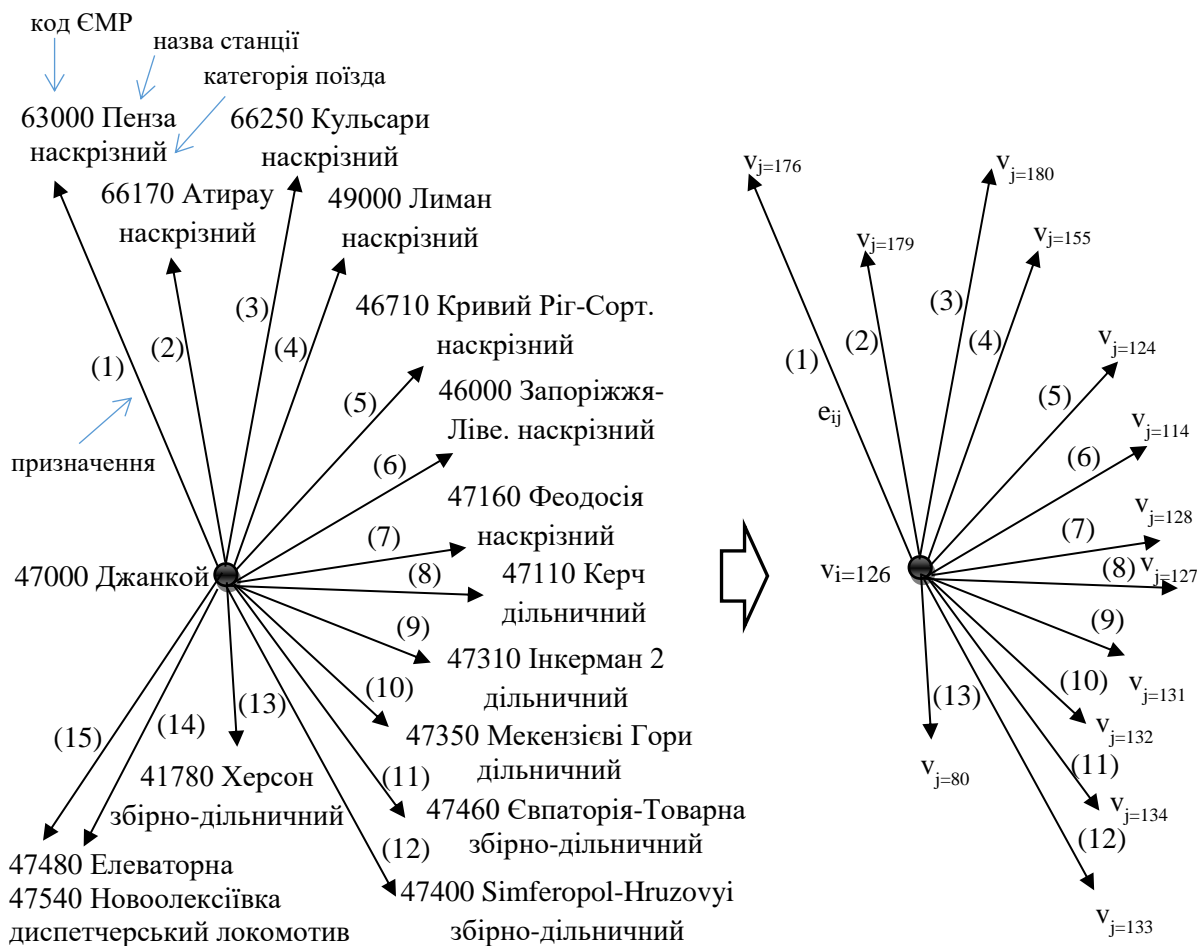


Рис. 1. Приклад візуалізації перетворення інформації з ПФП 2012-2013 років у граф з вершинами і дугами: ліворуч призначення ПФП для станції Джанкой; праворуч створений граф із вершиною і дугами

На основі оцифрованих нормативних документів «Порядок організації вагонопотоків в поїзди – План Формування поїздів (ПФП)» [3] сформовано незважені орієнтовані графи G2013 і G2019, у яких вершини відповідають станціям формування поїздів, а дуги відповідають призначенням відповідно до плану формування. Для

забезпечення коректності порівняння у графовому поданні враховано лише наскрізні та дільничні категорії поїздів. У результаті граф G2013 включає 181 станцію та 484 зв'язки, тоді як граф G2019 має 140 станцій і 442 зв'язки, що відображає скорочення мережі на 44 станції, які задіяні в організації вагонопотоків (рис. 2).

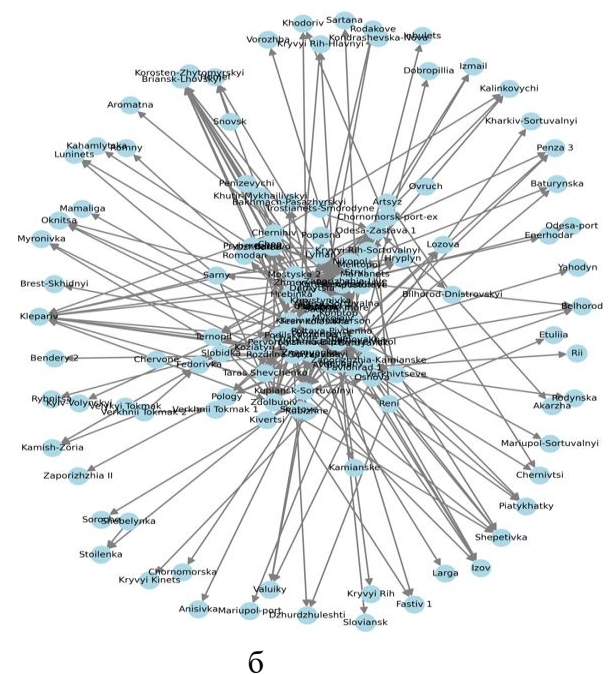
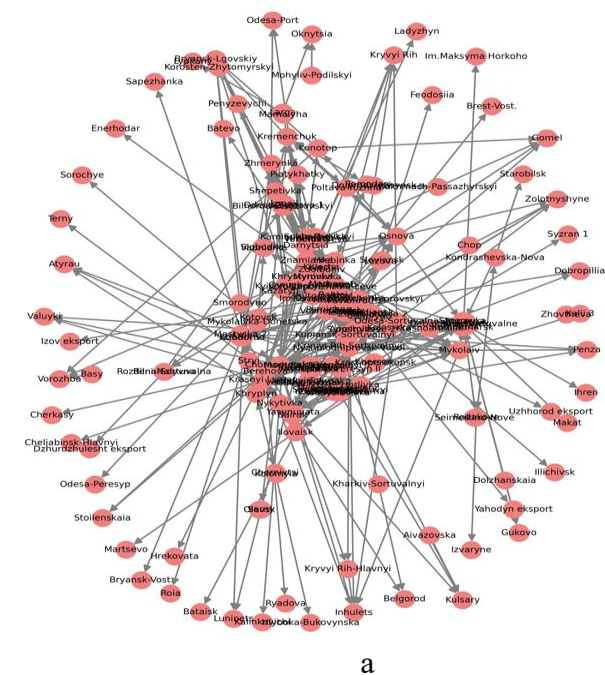


Рис. 2. Візуалізація графів мережі призначень ПФП:
а – ПФП 2012-2013 року – G2013; б – ПФП 2018-2019 року - G2019

Отримані графи наочно демонструють не лише кількісне зменшення мережі, а і зміну характеру її зв'язності. Для виявлення просторових закономірностей концентрації основних вузлів виконано KDE-аналіз розподілу хабів і авторитетних станцій (англ. Kernel Density Estimation, KDE) [18]. Порівняння карт ядерної густини для G2013 і G2019 (рис. 3) показало істотну трансформацію просторової організації мережі. У результаті порівняльного KDE-аналізу двох станів мережі 2013 і 2019 року виявлено значну трансформацію просторового розподілу основних вузлів і авторитетних станцій під впливом втрат частини інфраструктури. Визуалізація на рис. 3 карт оцінювання ядерної густини

розподілу основних вузлів підтвердила, що у 2013 році центр тяжіння був сконцентрований поблизу впливових станцій Півдня та Сходу України з поступовим згасанням на периферії. У 2019 році спостерігають зміщення локальної групи впливових станцій більше до центру, і з'явилося кілька нових менш сконцентрованих зон із найбільшим скупченням важливих станцій, що розширило зону обслуговування в напрямку західного кордону та Півночі. Це зменшило просторову неоднорідність. Така динаміка свідчить про зменшення просторової неоднорідності та адаптацію мережі до втрати частини інфраструктури.

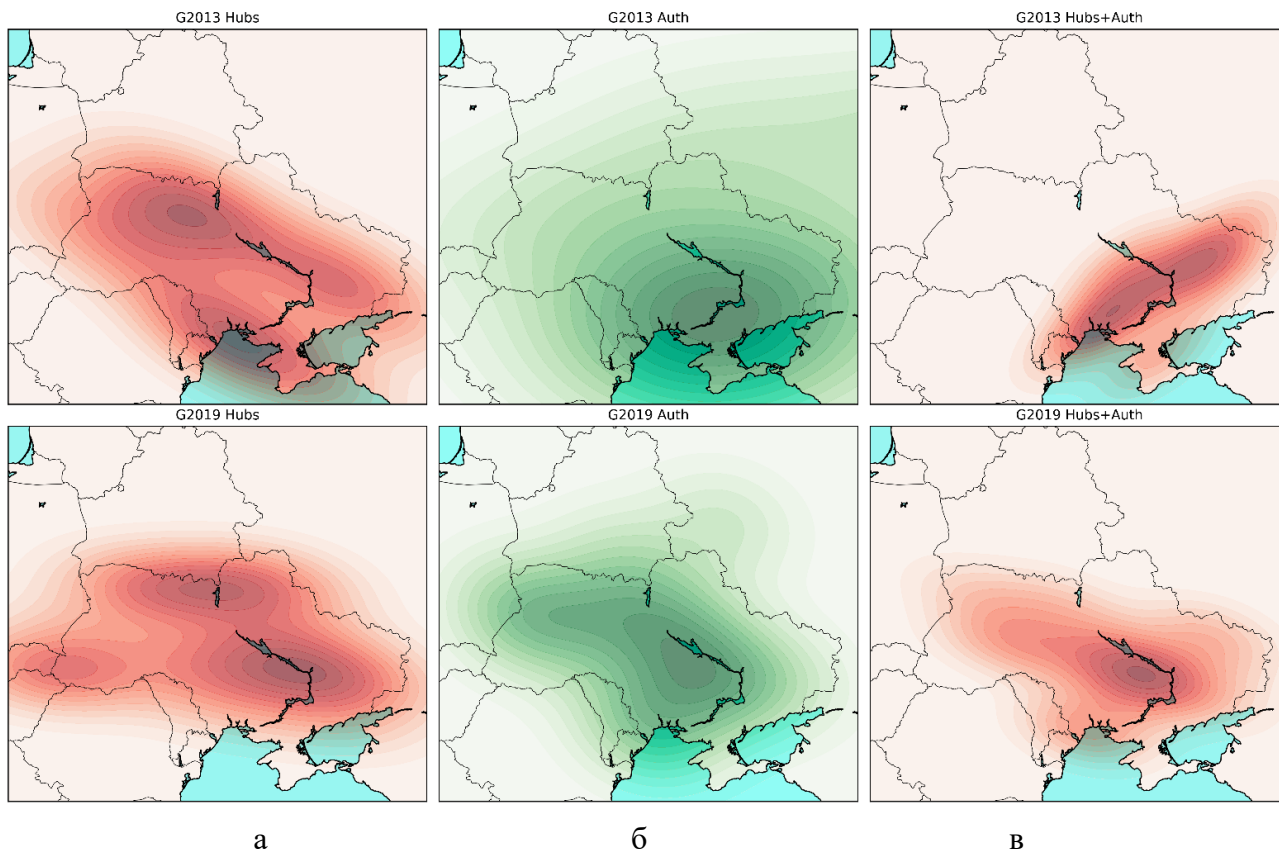


Рис. 3. Карти оцінювання ядерної густини (Kernel Density Estimation) розподілу основних вузлів у графах G2013 і G2019: а – для вузлів категорії «хороший хаб»; б – вузлів категорії «хороший авторитет»; в – вузлів категорії «хороший хаб і авторитет»

Для кількісного порівняння структурної організації мереж застосовано підхід мережевого портрету та індекс дивергенції мережевих портретів (англ.

Network Portrait Divergence) [19, 20]. На рис. 4 наведені портрети мереж G2013 і G2019 відповідно.

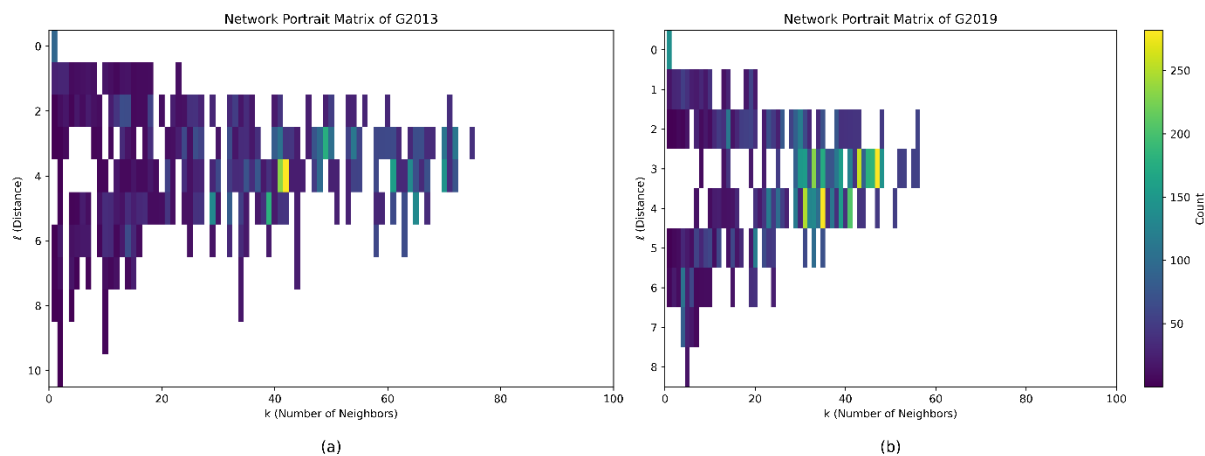


Рис. 4. Портрети мереж: а – граф G2013; б – граф G2019

Мережевий портрет є масивом $V(\ell, s)$, де кожен елемент являє собою кількість вузлів, що мають рівно s сусідів на відстані ℓ , $0 \leq \ell, 0 \leq \ell \leq d, 0 \leq s \leq n-1$ [21]. У цьому дослідженні відстань ℓ розраховували як найкоротшу довжину шляху за допомогою алгоритму пошуку в ширину (BFS). Для кожного вузла підраховували кількість вузлів-сусідів s на кожній відстані ℓ і записували ці значення у відповідну портретну матрицю, яка візуалізована як теплова карта (білий позначає елемент $V(\ell, s) = 0$). Портрети G2013 (рис. 4, а) і G2019 (рис. 4, б) відображають подібний патерн, але портрет G2019 значно коротший за G2013.

Для графа G2013 спостерігають найбільшу кількість сусідів – $s = 52$ за відстані $\ell = 1$, тоді як для G2019 є вузли, які мають максимум $s = 27$ сусідів на відстані $\ell = 6$. Це може свідчити, що граф G2013 має високий рівень локальної зв'язності, а граф G2019 має більш глобальні зв'язки в графі, що створює більшу кількість сусідів на великих відстанях. Відмінність двох мереж підтверджена і розрахованим індексом $D_{NPD}(G2013||G2019)$ (англ. network

portrait divergence index) між двома портретними матрицями, який склав 7.37. Розрахунок був проведений після нормалізації портретних матриць за допомогою відстані Кульбака-Лейблера (англ. the Kullback-Liebler) [22]. Значення $D_{NPD}(G2013||G2019)$ більше за 5 уже свідчить про значну різницю у структурі мереж, як-от зміна основних вузлів або перебудова основних компонентів мережі [19]. Це підтверджує, що мережі мають різну організацію зв'язків і відстаней між вузлами. Отже, мережа G2013 має сильну локальну взаємодію вузлів, тоді як G2019 демонструє більш складну структуру зв'язків на великих відстанях, тобто вузли з'єднані через більші відстані та вони є суттєво різними.

Подальший аналіз ієрархічної структури мережі виконано за допомогою ієрархічної кластеризації на основі загальної гармонійної центральності [23]. Для візуалізації зміни ієрархічної структури мережі розраховано і побудовано ієрархічні дендрограми для графів G2012 і G2019 (рис. 5).

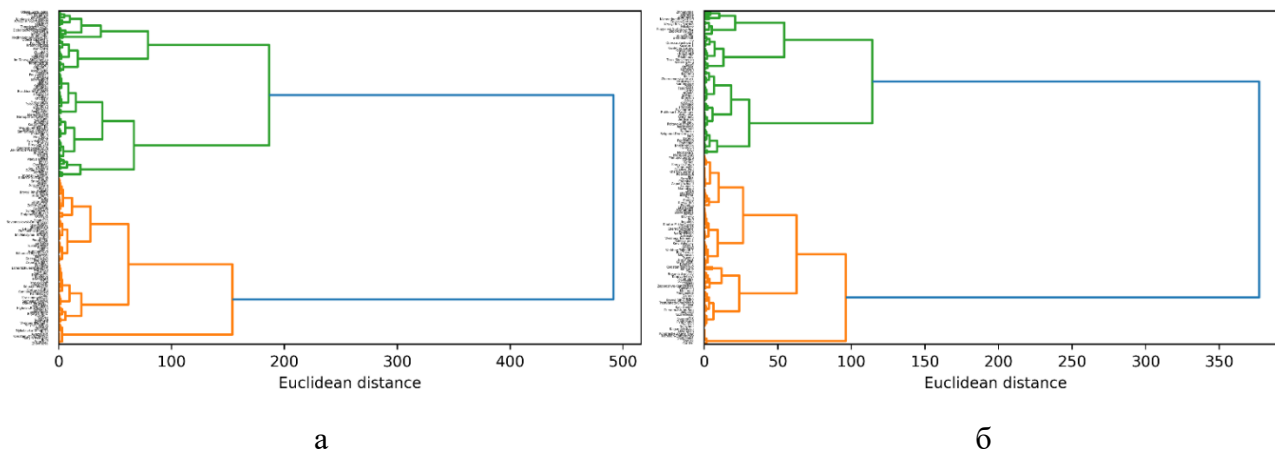


Рис. 5. Ієрархічні дендрограми вузлів мережі вантажних перевезень України за показником загальної гармонійної центральності: а – G2013; б – G2019

На основі проведеного порівняльного аналізу дендрограм на рис. 5 виявлено, що у 2013 році максимальний міжкластерний

розрив досягав 491.5, тоді як у 2019 році він зменшився до 376.96, тобто відбулося зменшення на 23.3%. Якщо поріг 30%

максимальної «висоти» злиттів, граф G2013 розпадається на чотири кластери з більш вираженою структурою центральних, проміжних і периферійних груп вузлів. У G2019 за того самого порогу утворюються три кластери та відсутній периферійний кластер із низькими значеннями центральності. Мінімальна середня загальна центральність збільшується з 1.5 у 2013 році до 25.7, тобто більш ніж у 17 разів. Отже, незважаючи на загальне зменшення розміру мережі в G2019 кластери консолідовані і стали ближчими за структурою. Мережа компенсує втрату розгалуженості й глибини за рахунок підвищення локальної згуртованості, вагонопотоки перерозподілено на декілька помірних кластерів станцій замість сильного глобального ядра.

Для поглибленого аналізу внутрішньої організації мережі досліджено її спільнотну

структуру. Для виявлення спільнот застосовано метод Лувена [24] і розраховано показники модульності, ентропію розподілу спільнот [25]. На рис. 6 за результатами розрахунків візуалізовано спільнотну структуру двох графів. Для графа G2012 виділено 12 спільнот із середнім розміром 15.08 станцій і модульністю 0.523. При цьому розподіл розмірів є досить розосередженим, найбільші спільноти містять 32, 27, 26, 25, 18 вузлів, а ентропія розподілу становить 2.25. Для G2019 спостерігають суттєве укрупнення спільнот із модульністю 0.4579 та ентропією 1.887, виділено лише сім спільнот із середнім розміром 20 станцій, а максимальна спільнота містить 30 станцій. Після втрати частини вузлів у графі G2019 модульність зменшилася майже на 13 %, що вказує на розмивання меж між кластерами та більшу інтеграцію окремих частин мережі.

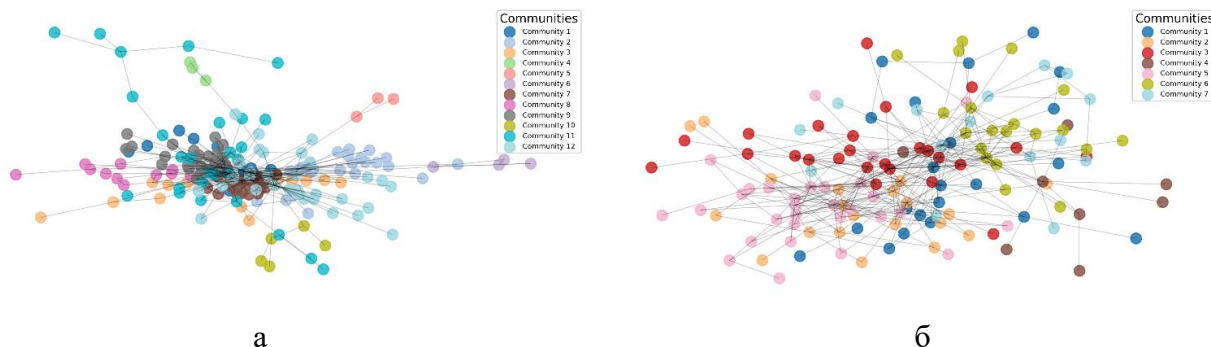


Рис. 6. Візуалізація графів мережі залізничних вантажних перевезень України з виявленими спільнотами: а – G2013; б – G2019

Зменшення модульності після втрати частини інфраструктури свідчить про зниження рівня розділення мережі на функціональні спільноти і поступову втрату локалізованої моделі hub-and-spoke [26], де окремі хаби об'єднують локальні кластери станцій навколо себе. Як наслідок, мережа втрачає властивості класичної hub-and-spoke системи, стаючи ближчою до point-to-point моделі [26] із більшою кількістю зв'язків між окремими вузлами різних спільнот.

Для поєднання інформації про спільнотну структуру мережі, ієрархію вузлів за ступенем зв'язності та наявність критичних елементів, що забезпечують цілісність мережі, в дослідженні візуалізовано спільнотний аналіз у форматі діаграми радіальної осьової візуалізації спільнотної структури (англ. hive plot). На рис. 7 показано порівняльні радіальні осьові візуалізації спільнот мереж ПФП. Кожна вісь відповідає окремій спільноті, вузли

впорядковано вздовж осей за спаданням ступеня, а їхній розмір відображає відносну важливість у структурі мережі. Окремо виділено вузли, що входять до найбільшої

кліки, а також ребра-мости, які відіграють критичну роль у збереженні зв'язності між спільнотами.

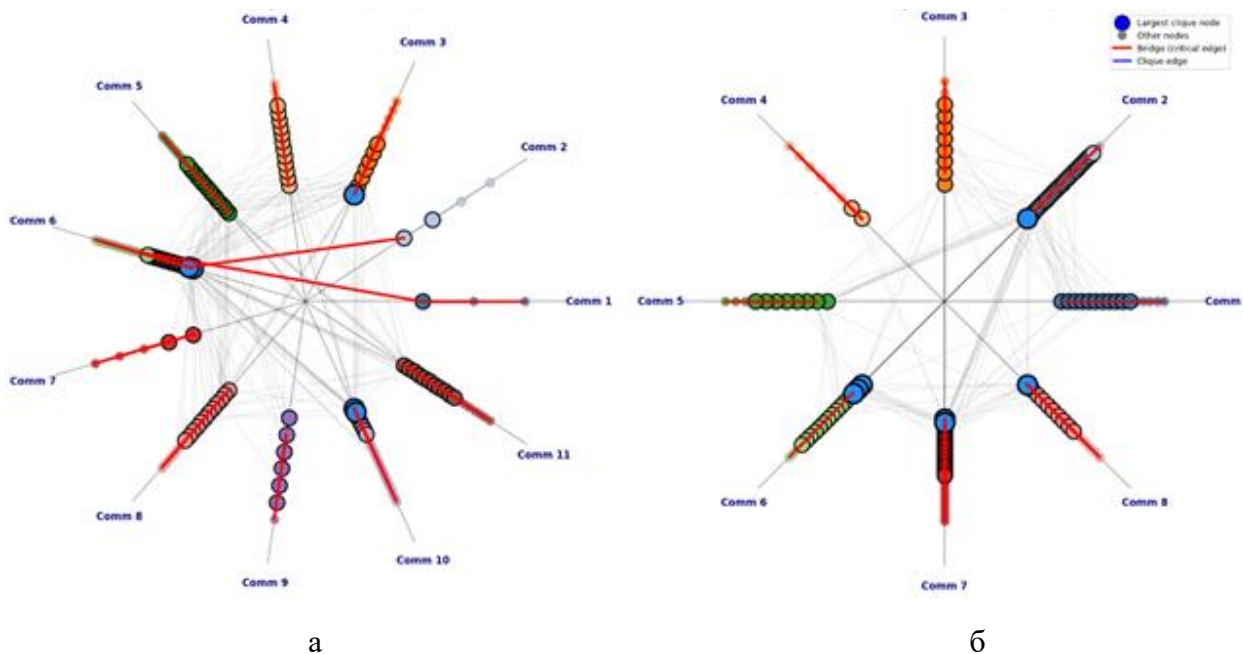


Рис. 7. Радіальна осьова візуалізація спільнотної структури ПФП залізничної мережі вантажних перевезень України: а – G2013; б – G2019

Порівняльний аналіз показує (рис. 7, а), що в мережі G2013 спостерігають більшу кількість спільнот (12) із вираженою ієрархією та наявністю окремих домінуючих вузлів, які одночасно виконують функції хабів і міжкластерних з'єднувачів. Розміри спільнот у цей період мають значну варіативність від 3 до 32 вузлів за середнього розміру 15,1 вузла, що відображено у відносно високому значенні модульності. Такі характеристики свідчать про фрагментовану структуру мережі з чітко вираженими функціональними групами та високою залежністю перевізного процесу від обмеженої кількості основних станцій, що підвищує вразливість мережі до втрати окремих елементів.

Натомість у мережі G2019 (рис. 7, б) структура стає більш консолідованою:

кількість спільнот зменшується до 7, а їхній середній розмір зростає до 20 вузлів за меншої дисперсії розмірів (від 8 до 30 вузлів). Це вказує на ослаблення меж між спільнотами та посилення міжгрупових зв'язків, супроводжено зменшенням ролі окремих домінуючих хабів і формуванням найбільшої кліки в центральній частині мережі, що свідчить про перехід до більш збалансованої моделі організації перевезень і зростання здатності мережі до компенсації втрат основних станцій за рахунок підвищення внутрішньої згуртованості.

Для виявлення найбільш щільно взаємопов'язаних груп станцій, між якими існує повна взаємна зв'язність у межах ПФП, запропоновано проаналізувати клікову структуру мережі ПФП. Кліки відображають ядра інтенсивної координації перевізного процесу і характеризують

рівень структурної консолідації мережі ПФП, що є важливим індикатором її здатності забезпечувати стійке

функціонування в умовах змін напрямлення вагонопотоків і втрати окремих елементів (рис. 8).

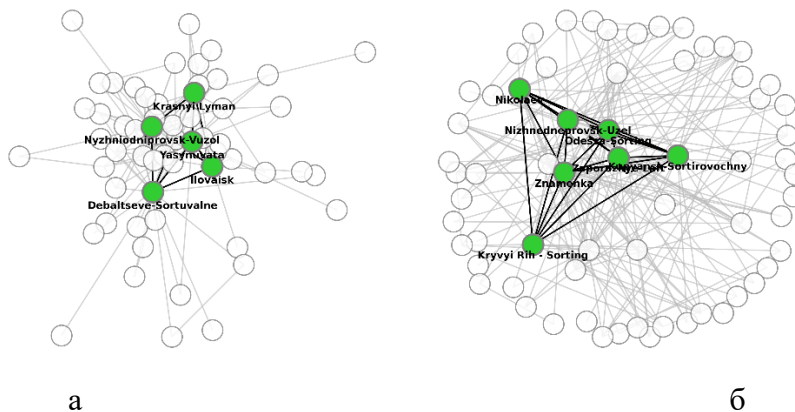


Рис. 8. Візуалізація найбільших клік і їхніх сусідів у графах мережі залізничних вантажних перевезень України: а – G2013 із найбільшою клікою п’ять станцій і 54 сусіди; б – G2019 із найбільшою клікою сім станцій із 59 сусідами

Визначення найбільшої кліки має особливе значення, оскільки вона окреслює групу станцій, які формують найбільш узгоджений і взаємозамінний сегмент мережі. У графі G2013 найбільша кліка розміром п’ять станцій відображає локалізоване ядро передавання вагонопотоками, що зумовлює підвищену чутливість мережі до втрати будь-якого з цих вузлів. Натомість у графі G2019 найбільша кліка зростає до семи станцій, що свідчить про розширення та географічну диверсифікацію ядра мережі. Збільшення розміру найбільшої кліки та кількості її безпосередніх сусідів з 54 у G2013 до 59 у G2019 у поєднанні зі зменшенням загальної кількості клік із 246 до 211 вказує на перехід мережі до більш інтегрованої структури. За таких умов функції координації перевезень розподілені між більшою кількістю взаємопов’язаних станцій, що підвищує здатність мережі до компенсації локальних відмов і створює передумови для більш стійкого управління розвитком залізничної інфраструктури.

Результати проведеного макроаналізу демонструють, що залізнична мережа України здатна компенсувати втрату частини інфраструктури через консолідацію, підвищення локальної згуртованості та перебудову просторової ієрархії. Це підтверджує доцільність використання мережевих показників як аналітичної основи для формування методів управління розвитком залізничної мережі вантажних перевезень у довгостроковій перспективі.

Отримані результати створюють підґрунтя для практичного застосування мережевого підходу для управління розвитком залізничної мережі України. Зокрема, ідентифікація основних вузлів, що входять до найбільших клік і забезпечують щільну взаємодію між кількома спільнотами, дає змогу обґрунтовувати пріоритетність інвестиційних рішень про модернізацію та розвиток інфраструктури. Аналіз критичних міжкластерних зв’язків і просторової ієрархії мережі може бути використаний для підвищення стійкості вантажних перевезень через

диверсифікацію маршрутів руху поїздопотоків і формування резервних схем організації вагонопотоків. Результати дослідження також можуть бути враховані для корегування планів формування поїздів із метою зменшення залежності транспортних процесів від окремих домінуючих станцій і перерозподілу функцій між альтернативними вузлами мережі. Інтеграція показників спільнотної структури, модульності, ентропії та клікових характеристик у систему стратегічного планування забезпечує можливість оцінювання довгострокових наслідків управлінських рішень на макрорівні, зокрема в умовах структурних змін, воєнних ризиків і відновлення інфраструктури. Отже, запропонований у роботі макроаналіз транспортних процесів забезпечує перехід від описового дослідження структури мережі до формування практично орієнтованих методів управління її розвитком, що є актуальним завданням для сучасної залізничної системи України.

Висновки. У статті виконано макроаналіз структурної трансформації залізничної мережі вантажних перевезень на основі мережевого подання плану формування поїздів, що дало змогу виявити закономірності еволюції транспортних процесів в умовах зміни обсягів перевезень і часткової втрати інфраструктури. Отримані результати підтверджують, що ПФП може бути ефективно використаний не лише як операційно-технологічний інструмент, а і як інформаційна основа для аналізу та управління розвитком залізничної мережі на макрорівні.

Порівняльний аналіз мережевих структур для різних періодів функціонування залізничної системи показав наявність суттєвих змін у топології, ієрархії та просторовій організації вагонопотоків у поїзди. Зокрема, встановлено скорочення кількості вузлів і спільнот, зниження модульності та ентропії розподілу спільнот, а також зростання

середнього розміру функціональних груп, що свідчить про консолідацію мережі та посилення міжкластерних зв'язків. Такі зміни відображають адаптаційну реакцію мережі на зовнішні обмеження та перерозподіл вагонопотоків. Аналіз спільнотної, клікової та ієрархічної структур допоміг виявити зміну ролі основних вузлів у мережі та трансформацію її ядра. Зростання розміру найбільшої кліки і розширення кола її безпосередніх сусідів вказують на підвищення внутрішньої узгодженості мережі та зменшення залежності транспортних процесів від окремих домінуючих станцій. Водночас ідентифікація критичних міжкластерних зв'язків підтверджує наявність елементів, що залишаються визначальними для збереження цілісності мережі.

Узагальнення результатів макроаналізу свідчить, що структурна трансформація залізничної мережі вантажних перевезень України має системний характер і супроводжена перебудовою просторової ієрархії, консолідацією функціональних груп і зміною механізмів координації перевізних процесів. Це створює передумови для використання мережевих показників як кількісних індикаторів для оцінювання наслідків управлінських рішень про розвиток, модернізацію або відновлення окремих елементів інфраструктури.

Отже, результати дослідження обґрунтовують можливість і доцільність застосування макроаналізу транспортних процесів на основі плану формування поїздів як інструменту підтримки управлінських рішень у сфері розвитку залізничної мережі вантажних перевезень. Запропонований підхід дає змогу перейти від описового аналізу структурних змін до формування практично орієнтованих методів управління розвитком залізничної мережі в умовах довгострокової невизначеності та структурних трансформацій.

Список використаних джерел

1. Boccaletti, S., Latora, V., Moreno, Y., Chavez, M., Hwang, D. U. (2006). Complex networks: Structure and dynamics. *Physics Reports*. Vol. 424, No. 4–5. Pp. 175–308. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2005.10.009>.
2. Mohmand, Y. T., Wang, A., Saeed, N. Evolution of railway networks: A complex network perspective. (2015). *Physica A*. Vol. 436. Pp. 701–711. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2015.05.091>.
3. Official web-site of JSC Ukrzaliznytsia. URL: https://www.uz.gov.ua/cargo_transportation (accessed: 20.01.2026) [in Ukrainian].
4. Prokhorchenko, A., Kyman, A., Kravchenko, M., Medvediev, I. (2026). Structural evolution of Ukraine's freight rail transportation system under partial network loss. *Journal of Transport Geography*. Vol. 131. Article 104554. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2026.104554>.
5. Newman, M. E. J. (2010). *Networks: An Introduction*. Oxford: Oxford University Press, 784 p.
6. Barabasi, A.-L. (2016). *Network Science*. Cambridge: Cambridge University Press, 474 p.
7. Boccaletti, S., Latora, V., Moreno, Y., Chavez, M., Hwang, D. -U. (2006). Complex networks: Structure and dynamics. *Physics Reports*. Vol. 424, No. 4-5. Pp. 175–308. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2005.10.009>.
8. Wang, W., Cai, K., Du, W., Wu, X., Tong, L. (Carol), Zhu, X., Cao, X. (2020). Analysis of the Chinese railway system as a complex network. *Chaos, Solitons & Fractals*. Vol. 130. 109408. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2019.109408>.
9. Xu, Z., Li, J., Moulitsas, I., Niu, F. (2025). Analysis of China's High-Speed Railway Network Using Complex Network Theory and Graph Convolutional Networks. *Big Data and Cognitive Computing*. Vol. 9, No. 4, 101. DOI: <https://doi.org/10.3390/bdcc9040101>.
10. Derrible, S., Kennedy, C. (2010). The complexity and robustness of metro networks. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. Vol. 389, No. 17. Pp. 3678–3691. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2010.04.008>.
11. Dong, T., Li, Y., Sun, K., Chen, J. (2025). Research on the Resilience of a Railway Network Based on a Complex Structure Analysis of Physical and Service Networks. *Applied Sciences*. 15(9):5135. <https://doi.org/10.3390/app15095135>.
12. Bešinović, N., Ferrari, Nassar R., Szymula, C. (2022). Resilience assessment of railway networks: Combining infrastructure restoration and transport management. *Reliability Engineering & System Safety*. Vol. 224. 108538. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2022.108538>.
13. Derrible, S., Kennedy, C. (2010). The complexity and robustness of metro networks. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. Vol. 389, No. 17. 3678–3691. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2010.04.008>.
14. Okorokov, A. M., Vernyhora, R., Zhuravel, I., Barkalova, N. (2024). Substantiating the reliability conditions for the production process at metallurgical enterprises through the fault-tolerant functioning of the system «extraction of raw materials – technological railroad routes – metallurgical production». *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Vol. 4, No. 3 (130). 37–48. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.310679>.
15. Okorokov, A. M. (2014). Strategic management of transport cargo complex. *Science and Transport Progress*. Vol. 4 (52). 101–110. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2014/27320>.
16. Козаченко, Д. М., Очкасов, О. Б., Шепотенко, А. П., Санницький, Н. М. (2017). Перспективи використання приватних локомотивів для перевезення вантажів у напрямку морських портів. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського нац. ун-ту залізнич. транспорту*. № 6 (72). С. 7–19. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2017/118196>.

17. Butko, T., Prokhorov, V., Chekhunov, D. (2017). Devising a method for the automated calculation of train formation plan by employing genetic algorithms. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Vol. 1 (3(85)). Pp. 55-61. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.93276>.
18. Okabe, A., Satoh, T., Sugihara, K. (2009). A kernel density estimation method for networks, its computational method and a GIS-based tool. *Int. J. Geogr. Inf. Sci.* Vol. 23 (1). Pp. 7-32. DOI: <https://doi.org/10.1080/13658810802475491>.
19. Bagrow, J. P., Bollt, E. M. (2019). An information-theoretic, all-scales approach to comparing networks. *Applied Network Science*. 4 (1). 45. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41109-019-0156-x>.
20. Tantardini, M., Ieva, F., Tajoli, L., Piccardi, C. (2019). Comparing methods for comparing networks. *Scientific Reports*. Vol. 9. P. 17557. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-53708-y>.
21. Bagrow, J. P., Bollt, E. M., Skufca, J. D. & ben Avraham D. (2008). Portraits of complex networks. *Europhysics Letters*. Vol. 81. 68004. DOI: <https://doi.org/10.1209/0295-5075/81/68004>.
22. Lafhel, M., Cherifi, H., Renoust, B., El Hassouni, M. & Mourchid, Y. (2021). Movie Script Similarity Using Multilayer Network Portrait Divergence. In: Benito R.M., Cherifi C., Cherifi H., Moro E., Rocha L.M., Sales-Pardo M. (eds) *Complex Networks & Their Applications IX. COMPLEX NETWORKS 2020. Studies in Computational Intelligence*. Vol. 943. Pp. 284-295. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-65347-7_24.
23. Wasserman, Li L., Alderson, D., Doyle, J. C., Willinger, W. (2005). Towards a theory of scale-free graphs: definition, properties, and implications. *Internet Mathematics*. Vol. 2 (4). Pp. 431-523. <https://doi.org/10.1080/15427951.2005.10129111>.
24. Blondel, V. D., Guillaume, J.-L., Lambiotte, R., Lefebvre, E. (2008). Fast unfolding of communities in large networks. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*. Vol. 2008, No. 10. P. 10008. DOI: [10.1088/1742-5468/2008/10/P10008](https://doi.org/10.1088/1742-5468/2008/10/P10008).
25. Newman, M. E. J. (2006). Modularity and community structure in networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. Vol. 103, No. 23. P. 8577-8582. DOI: [10.1073/pnas.0601602103](https://doi.org/10.1073/pnas.0601602103).
26. Rodrigue, J.-P., Comtois, C., Slack, B. (2020). *The Geography of Transport Systems*. 5th ed. New York: Routledge, URL: <https://transportgeography.org> (дата звернення: 10.12.2025).

References

1. Boccaletti, S., Latora, V., Moreno, Y., Chavez, M., Hwang, D. U. (2006). Complex networks: Structure and dynamics. *Physics Reports*. Vol. 424, No. 4–5. Pp. 175–308. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2005.10.009>.
2. Mohmand, Y. T., Wang, A., Saeed, N. Evolution of railway networks: A complex network perspective. (2015). *Physica A*. Vol. 436. Pp. 701–711. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2015.05.091>.
3. Official web-site of JSC Ukrzaliznytsia. Retrieved from: https://www.uz.gov.ua/cargo_transportation (accessed: 20.01.2026) [in Ukrainian].
4. Prokhorchenko, A., Kyman, A., Kravchenko, M., Medvediev, I. (2026). Structural evolution of Ukraine's freight rail transportation system under partial network loss. *Journal of Transport Geography*. Vol. 131. Article 104554. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2026.104554> [in English].
5. Newman, M. E. J. (2010). *Networks: An Introduction*. Oxford: Oxford University Press, 784 p.
6. Barabasi, A.-L. (2016). *Network Science*. Cambridge: Cambridge University Press, 474 p.
7. Boccaletti, S., Latora, V., Moreno, Y., Chavez, M., Hwang, D. -U. (2006). Complex networks: Structure and dynamics. *Physics Reports*. Vol. 424, No. 4-5. Pp. 175–308. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2005.10.009>.

8. Wang, W., Cai, K., Du, W., Wu, X., Tong, L. (Carol), Zhu, X., Cao, X. (2020). Analysis of the Chinese railway system as a complex network. *Chaos, Solitons & Fractals*. Vol. 130. 109408. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2019.109408>.
9. Xu, Z., Li, J., Moulitsas, I., Niu, F. (2025). Analysis of China's High-Speed Railway Network Using Complex Network Theory and Graph Convolutional Networks. *Big Data and Cognitive Computing*. Vol. 9, No. 4, 101. DOI: <https://doi.org/10.3390/bdcc9040101>.
10. Derrible, S., Kennedy, C. (2010). The complexity and robustness of metro networks. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. Vol. 389, No. 17. Pp. 3678–3691. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2010.04.008>.
11. Dong, T., Li, Y., Sun, K., Chen, J. (2025). Research on the Resilience of a Railway Network Based on a Complex Structure Analysis of Physical and Service Networks. *Applied Sciences*. 15(9):5135. Retrieved from: <https://doi.org/10.3390/app15095135>.
12. Bešinović, N., Ferrari, Nassar R., Szymula, C. (2022). Resilience assessment of railway networks: Combining infrastructure restoration and transport management. *Reliability Engineering & System Safety*. Vol. 224. 108538. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2022.108538>.
13. Derrible, S., Kennedy, C. (2010). The complexity and robustness of metro networks. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. Vol. 389, No. 17. 3678–3691. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2010.04.008>.
14. Okorokov, A. M., Vernyhora, R., Zhuravel, I., Barkalova, N. (2024). Substantiating the reliability conditions for the production process at metallurgical enterprises through the fault-tolerant functioning of the system «extraction of raw materials – technological railroad routes – metallurgical production». *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Vol. 4, No. 3 (130). 37–48. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.310679> [in English].
15. Okorokov, A. M. (2014). Strategic management of transport cargo complex. *Science and Transport Progress*. Vol. 4 (52). 101–110. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2014/27320> [in English].
16. Kozachenko, D. M., Ochkasov, O. B., Shepotenko, A. P., Sannytsky, N. M. (2017). Perspektyvy vykorystannya pryvatnykh lokomotyviv dlya perevezennya vantazhiv u napryamku mors'kykh portiv. [Prospects for the use of private locomotives for cargo transportation to sea ports]. *Science and progress of transport. Bulletin of the Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*. No. 6 (72). Pp. 7–19. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2017/118196> [in Ukrainian].
17. Butko, T., Prokhorov, V., Chekhunov, D. (2017). Devising a method for the automated calculation of train formation plan by employing genetic algorithms. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Vol. 1 (3(85)). Pp. 55-61. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.93276> [in English].
18. Okabe, A., Satoh, T., Sugihara, K. (2009). A kernel density estimation method for networks, its computational method and a GIS-based tool. *Int. J. Geogr. Inf. Sci.* Vol. 23 (1). Pp. 7-32. DOI: <https://doi.org/10.1080/13658810802475491>.
19. Bagrow, J. P., Bollt, E. M. (2019). An information-theoretic, all-scales approach to comparing networks. *Applied Network Science*. 4 (1). 45. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41109-019-0156-x>.
20. Tantardini, M., Ieva, F., Tajoli, L., Piccardi, C. (2019). Comparing methods for comparing networks. *Scientific Reports*. Vol. 9. P. 17557. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-53708-y>.
21. Bagrow, J. P., Bollt, E. M., Skufca, J. D. & ben Avraham D. (2008). Portraits of complex networks. *Europhysics Letters*. Vol. 81. 68004. DOI: <https://doi.org/10.1209/0295-5075/81/68004>.
22. Lafhel, M., Cherifi, H., Renoust, B., El Hassouni, M. & Mourchid, Y. (2021). Movie Script Similarity Using Multilayer Network Portrait Divergence. In: Benito R.M., Cherifi C., Cherifi H., Moro E., Rocha L.M., Sales-Pardo M. (eds) *Complex Networks & Their Applications IX. COMPLEX NETWORKS 2020. Studies in Computational Intelligence*. Vol. 943. Pp. 284-295. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-65347-7_24.

23. Wasserman, Li L., Alderson, D., Doyle, J. C., Willinger, W. (2005). Towards a theory of scale-free graphs: definition, properties, and implications. *Internet Mathematics*. Vol. 2 (4). Pp. 431-523. <https://doi.org/10.1080/15427951.2005.10129111>.

24. Blondel, V. D., Guillaume, J.-L., Lambiotte, R., Lefebvre, E. (2008). Fast unfolding of communities in large networks. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*. Vol. 2008, No. 10. P. 10008. DOI: 10.1088/1742-5468/2008/10/P10008.

25. Newman, M. E. J. (2006). Modularity and community structure in networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. Vol. 103, No. 23. P. 8577-8582. DOI: 10.1073/pnas.0601602103.

26. Rodrigue, J.-P., Comtois, C., Slack, B. (2020). *The Geography of Transport Systems*. 5th ed. New York: Routledge. Retrieved from: <https://transportgeography.org> (access date: 10.12.2025).

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. E-mail: kyman.am@kart.edu.ua.

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

Дата надходження статті 11.02.2026 р.

Дата прийняття статті до друку 12.03.2026 р.

Дата публікації (оприлюднення) статті 4.05.2026 р.

Стаття поширюється на умовах ліцензії Creative Commons Attribution License International CC-BY.