

Український державний університет залізничного транспорту  
Міністерства освіти і науки України

Український державний університет залізничного транспорту  
Міністерства освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

КРАВЧЕНКО МИХАЙЛО АНАТОЛІЙОВИЧ

УДК 656.2

**ДИСЕРТАЦІЯ**

**УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСУ ЗАЛІЗНИЧНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ  
ЗЕРНОВИХ ВАНТАЖІВ НА ОСНОВІ ПРИНЦИПІВ РАЙДШЕРИНГУ**

275 – транспортні технології

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,  
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

\_\_\_\_\_ М.А. Кравченко

Науковий керівник

ПРОХОРЧЕНКО Андрій Володимирович,  
доктор технічних наук, професор

Харків – 2024

## АНОТАЦІЯ

*Кравченко М.А.* Удосконалення процесу залізничних перевезень зернових вантажів на основі принципів райдшерингу. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 275 – Транспортні технології. – Український державний університет залізничного транспорту, МОН України, Харків, 2024.

Дисертацію присвячено питанню підвищення ефективності залізничних перевезень зернових вантажів на основі райдшерингового сервісу об'єднання вантажовідправників для організації ступеневих маршрутів на залізничній мережі України. Це дозволить прискорити просування вагонних відправок з зерновими вантажами та скоротити простій вагонів на технічних станціях.

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає у вирішенні наукового завдання щодо теоретичного обґрунтування ефективності застосування моделі перевезень зернових вантажів на основі райдшерингового сервісу погодженої організації ступеневих маршрутів для залізничних систем за діючими умовами руху – без дотримання розкладу відправлення вантажних поїздів та в умовах дотримання розкладу руху поїздів. Вперше для формалізації процесу перевезень зернових вантажів на основі погодженої організації ступеневих маршрутів за принципами райдшерингу в залізничних системах розроблено метод пошуку плану перевезень на основі математичної моделі у вигляді коаліцій в іграх з перевантаженням з функцією вартості та розподілу потоків на мережі. Постановку гри перетворено на задачу нелінійної оптимізації, яку розв'язано за допомогою генетичного алгоритму, в межах фітнес функції якого використано штучну нейронну мережу як математичну модель нелінійної регресії, що ґрунтується на макроаналізі мережевого ефекту та дозволяє змоделювати взаємозалежність руху поїздопотоків на маршрутах перевантаженого полігону. Це дозволило вперше з достатньою точністю та швидкістю розв'язку

змоделювати поведінкові механізми, що відбуваються в залізничній системі в умовах реалізації райдшерингового сервісу перевезень зернових вантажів.

Для дослідження впливу удосконалення процесу залізничних перевезень зерна на роботу залізничної системи розроблено метод оцінки відсутності координації в залізничній системі на основі проведення розрахунків ціни анархії (англ., The price of anarchy, PoA) за різними порівняльними сценаріями перевезень зернових вантажів. Ціна анархії для залізничної системи України у випадку роботи за діючою моделлю перевезень зернових у “високий сезон” складає 1,0605. Це доводить, що ефективність роботи залізничної системи при удосконаленні перевезень зернових вантажів на основі принципів райдшерингу від сценарію поведінки за діючою моделлю перевезень покращиться на 6,05%. За отриманими результатами теоретично обґрунтовано важливість координації в залізничній системі України для прискорення перевезень та підвищення пропускної спроможності. Виявлений поведінковий механізм для стимулювання вантажовідправників до утворення ступеневих маршрутів, що базується на координації в межах єдиного інформаційного середовища та забезпечення подачі під маршрутні групи поїзного локомотива відповідно до заздалегідь узгодженого графіку руху.

Удосконалено комплекс функціональних задач системи АСК ВП УЗ-Є на основі формування вимог до цифрової платформи агрегатора для координації вантажовідправників та перевізника за принципами райдшерингу, що забезпечить поєднання вагонних відправок у ступеневий маршрут за рахунок укрупнення навантаження партій зерна різних вантажовідправників, що бажають відправити у співпадаючі календарні періоди для можливості бронювання місця в ступеневому маршруті. Це дозволить прискорити рух відправок із зерновими вантажами та підвищити ефективність використання обмеженої пропускної спроможності залізничної мережі.

Практичні результати роботи полягають у тому, що вирішено прикладне завдання автоматизації пошуку плану залізничних перевезень зернових вантажів на основі погодженої організації ступеневих маршрутів за принципами

райдшерингу. Завдяки застосуванню методу побудови штучної нейронної мережі як математичної моделі нелінійної регресії вдалося формалізувати взаємозалежності руху поїздопотоків на перевантаженому полігоні мережі. Це дозволило чисельно оцінити взаємозв'язок інтенсивності руху поїздів на окремих ділянках на тривалість слідування поїздів на маршрутах перевантаженого полігону. Отриманий науковий результат у вигляді розробки математичної моделі райдшерингового сервісу залізничних перевезень зернових вантажів є цікавим з теоретичної та практичної точки зору. Проведені моделювання та знайдені залежності довели адекватність моделі та вплив запровадження райдшерингового сервісу перевезень зернових з урахуванням руху за розкладом на ефективність роботи залізничної системи. З практичної точки зору виявлений поведінковий механізм в залізничній системі та важливість врахування у нових сервісних продуктах райдшерингових перевезень зернових на залізниці стимулів для вантажовідправників. Одним із таких стимулів може бути надання виділеного вільного часового слоту для руху, що буде прискорювати перевезення у порівнянні із звичайними. Таким чином, прикладним аспектом використання отриманого наукового результату є можливість удосконалення зернової логістики на залізниці за рахунок використання райдшерингового сервісу.

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету та задачі дослідження, відображено наукову новизну та практичну цінність, подано загальну характеристику роботи.

Перший розділ присвячено аналізу передумов удосконалення процесу перевезень зернових вантажів на залізничному транспорті України. Проведено аналіз ринку перевезень зернових вантажів на залізничному транспорті України в умовах діючої операційної моделі АТ “Укрзалізниця”. Виявлено загальний тренд зростання обсягів збору зернових навіть в умовах зменшення обсягів в останні роки з причин впливу російської війни проти України. Одна з найбільших часток у валютних надходженнях припадає на зернові вантажі, які є високомаржинальними вантажами для перевезення. Однак, у сегменті



перевезень вагонних відправок спостерігається значна конкуренція з боку автомобільного транспорту. На ринку присутня велика кількість гравців - частка однієї з найбільших компаній експортерів не перевищує 8%. Аналіз відправок з кодами вантажу 01 та 02 – клас “сільськогосподарська продукція” за жовтень 2019 року виявив, що на залізничній мережі майже 94% від загальної кількості навантажених вагонів слідували призначенням до припортових станцій Великої Одеси та Миколаєва. Паралельний аналіз розвитку залізничної інфраструктури станцій відправлення виявив, що 70,2% від всіх станцій, відкритих для вантажних операцій із зерновими вантажами, є не маршрутними, що відправляють лише вагонні відправки. В таких умовах важливим є напрям удосконалення перевезень зернових, що дозволить здійснювати відправлення зі станцій, що не можуть вантажити маршрутні состави поїздів.

Аналіз проблем операційної моделі АТ “Укрзалізниця” виявив недосконалість діючої хабової моделі перевезень вантажів, яка надає перевагу вагонним і груповим відправкам. Практика пікових сезонів перевезень зернових доводить, що досить часто ключові сортувальні станції в мережі АТ “Укрзалізниця” зупиняються з причин перевантаження та дефіциту поїзних локомотивів. Діюча система відправлення вантажних поїздів “за готовністю” приносить значну невизначеність. Доведено важливість прискорення поїздопотоків за рахунок надання запланованих ниток графіку. Спираючись на аналіз практик в інших транспортних галузях, запропоновано переглянути операційну модель маршрутизації перевезення зернових вантажів в Україні, ґрунтуючись не тільки на відправницьких маршрутах, а і за принципом райдшерингу в межах цифрової платформи-агрегатора поєднати вагонні відправки у ступеневий маршрут за рахунок укрупнення навантаження партій зерна до 15-25 вагонів різних відправників, що бажають відправити у співпадаючі календарні періоди для можливості бронювання місця в ступеневому маршруті.

Проведено аналіз передумов реалізації перевезень зернових вантажів ступеневими маршрутами за принципом спільного використання. Відповідно до

проведеного аналізу реальних даних щодо обсягів навантаження у червні та жовтні 2019 року виявлено, що потенційно в часовому періоді до 3 діб від моменту першого навантаження можливо об'єднати до 20,6% та 20,7% відповідно. У червні близько до 4800 вагонів, а у жовтні до 6000 вагонів з агропродукцією могли б бути відправлені у ступеневих маршрутах. Дані результати з практичного погляду обґрунтовують важливість досліджень в напрямі удосконалення перевезень зернових вантажів з урахуванням утворення ступеневих маршрутів на основі принципів райдшерингу.

Виконаний аналіз теоретичних і практичних досліджень щодо удосконалення перевезень зернових вантажів в залізничних системах довів важливість застосування маршрутизації перевезень, зокрема за рахунок ступеневих маршрутів. Однак, відсутніми є дослідження, спрямовані на вивчення впливу ступеневої маршрутизації на залізничну систему України в умовах самоорганізації вантажовідправників в межах цифрової платформи на основі принципів райдшерингу. Аналіз різних наукових праць щодо моделювання райдшерингових сервісів дозволяє зробити висновок, що математичні моделі, які дозволяють змодельовати райдшеринговий сервіс перевезення зернових вантажів в залізничній системі, відсутні. Однак, виявлені переваги та результати досліджень в інших галузях дозволяють зробити висновок, що поєднання теоретико-ігрового підходу з класичними оптимізаційними транспортними задачами надасть можливість створити нову математичну модель, що врахує складну взаємодію вантажовідправників в залізничній системі з урахуванням їх поведінки та інтересів, що часто не співпадають з інтересами ефективного функціонування залізничної системи в умовах перевантаження. Запропоновано формалізувати технологію перевезень зернових вантажів на основі утворення ступеневих маршрутів з урахуванням принципів райдшерингу на залізничній мережі України в піковий період навантаження.

Другий розділ присвячено розробці методу побудови штучної нейронної мережі для моделювання взаємозалежності руху поїздопотоків на мережі. Метод

ґрунтується на макроаналізі мережевого ефекту з використанням побудови кластерограм взаємозв'язку інтенсивності руху поїздів на окремих ділянках на тривалість слідування поїздів на маршрутах перевантаженого полігону. На основі макроаналізу мережевого ефекту з використанням побудови кластерограм чисельно оцінено взаємозв'язок інтенсивності руху поїздів на окремих ділянках на тривалість слідування поїздів на маршрутах перевантаженого полігону. На основі знайдених взаємозалежностей запропоновано побудувати математичну модель нелінійної регресії на основі використання штучної нейронної мережі прямого поширення (англ., feedforward neural network, FNN). В межах методу побудови FNN розроблено процедуру, яка на кожному кроці передбачає створення мережі FNN з відповідною до кроку циклу кількістю нейронів, після чого мережа проходить навчання та перевіряється на точність та адекватність. Проведено перевірку побудованої штучної нейронної мережі FNN поза алгоритмом навчання на основі незалежного тестування. Похибка MAPE склала 0,03 – 3%. Точність моделі нелінійної регресії склала 97%.

Третій розділ присвячено формалізації технології перевезень зернових вантажів на основі погодженої організації ступеневих маршрутів за принципами райдшерингу в залізничних системах та дослідженню впливу удосконалення моделі залізничних перевезень зерна на роботу залізничної системи. Формалізовано процес перевезень зернових вантажів на основі принципів райдшерингу в залізничних системах без дотримання розкладу руху для вантажних поїздів за допомогою методів теорії ігор та оптимізації. Це дозволило з достатньою точністю та швидкістю розв'язку змодельовати поведінкові механізми, що відбуваються в залізничній системі в умовах реалізації райдшерингового сервісу перевезень зернових вантажів. Постановку гри запропоновано розглядати як утворення коаліцій в іграх з перевантаженням у формі функції вартості та розподілу потоків на мережі. Дану гру запропоновано перетворити на задачу нелінійної оптимізації. Для знаходження оптимального рішення за математичною моделлю використано генетичний алгоритм, в межах фітнес функції якого запропоновано використати штучну нейронну мережу як

математичну модель нелінійної регресії, що дозволяє змоделювати взаємозалежність руху поїздопотоків на мережі. Отримані результати рішення були порівняні з реальними даними діючих перевезень та довели її адекватність процесу, що досліджувався. За результатами моделювання в умовах руху за розкладом з урахуванням координації вантажовідправників та перевізника в єдиному інформаційному середовищі середня тривалість перевезення відправки є меншою на 14,9 % від показника за сценарієм діючої моделі перевезень – без дотримання розкладу. Доведена важливість стимулювання вантажовідправників до утворення ступеневих маршрутів.

Для дослідження впливу удосконалення моделі залізничних перевезень зерна на роботу залізничної системи розроблено метод оцінки відсутності координації в залізничній системі на основі проведення розрахунків ціни анархії (англ., The price of anarchy, PoA) за різними порівняльними сценаріями перевезень зернових вантажів. Ціна анархії для залізничної системи України у випадку роботи за діючою моделлю перевезень зернових у “високий сезон” складає 1,0605. Це доводить, що ефективність роботи залізничної системи при удосконаленні перевезень зернових на основі принципів райдшерингу від сценарію поведінки за діючою моделлю перевезень покращиться на 6,05%. За отриманими результатами теоретично обґрунтовано важливість координації в залізничній системі України для прискорення перевезень та підвищення пропускної спроможності. Виявлений поведінковий механізм для стимулювання вантажовідправників до утворення ступеневих маршрутів, що базується на координації в межах єдиного інформаційного середовища та забезпечення подачі під маршрутні групи поїзного локомотива відповідно до заздалегідь узгодженого графіку руху.

Четвертий розділ присвячено формуванню вимог до цифрової платформи агрегатора для координації вантажовідправників та перевізника при перевезенні зернових вантажів за принципами райдшерингу. Проведено обґрунтування стратегії експлуатації залізничної системи на основі координації в межах єдиного інформаційного середовища. Для виявлення найбільш прийнятних

стратегій експлуатації залізничної системи сформульовано гру “вантажовідправника” і “системи” як біматричну гру з платіжними матрицями. Під “системою” розуміється оператор інфраструктури (АТ “Укрзалізниця”), що може змінити стратегії планування перевезень – координувати плани навантаження з синхронізацією руху на перевантаженому полігоні чи не координувати (егоїстична поведінка при плануванні).

Виявлено переваги та недоліки технології перевезень ступеневими маршрутами на залізничній мережі України. Запропоновано удосконалити комплекс функціональних задач системи АСК ВП УЗ-Є на основі ув’язки роботи АС МЕСПЛАН та цифрової платформи агрегатора для координації вантажовідправників та перевізника за принципами райдшерингу. Це забезпечить поєднання вагонних відправок у ступеневий маршрут за рахунок укрупнення навантаження партій зерна різних вантажовідправників, що бажають відправити у співпадаючі календарні періоди для можливості бронювання місця в ступеневому маршруті. Розроблено схему процедури узгодження пропозиції щодо формування ступеневого маршруту в межах інтеграції цифрової платформи агрегатора з АСК ВП УЗ-Є. Запропоновані інтерфейси користувача та схема взаємодії з додатком для автоматизації планування утворення ступеневого маршруту в мережі на основі розробленої у дослідженні математичної моделі. Це дозволить прискорити рух відправок із зерновими вантажами та підвищити ефективність використання обмеженої пропускної спроможності залізничної мережі.

З метою економічного обґрунтування доцільності удосконалення технології перевезень зернових вантажів на основі погодженої організації ступеневих маршрутів за принципом райдшерингу проведені розрахунки економії витрат, оцінених за вагоно-годинами. За умови потенційно можливого об’єднання протягом місяця до 20% вагонів навантажених зерновими вантажами в межах трьох діб планування економічний ефект з наростаючим підсумком за період п’яти років може становити близько 730 млн. грн.

Ключові слова: залізниця, логістика, перевезення зерна, мережа, пропускна

спроможність, вагонна відправка, ступеневий маршрут, райдшеринг, моделювання, транспортна поведінка, коаліційні ігри, ігри з перевантаженням, цифрова трансформація.

## ABSTRACT

*Kravchenko M.A.* Improving the process of railway transportation of grain cargoes based on the principles of ridesharing. – Qualifying scientific work in manuscript rights.

Thesis for the degree of Doctor of Philosophy in the specialty 275 – Transport Technologies. - Ukrainian State University of Railway Transport, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2024.

The dissertation is dedicated to the issue of improving the efficiency of railway transportation of grain cargo based on the ridesharing service that consolidates freight shippers for the organisation of Stagedroute trains on the railway network of Ukraine. This will accelerate the movement of wagon shipments with grain cargo and reduce the downtime of wagons at technical stations.

The scientific novelty of the dissertation work lies in solving the scientific task related to the theoretical substantiation of the effectiveness of applying the model of grain cargo transportation based on the ridesharing service for the coordinated organization of Stagedroute trains for railway systems under current traffic conditions without adhering to the freight train departure schedule and under conditions of adhering to the train schedule. For the first time to formalize the process of transporting grain cargoes with an emphasis on the coordinated organization of Stagedroute trains in accordance with the principles of ridesharing within railway systems, a method for searching a transportation plan has been devised. This plan is founded on a mathematical model resembling coalitions in congestion games with a cost function and the distribution of flows across the network. The game's formulation was converted into a nonlinear optimization problem, which was solved through a genetic algorithm. Within the fitness function of this algorithm, an artificial neural network has been

utilized as a mathematical model for nonlinear regression, based on the macro-analysis of network effects. This approach allows modeling the interdependence of train traffic movements on routes within an overloaded polygon. For the first time, this approach has allowed the modeling of the railway system's behavioral mechanisms under the implementation of a ridesharing service for grain cargo transportation with sufficient accuracy and solution speed.

To examine the effect of refining the model of railway grain transportation on the railway system's functionality, a method for assessing the absence of coordination within the railway system was established. This assessment is based on the calculation of the price of anarchy (PoA) across various comparative scenarios of grain cargo transportation. For the Ukrainian railway system operating under the current model of grain transportation during the “high season” the price of anarchy is calculated at 1.0605. This indicates that the efficiency of the railway system, when improved grain transportation is based on ridesharing principles compared to the scenario following the current transportation model, will be enhanced by 6.05%. The findings theoretically affirm the significance of coordination in the Ukrainian railway system for expediting transportation and increasing its throughput capacity. A behavioral mechanism to encourage freight shippers to form Stagedroute trains has been identified, relying on coordination within a unified information environment and ensuring the allocation of a route locomotive according to a pre-agreed movement schedule.

Enhanced the set of functional tasks for the ASK VP UZ-E system based on the development of requirements for the digital platform aggregator to coordinate freight shippers and the carrier according to ridesharing principles. This will enable the consolidation of Single Wagonload shipments into a Stagedroute train by aggregating loads of grain from different shippers wishing to send during overlapping calendar periods for the possibility of reserving a spot in a Stagedroute train. This will speed up the movement of shipments with grain cargoes and improve the efficiency of using the limited capacity of the railway network.

The practical outcomes of the work include solving the applied task of automating the search for a railway transportation plan for grain cargoes based on the

coordinated organization of Stagedroute trains following ridesharing principles. Through the application of a method for constructing an artificial neural network as a mathematical model of nonlinear regression, it was possible to formalize the interdependencies of train flow movements on the overloaded network polygon. This enabled a numerical assessment of the relationship between the intensity of train movements on individual sections and the duration of train journeys on routes of the overloaded polygon. The scientific result obtained in the form of developing a mathematical model of the ridesharing service for railway transportation of grain cargoes is of interest from both theoretical and practical viewpoints. The conducted simulations and found dependencies proved the model's adequacy and the impact of implementing a ridesharing service for grain transportation, considering scheduled movement on the efficiency of the railway system's operation. From a practical standpoint, a behavioral mechanism in the railway system was identified, highlighting the importance of incorporating incentives for freight shippers in new ridesharing service products for grain transportation on the railway. One such incentive could be providing a dedicated free time slot for movement, which would expedite transportation compared to conventional methods. Thus, the applied aspect of using the obtained scientific result lies in the potential for improving grain logistics on the railway through the utilization of a ridesharing service.

The introduction substantiates the relevance of the topic, formulates the goal and tasks of the study, reflects the scientific novelty and practical value, and provides an overall characterization of the work.

The first chapter is dedicated to analyzing the prerequisites for improving the transportation of grain cargoes by railway in Ukraine. An analysis of the grain cargo transportation market on the Ukrainian railways under the current operational model of JSC “Ukrzaliznytsia” was conducted. A general trend of increasing grain collection volumes was identified, even in the context of decreased volumes in recent years due to the impact of the Russian war against Ukraine. Grain cargoes, which are highly profitable for transportation, account for one of the largest shares of foreign currency earnings. However, significant competition from road transport is observed in the



segment of Single Wagonload shipments. The market features a large number of players - the share of one of the largest exporting companies does not exceed 8%. An analysis of shipments with cargo codes 01 and 02 – class “agricultural products” for October 2019 revealed that almost 94% of the total number of loaded wagons on the railway network were destined for the port stations of Greater Odesa and Mykolaiiv. A parallel analysis of the development of the railway infrastructure at departure stations showed that 70.2% of all stations open for freight operations with grain cargoes are not route stations, sending only Single Wagonload shipments. Under such conditions, it is important to focus on improving grain transportation, which will allow for shipments from stations that cannot load routed train compositions.

The analysis of the operational model issues at JSC “Ukrzaliznytsia” revealed imperfections in the current hub transportation model, which favors Single Wagonload and grouped shipments. The practice of peak grain transportation seasons demonstrates that key sorting stations in the “Ukrzaliznytsia” network often come to a halt due to overload and a shortage of train locomotives. The existing system of dispatching freight trains “as ready” introduces significant uncertainty. It has been proven that accelerating train flows by providing planned threads of the schedule is crucial. Based on an analysis of practices in other transport sectors, it is proposed to reconsider the operational model for routing grain cargo transportation in Ukraine. This approach suggests not only relying on shipping routes but also using a digital platform-aggregator principle of ridesharing to combine Single Wagonload shipments into a Stagedroute train by aggregating grain loads into 15-25 wagons from different shippers wishing to send during overlapping calendar periods for the possibility of reserving a spot in a Stagedroute train.

An analysis of the prerequisites for implementing grain cargo transportation by Stagedroute trains based on the principle of shared use was conducted. According to the analysis of real data on loading volumes in June and October 2019, it was found that potentially, within a time frame of up to 3 days from the moment of the first loading, up to 20.6% and 20.7% of wagons could be combined, respectively. In June, about 4800 wagons, and in October, up to 6000 wagons with agro-products could have

been sent on Stagedroute trains. These practical findings justify the importance of research aimed at improving grain cargo transportation, considering the formation of Stagedroute trains based on ridesharing principles.

The analysis of theoretical and practical research on improving grain cargo transportation in railway systems has proven the importance of employing routing strategies, particularly through Stagedroute trains. However, there is a lack of research focused on studying the impact of Stagedroute routing on the Ukrainian railway system under conditions of self-organization of freight shippers within a digital platform based on ridesharing principles. The analysis of various scientific works on modeling ridesharing services concludes that mathematical models capable of simulating a ridesharing service for grain cargo transportation in the railway system are absent. Nonetheless, identified advantages and research results in other sectors suggest that combining the game-theoretical approach with classic optimization transport problems could create a new mathematical model. This model would account for the complex interaction of freight shippers in the railway system, considering their behavior and interests, which often do not align with the interests of the railway system's efficient functioning under overload conditions. It is proposed to formalize the grain cargo transportation technology based on forming Stagedroute trains, considering ridesharing principles on the Ukrainian railway network during peak loading periods.

The second chapter is devoted to the development of a method for constructing an artificial neural network to model the interdependence of train flow movements across the network. This method is based on a macro-analysis of the network effect using the construction of cluster diagrams to evaluate the relationship between the intensity of train movements on individual sections and the duration of trains' journeys on the routes of an overloaded polygon. By employing a macro-analysis of the network effect and the construction of cluster diagrams, the interconnection between the intensity of train movements on individual sections and the duration of trains' journeys on the routes of an overloaded polygon was numerically assessed. Based on the identified interdependencies, a mathematical model of nonlinear regression was proposed using a feedforward neural network (FNN). Within the method for

constructing the FNN, a procedure was developed that involves creating an FNN network with a corresponding number of neurons for each cycle step, after which the network undergoes training and is tested for accuracy and adequacy. An independent testing outside the training algorithm verified the constructed artificial neural network FNN. The MAPE (Mean Absolute Percentage Error) was found to be between 0.03 and 3%. The accuracy of the nonlinear regression model reached 97%.

The third chapter is dedicated to formalizing the technology of transporting grain cargoes based on the coordinated organization of Stagedroute trains according to ridesharing principles in railway systems and examining the impact of improving the grain transportation model on the operation of the railway system. The process of transporting grain cargoes based on ridesharing principles in railway systems without adhering to a freight trains' schedule was formalized using game theory and optimization methods. This allowed for accurately and swiftly modeling the behavioral mechanisms occurring in the railway system under the implementation of a ridesharing service for grain cargo transportation. The game's setup is proposed to be considered as the formation of coalitions in congestion games in the form of a cost function and distribution of flows on the network. This game is suggested to be transformed into a nonlinear optimization problem. To find the optimal solution according to the mathematical model, a genetic algorithm was used, within the fitness function of which an artificial neural network was proposed as a mathematical model of nonlinear regression, allowing for modeling the interdependence of train flow movements across the network. The obtained solution results were compared with real data from current transportations and proved its adequacy to the process being studied. According to the simulation results under conditions adhering to a schedule considering the coordination of freight shippers and the carrier in a unified information environment, the average duration of transporting a shipment is 14.9% less than the indicator under the scenario of the current transportation model – without adhering to a schedule. The importance of encouraging freight shippers to form Stagedroute trains has been proven.

To study the impact of improving the grain transportation model on the operation of the railway system, a method for assessing the lack of coordination in the railway

system was developed, based on the calculation of the price of anarchy (PoA) for various comparative scenarios of grain cargo transportation. The price of anarchy for the Ukrainian railway system, when operating under the current model of grain transportation during the "high season," is 1.0605. This indicates that the efficiency of the railway system's operation will improve by 6.05% with the refinement of grain transportation based on ridesharing principles compared to the behavior scenario under the current transportation model. The obtained results theoretically substantiate the importance of coordination in the Ukrainian railway system to speed up transportations and increase throughput capacity. A behavioral mechanism has been identified to encourage freight shippers to form Stagedroute trains, based on coordination within a unified information environment and ensuring the supply of a route group locomotive according to a previously agreed schedule of movement.

The fourth chapter is dedicated to developing requirements for a digital aggregator platform to coordinate freight shippers and carriers in the transportation of grain cargoes according to ridesharing principles. A rationale for the operational strategy of the railway system based on coordination within a unified information environment is provided. To identify the most acceptable operational strategies for the railway system, a "freight shipper" and "system" game is formulated as a bimatrix game with payoff matrices. "System" refers to the infrastructure operator (JSC "Ukrzaliznytsia"), which can change transportation planning strategies—either to coordinate loading plans with movement synchronization on an overloaded polygon or not to coordinate (selfish behavior in planning).

Advantages and disadvantages of transporting grain cargoes through Stagedroute trains on the Ukrainian railway network have been identified. It is proposed to improve the complex of functional tasks of the ASC VP UZ-E system based on integrating the operation of the AS MESPLAN and the digital aggregator platform for coordinating freight shippers and carriers according to ridesharing principles. This integration will ensure the combination of Single Wagonload shipments into a Stagedroute train through the aggregation of grain loads from different shippers wishing to send during overlapping calendar periods for the possibility of

reserving a spot in a Stagedroute train. A scheme for the procedure of coordinating proposals for the formation of a Stagedroute train within the integration of the digital aggregator platform with the the ASC VP UZ-E freight car accounting system has been developed. Proposed user interfaces and the interaction scheme with the application for automating the planning of a Stagedroute train formation in the network based on the developed mathematical model in the research. This will accelerate the movement of grain shipments and increase the efficiency of using the limited capacity of the railway network.

For the purpose of economically justifying the improvement of grain transportation technology based on a coordinated organization of Stagedroute trains following the principle of ridesharing, calculations of cost savings estimated in wagon-hours have been conducted. Assuming a potential consolidation of up to 20% of wagons loaded with grain within three days during a month, the economic effect with cumulative results over a five-year period could amount to approximately 730 million UAH.

Keywords: railway, logistics, grain transportation, network, capacity, Single Wagonload, Stagedroute train, ridesharing, modeling, transport behaviour, coalition games, congestion games, digital transformation.

#### Список публікацій здобувача

##### **Основні наукові праці:**

*Публікації у науковому фаховому виданні України категорії “Б”, що включене до міжнародних наукометричних баз:*

1. Прохорченко А.В., Кравченко М.А., Гурін Д.О. Дослідження впливу технології перевезень вантажів за розкладом руху на макропоказники залізничної системи України. *Збірник наукових праць ДУІТ. Серія “Транспортні системи і технології”*. 2020. Вип. 36. С. 184-198. DOI:10.32703/2617-9040-2020-36-19 URL: <http://tst.duit.edu.ua/index.php/tst/article/view/257>

2. Кравченко М.А., Стебницька Є., Прохорченко А.В., Киман А.М., Кірієнков А. Дослідження стабільності руху поїздопотоків на вантажонапружених залізничних полігонах. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. 2022. Вип. 199. С. 99-113. DOI: 10.18664/1994-7852.199.2022.258820 URL: <http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/9576>

3. Дідусенко В. В., Кравченко М. А., Золотарьов С. А., Прохорченко Г. О. Дослідження крос-кордонних перевезень зернових вантажів автомобільним та залізничним транспортом. *Системи та технології*. 2022. Вип. 2 (64). С. 19-29. DOI: <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2022.2-64.3> URL: <https://st.umsf.in.ua/index.php/journal/article/view/91>

*Публікації у фаховому виданні України категорії “А”, що включене до міжнародних наукометричних баз:*

4. Gurin D., Prokhorchenko A., Kravchenko M., Shapoval G. Development of a method for modelling delay propagation in railway networks using epidemiological SIR models. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 6, Issue 3 (108). P. 6-13. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.219285 URL: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/219285> (Scopus Q3).

5. Kravchenko, M., Prokhorchenko, A., Zolotarov, S. Mathematical model of a railroad grain cargo ridesharing service in the form of coalitions in congestion games. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. Vol. 5 Issue 3(125). P. 35-48. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.289470> URL: <https://journals.uran.ua/eejet/article/view/289470> (Scopus Q3)

#### **Додаткові праці та апробаційного характеру:**

*Публікація за результатами конференції у виданні іншої держави, що входить до Організації економічного співробітництва та розвитку та включене до міжнародних наукометричних баз:*

6. Prokhorchenko A., Kravchenko M., Malakhova O., Sikonenko G., Prokhorchenko H. Research of the Freight Trains Movement Stability with a Network Effect. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2023. Vol. 536 LNNS, P.785 – 794. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-20141-7\\_70](https://doi.org/10.1007/978-3-031-20141-7_70) URL:

[https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-20141-7\\_70](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-20141-7_70) (Scopus Q4, INSPEC, WTI Frankfurt eG, Web of Science Core Collection)

*Тези доповіді:*

7. Кравченко М.А. Удосконалення залізничних перевезень зернових вантажів на основі принципів райдшерингу. Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті: *тези стендових доповідей та виступів учасників 33-ї міжнародної науково-практичної конференції “Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті”* (м. Харків, Україна, 30 жовтня 2020 року). Харків:УкрДУЗТ, 2020. Вип. 3(додаток). С. 62-63.

8. Прохорченко А.В., Хорсін Т., Кравченко М.А. Дослідження можливості застосування в зерновій логістиці райдшерингових технологій перевезень на основі цифрових платформ. *II-а міжнародна науково-технічна конференція “Інтелектуальні транспортні технології”* (м.Харків, Україна, 27-29 квітня 2021 р). Тези доповідей. – Харків: УкрДУЗТ. 2021. С. 27-28.

9. Prokhorchenko A., Kravchenko M., Prokopov A. Improvement of railway logistics of grain cargo on the basis principles of ridesharing. *Thesis of XIII international scientific and practical conference “Globalization of scientific and educational space. Innovations of transport. Problems, experience, prospects”*. (Vlora, Albania may 21-26, 2021). Thesis. – Vlora. 2021. P. 63.

10. Кравченко М.А. Дослідження техніко-економічної ефективності формування ступеневого маршруту на залізничній мережі України. Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті: *тези стендових доповідей та виступів учасників 34-ї міжнародної науково-практичної конференції “Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті”* (Харків, Україна, 29 жовтня 2021). 2021. Вип. 3 (додаток). С. 53-54.

11. Кравченко М.А. Аналіз переваг і недоліків технології перевезень вантажів ступеневими маршрутами на залізничній мережі України. *Технічні науки в Україні: сучасні тенденції розвитку: Матеріали III Всеукраїнської науково-технічної інтернет-конференції* (м. Ізмаїл-Київ, 18-19 листопада 2021 р.). 2021. С.172-173.

12. Кравченко М.А., Прохорченко Г.О., Харченко Д.Р. Підвищення ефективності руху поїздопотоків на основі автоматизації процесу розподілу пропускної спроможності залізничної інфраструктури АТ «Укрзалізниця». *Економіко-правові та соціально-технічні напрями еволюції цифрового суспільства: матеріали міжнародної науково-практичної конференції: Секція 6. Інформаційні та транспортні технології: вектори розвитку та актуальні проблеми діджиталізації* (Дніпро, Україна, 02 червня 2022 р.). Дніпро: Університет митної справи та фінансів, 2022. Том 2. С. 563-565.

13. Дідусенко В.В., Транько Т.Г., Кравченко М.А. Удосконалення крос-кордонних перевезень вантажів в експортному сполученні. Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті: *тези стендових доповідей та виступів учасників 35-ї міжнародної науково-практичної конференції “Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті”* (Харків, 11 листопада, 2022 р.). 2022. Вип. 27/3 (додаток). С. 52.

14. Кравченко М.А. Прохорченко А.В. Удосконалення системи організації вагонопотоків у поїзди на основі моделей перевезень за принципами спільного використання. *Інтелектуальні транспортні технології : тези доповідей 3-ї міжнар. наук.-техн. конф.* (Харків, Україна, 22-23 листопада 2022 р.). Тези доповідей. – Харків: УкрДУЗТ. 2022. С. 61-63.

15. Кравченко М.А., Прохорченко А.В. Удосконалення зернової логістики на основі моделей перевезень за принципами спільного використання. *Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту: матеріали 82 Міжнародної науково-практичної конференції* (Дніпро, Україна, 20-21 квітня 2023 р.). УДУНТ. 2023. С. 385-386.

16. Dahal K., Prokhorchenko A., Koirala R., Ahmed Md. S., Parkhomenko L., Kravchenko M., Kharchenko D. Improvement of railway transportation of grain cargoes in ukraine based on the principles of shared logistics. *4th International Scientific and Technical Conference "Intelligent Transport Technologies"* (Kharkiv, November 27-28, 2023). Abstracts of reports. – Kharkiv: USURT. 2023. P.77-79.



## ЗМІСТ

ВСТУП	24
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ПЕРЕДУМОВ УДОСКОНАЛЕННЯ ПЕРЕВЕЗЕНЬ ЗЕРНОВИХ ВАНТАЖІВ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ	33
1.1. Аналіз ринку перевезень зернових вантажів на залізничному транспорті України в умовах діючої операційної моделі	33
1.2. Аналіз проблем операційної моделі та дослідження впливу технології маршрутизації перевезень вантажів за розкладом руху на макропоказники залізничної системи України	42
1.3. Аналіз передумов реалізації перевезень зернових вантажів ступеневими маршрутами за принципом спільного використання	52
1.4. Аналіз потенціалу утворення поїздів ступеневих маршрутів за принципами спільного використання на ринку залізничних перевезень зернових України	60
1.5. Аналіз теоретичних і практичних досліджень щодо удосконалення перевезень зернових вантажів в залізничних системах та моделювання райдшерингових сервісів	65
1.5. Висновки до розділу 1	72
РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА МЕТОДУ ПОБУДОВИ ШТУЧНОЇ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ВЗАЄМОЗАЛЕЖНОСТІ РУХУ ПОЇЗДОПОТОКІВ НА МЕРЕЖІ	77
2.1. Виявлення закономірностей взаємовпливу поїздопотоків на вантажонапруженому залізничному полігоні на основі макроаналізу	77
2.2. Побудова штучної нейронної мережі для моделювання тривалості руху на маршрутах перевантаженого полігону від інтенсивності руху поїздів на дільницях	82
2.3. Перевірка штучної нейронної мережі FNN поза алгоритмом навчання	91
2.4. Висновки до розділу 2	94
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА МЕТОДУ ПОШУКУ ПЛАНУ ПЕРЕВЕЗЕНЬ НА	

ОСНОВІ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ РАЙДШЕРИНГОВОГО СЕРВІСУ ЗАЛІЗНИЧНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ ЗЕРНОВИХ ВАНТАЖІВ У ВИГЛЯДІ КОАЛІЦІЙ В ІГРАХ З ПЕРЕВАНТАЖЕННЯМ	97
3.1. Метод пошуку плану перевезень та методологія дослідження процесу перевезень зернових вантажів на основі принципів райдшерингу в залізничних системах	97
3.2. Розробка математичної моделі райдшерингового сервісу утворення ступеневих маршрутів зернових вантажів у вигляді коаліцій в іграх з перевантаженням	101
3.3. Метод розв'язку математичної моделі райдшерингового сервісу залізничних перевезень зернових вантажів	112
3.4. Розробка методу оцінки відсутності координації в залізничній системі на основі проведення розрахунків ціни анархії	115
3.5. Розрахунок ціни анархії за різними сценаріями та аналіз отриманих результатів	128
3.6. Висновки до розділу 3	134
РОЗДІЛ 4 РОЗРОБКА ВИМОГ ДО ЦИФРОВОЇ ПЛАТФОРМИ АГРЕГАТОРА ДЛЯ КООРДИНАЦІЇ ВАНТАЖОВІДПРАВНИКІВ ТА ПЕРЕВІЗНИКА ЗА ПРИНЦИПАМИ РАЙДШЕРИНГУ ТА ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ	137
4.1. Обґрунтування стратегії експлуатації залізничної системи на основі координації в межах єдиного інформаційного середовища	137
4.2. Розробка вимог до цифрової платформи агрегатора для координації вантажовідправників та перевізника за принципами райдшеринга	140
4.3. Формування функцій та вимог до інтеграції цифрової платформи агрегатора з АСК ВП УЗ-Є	144
4.4. Техніко-економічне обґрунтування ефективності формування ступеневого маршруту на залізничній мережі України за принципами райдшерингу	148
4.5. Висновки до розділу 4	156

ВИСНОВКИ	159
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	165
Додаток А Програмна реалізація процедури ідентифікації потенційних утворень степеневих маршрутів на залізничній мережі України	183
Додаток Б Програмна реалізація методу побудови штучної нейронної мережі	188
Додаток В Результати моделювання за різними сценаріями поведінки в залізничній системі	205
Додаток Г Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації	219
Додаток Д Акти впровадження	224

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Прохорченко А.В., Кравченко М.А., Гурін Д.О. Дослідження впливу технології перевезень вантажів за розкладом руху на макропоказники залізничної системи України. *Збірник наукових праць ДУІТ. Серія “Транспортні системи і технології”*. 2020. Вип. 36. С. 184-198. DOI:10.32703/2617-9040-2020-36-19
2. Кравченко М.А., Стебницька Є., Прохорченко А.В., Киман А.М., Кірієнков А. Дослідження стабільності руху поїздопотоків на вантажонапружених залізничних полігонах. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. 2022. Вип. 199. С. 99-113. DOI: 10.18664/1994-7852.199.2022.258820
3. Дідусенко В. В., Кравченко М. А., Золотарьов С. А., Прохорченко Г. О. Дослідження крос-кордонних перевезень зернових вантажів автомобільним та залізничним транспортом. *Системи та технології*. 2022. Вип. 2 (64). С. 19-29. DOI: 10.32782/2521-6643-2022.2-64.3
4. Gurin D., Prokhorchenko A., Kravchenko M., Shapoval G. Development of a method for modelling delay propagation in railway networks using epidemiological SIR models. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. №6, Issue 3 (108). P. 6-13. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.219285
5. Kravchenko, M., Prokhorchenko, A., Zolotarov, S. Mathematical model of a railroad grain cargo ridesharing service in the form of coalitions in congestion games. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. 5(3(125)). P. 35–48. DOI: 10.15587/1729-4061.2023.289470 (Scopus)
6. Prokhorchenko A., Kravchenko M., Malakhova O., Sikonenko G., Prokhorchenko H. Research of the Freight Trains Movement Stability with a Network Effect. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2023. Vol. 536 LNNS, P.785 – 794. (Scopus, INSPEC, WTI Frankfurt eG, Web of Science Core Collection)
7. Кравченко М.А. Удосконалення залізничних перевезень зернових вантажів на основі принципів райдшерингу. Інформаційно-керуючі системи на

- залізничному транспорту: *тези стендових доповідей та виступів учасників 33-ї міжнародної науково-практичної конференції “Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті”* (м. Харків, Україна, 30 жовтня 2020 року). Харків:УкрДУЗТ, 2020. Вип. 3(додаток). С. 62-63.
8. Прохорченко А.В., Хорсін Т., Кравченко М.А. Дослідження можливості застосування в зерновій логістиці райдшерінгових технологій перевезень на основі цифрових платформ. *II-а міжнародна науково-технічна конференція “Інтелектуальні транспортні технології”* (м.Харків, Україна, 27-29 квітня 2021 р). Тези доповідей. – Харків: УкрДУЗТ. 2021. С. 27-28.
  9. Prokhorchenko A., Kravchenko M., Prokhorov A. Improvement of railway logistics of grain cargo on the basis principles of ridesharing. *Thesis of XIII international scientific and practical conference “Globalization of scientific and educational space. Innovations of transport. Problems, experience, prospects”*. (Vlora, Albania may 21-26, 2021). Thesis. – Vlora. 2021. P. 63.
  10. Кравченко М.А. Дослідження техніко-економічної ефективності формування ступеневого маршруту на залізничній мережі України. Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті: *тези стендових доповідей та виступів учасників 34-ї міжнародної науково-практичної конференції “Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті”* (Харків, Україна, 29 жовтня 2021). 2021. Вип. 3 (додаток). С. 53-54.
  11. Кравченко М.А. Аналіз переваг і недоліків технології перевезень вантажів ступеневими маршрутами на залізничній мережі України. *Технічні науки в Україні: сучасні тенденції розвитку: Матеріали III Всеукраїнської науково-технічної інтернет-конференції* (м. Ізмаїл-Київ, 18-19 листопада 2021 р.). 2021. С.172-173.
  12. Кравченко М.А., Прохорченко Г.О., Харченко Д.Р. Підвищення ефективності руху поїздопотоків на основі автоматизації процесу розподілу пропускнуої спроможності залізничної інфраструктури АТ «Укрзалізниця». *Економіко-правові та соціально-технічні напрями еволюції цифрового суспільства:*

- матеріали міжнародної науково-практичної конференції: Секція 6. Інформаційні та транспортні технології: вектори розвитку та актуальні проблеми діджиталізації* (Дніпро, Україна, 02 червня 2022 р.). Дніпро: Університет митної справи та фінансів, 2022. Том 2. С. 563-565.
13. Дідусенко В.В., Транько Т.Г., Кравченко М.А. Удосконалення крос-кордонних перевезень вантажів в експортному сполученні. Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті: *тези стендових доповідей та виступів учасників 35-ї міжнародної науково-практичної конференції “Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті”* (Харків, 11 листопада, 2022 р.). 2022. Вип. 27/3 (додаток). С. 52.
  14. Кравченко М.А. Прохорченко А.В. Удосконалення системи організації вагонопотоків у поїзди на основі моделей перевезень за принципами спільного використання. *Інтелектуальні транспортні технології : тези доповідей 3-ї міжнар. наук.-техн. конф.* (Харків, Україна, 22-23 листопада 2022 р.). Тези доповідей. – Харків: УкрДУЗТ. 2022. С. 61-63.
  15. Кравченко М.А, Прохорченко А.В. Удосконалення зернової логістики на основі моделей перевезень за принципами спільного використання. *Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту: матеріали 82 Міжнародної науково-практичної конференції* (Дніпро, Україна, 20-21 квітня 2023 р.). УДУНТ. 2023. С. 385-386.
  16. Dahal K., Prokhorchenko A., Koirala R., Ahmed Md. S., Parkhomenko L., Kravchenko M., Kharchenko D. Improvement of railway transportation of grain cargoes in ukraine based on the principles of shared logistics. *4th International Scientific and Technical Conference “Intelligent Transport Technologies”* (Kharkiv, November 27-28, 2023). Abstracts of reports. – Kharkiv: USURT. 2023. P.77-79
  17. Statistics. Офіційний сайт The Food and Agriculture Organization of the United Nations, (FAO): веб-сайт. URL: <https://www.fao.org/home/en/> (дата звернення: 15.06.2023)

18. Supply & Demand. Офіційний сайт International Grains Council, (IGC): веб-сайт. URL: <https://www.igc.int/en/default.aspx> (дата звернення: 16.06.2023)
19. Grain: World Markets and Trade. January 2024. Офіційний сайт United States Department of Agriculture Foreign Agricultural Service (USDA FAS): веб-сайт. URL: <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/grain.pdf> (дата звернення: 15.06.2023)
20. Експорт товарів і послуг України. Тенденції експорту/Інфографіка (експорт). Офіційний сайт Міністерство економіки України: веб-сайт. URL: <https://www.me.gov.ua/Documents/List?lang=uk-UA&id=e3c3c882-4b68-4f23-8e25-388526eb71c3&tag=TendentsiiEksportuInfografika-eksport-> (дата звернення: 16.06.2023)
21. Кириченко А. Виручка скоротилась, обсяги збільшились: яким був агроекспорт України у 2023 році. Офіційний сайт інформаційного агентства УНІАН: веб-сайт. URL: <https://www.unian.ua/economics/agro/viruchka-skorotilas-obsyagi-zbilshilis-yakim-buv-agroekспорт-ukrajini-u-2023-roci-12496224.html> (дата звернення: 2023-11-23)
22. Берестенко В. Уроки логістики під час війни. Порти України: веб-сайт. URL: <https://ports.ua/uroki-logistiki-pid-chas-vijni/> (дата звернення: 04.01.2023)
23. Урожайність зернових б'є рекорди: Мінагрополітики підвищило прогноз збору. Олена Бутурлим. Сайт УНІАН інформаційне агенство. URL: <https://www.unian.ua/economics/agro/urozhaynist-zernovih-u-2023-roci-syagnula-rekordu-12478539.html>
24. Мельник Л. Л. Зерновий комплекс України в аспекті експортних можливостей та державного регулювання. АГРОСВІТ. 2013. Вип. 4. С. 13-19.
25. Crop Explorer - Commodity Intelligence Reports. Ukraine, Moldova and Belarus. *Офіційний сайт Міністерств сільського господарства США (USDA)*. URL: [https://ipad.fas.usda.gov/cropeexplorer/pecad\\_stories.aspx?regionid=umb&ftype=topstories](https://ipad.fas.usda.gov/cropeexplorer/pecad_stories.aspx?regionid=umb&ftype=topstories) (дата звернення: 12.05.2023)

26. Асоціація виробників, переробників та експортерів зерна. УЗА. Офіційний сайт Ukrainian Grain Association: веб-сайт. URL: <https://uga.ua/> (дата звернення: 10.12.2023).
27. Збірник тарифів на перевезення вантажів у межах України та пов'язані з ними послуги. АТ “Укрзалізниця”: веб-сайт. URL: [https://www.uz.gov.ua/cargo\\_transportation/tariff\\_conditions/transportation\\_in\\_ukraine/collection\\_rates/](https://www.uz.gov.ua/cargo_transportation/tariff_conditions/transportation_in_ukraine/collection_rates/) (дата звернення: 02.11.2023).
28. Жарикова А. Кернел, Louis Dreyfus Company та Cargill стали лідерами експорту зерна у 2022-2023 МР. *Економічна правда*: веб-сайт. URL: <https://www.epravda.com.ua/news/2023/10/30/706004/> (дата звернення 03.12.2023)
29. Рейтинг основних експортерів зерна з України за підсумками 2022/23 МР. Graintrade: веб-сайт URL: <https://graintrade.com.ua/novosti/rejting-osnovnih-eksporteriv-zerna-z-ukraini-za-pidsumkami-202223-mr.html> (дата звернення: 2023-09-30)
30. Вантажопотоки портів України. Основні тренди. Центр транспортних стратегій. URL: <https://cfts.org.ua/imglib/111/dcafb0c8acb9fe2caa5c82e6cb51b719.png> (дата звернення: 20.04.2023)
31. Седіков Д. В. Логістика зерна: інфраструктурний компонент та проблеми розвитку. Міжнародні економічні відносини та світове господарство. 2018. Вип. 22(3). С. 47-50.
32. Перевезення врожаю зернових та зернобобових у 2021/2022 маркетинговому році (за липень-грудень 2021 року). *Ukraine Rail Monitoring*. URL: <https://urm.media/perevezennya-vrozhayu-zernovih-ta-zernobobovih-u-2021-2022-marketingovomu-roczii-za-lipen-gruden-2021-roku/> (дата звернення 25.04.2023)
33. Документація. Офіційний сайт Адміністрації морських портів України (АМПУ). URL: <https://www.uspa.gov.ua/news> (дата звернення: 20.03.2023)



34. Рейтинг-аналіз діяльності вантажних станцій АТ «Укрзалізниця». *АТ Укрзалізниця*: веб-сайт. URL: [https://uz.gov.ua/cargo\\_transportation/general\\_information/rating/535570/](https://uz.gov.ua/cargo_transportation/general_information/rating/535570/) (дата звернення: 2023-09-20)
35. O’Kelly, M.E.; Bryan, D.L. Hub location with flow economies of scale. *Transport. Res. Part B Methodol.* 1998, 32, 605–616.
36. European Commission: Study on Single Wagonload Traffic in Europe – challenges, prospects and policy options. Final report. 2015. URL: <https://transport.ec.europa.eu/system/files/2017-02/2015-07-swl-final-report.pdf> (дата звернення: 11.04.2023)
37. Порядок направлення вагонопотоків і організації їх у вантажні поїзди на 2021 – 2022 роки (план формування поїздів). *Офіційний сайт АТ Укрзалізниця*. URL: [https://www.uz.gov.ua/cargo\\_transportation/general\\_information/formuvannia/](https://www.uz.gov.ua/cargo_transportation/general_information/formuvannia/) (дата звернення: 11.04.2023)
38. Аукціони Укрзалізниці на зерновози: у чому вигода для відправників вантажів? *Служба новин: Елеваторист*: веб-сайт. URL: <https://elevatorist.com/blog/read/750-auksionyi-ukrzaliznyitsi-na-zernovozyi-v-chem-vyigoda-dlya-gruzootpraviteley> (дата звернення: 11.04.2023)
39. Рекомендації АМКУ від 28 травня 2020 р. № 26-рк Про запобігання порушенням законодавства про захист економічної конкуренції: рекомендації. URL: <https://amcu.gov.ua/nras/pro-zapobigannya-porushennyam-zakonodavstva-pro-zahist-ekonomichnoyi-konkurenciyi-3> (дата звернення: 10.06.2023)
40. Угода про асоціацію між Україною, з однієї сторони, та Європейським Союзом, Європейським Співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами, з іншої сторони: ратифіковано законом від 16.09.2014 № 1678-VII. URL: [https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984\\_011#Text](https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_011#Text) (дата звернення: 16.10.2023).

41. Удосконалення залізничних перевезень зернових вантажів на основі принципів райдшерингу : звіт про НДР (заключний) / УкрДУЗТ; кер. А. В. Прохорченко. – Харків, 2023. – 48 с. — № ДР 0123U102088.
42. Боровой Н.Е. Маршрутизация перевозок грузов. Транспорт. 1978. 216 с.
43. Інструктивні вказівки з організації вагонопотоків на залізницях України ЦД-0053. Київ: ДАЗТ, 2005. 99 с.
44. Управління експлуатаційною роботою і якістю перевезень на залізничному транспорті: навч. посіб. / М.І.Данько, Т.В.Буцько, О.В.Березань [та ін.]; за ред. М.І. Данька, Х.: УкрДАЗТ, 2008. 174 с.
45. Правила перевезення вантажів (Наказ Міністерства транспорту України від 21 листопада 2000 року N 644, зареєстровано в Міністерстві юстиції України 24 листопада 2000 р. за N 861/5082). АТ “Укрзалізниця”: веб-сайт. URL: [https://uz.gov.ua/cargo\\_transportation/legal\\_documents/terms\\_of\\_freight/](https://uz.gov.ua/cargo_transportation/legal_documents/terms_of_freight/) (дата звернення 10.09.2023)
46. Правила перевозок грузов МПС СССР, изд-во “Транспорт”. 1964.
47. Правил перевозок грузов железнодорожным транспортом. Приказ Министра индустрии и инфраструктурного развития Республики Казахстан от 2 августа 2019 года № 612. Зарегистрирован в Министерстве юстиции Республики Казахстан 2 августа 2019 года № 19188. Информационно-правовая система нормативных правовых актов Республики Казахстан: веб-сайт. URL: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/V1900019188> (дата звернення 02.09.2023)
48. Małecka, A., Mitreğa, M. Factors Affecting Participation in “Ride Sharing” (Shared Travels) the Research of “BlaBlaCar” Users. Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Szczecińskiego. 2015. Vol. 12. P.153-164.
49. Kathan, W., Matzler, K., Veider, V. The sharing economy: Your business model’s friend or foe?, in: Business Horizons/ Kelley School of Business, Indiana University. 2016.Vol. 59/ 6. P. 663 – 672.

50. Nelson D. C., Susan A. S. Ridesharing in North America: Past, Present, and Future, *Transport Reviews*. 2012. Vol. 32:1. P. 93-112. DOI: 10.1080/01441647.2011.621557
51. Handke V., Jonuschat H. Flexible ridesharing: New opportunities and service concepts for sustainable mobility. Springer, Berlin / New York. 2013.
52. Success Story of Frédéric Mazzella, BlaBlaCar. EYIF: веб-сайт. URL: <https://web.archive.org/web/20140808044333/http://younginnovator.eu/success-story-blablacar/> (дата звернення 04.10.2023)
53. Carpooling. Procedure for online carpooling services: веб-сайт. URL: <https://de.zxc.wiki/wiki/Mitfahrgelegenheit> (дата звернення 04.10.2023)
54. Penzenstadler B. Car Sharing System: Sustainability Design / URL: <https://www.sustainabilitydesign.org/2015/08/28/car-sharing-system/>. (дата звернення 08.05.2021).
55. Siqueira, J. L. S., Valdevino, A. M., Pellizzoni, L. N. Moraes, T. A. UBER: De carona no consumo colaborativo. *Consumer Behavior Review*. 2019. Vol. 3(1). P. 18-26. URL: [https://www.researchgate.net/publication/337442996\\_UBER\\_DE\\_CARONA\\_NO\\_CONSUMO\\_COLABORATIVO](https://www.researchgate.net/publication/337442996_UBER_DE_CARONA_NO_CONSUMO_COLABORATIVO) [accessed May 01 2021].
56. У Києві запускають сервіс Uber Shuttle. Укрінформ: веб-сайт. URL: <https://www.ukrinform.ua/rubric-kyiv/2697247-u-kievi-vperse-v-ukraini-zaprache-servis-uber-shuttle.html> (дата звернення 10.09.23)
57. Drive your business with access to reliable rides. Lyft: веб-сайт. URL: <https://www.lyft.com/> (дата звернення 10.09.23)
58. Postmates delivery service app launches in Boston, Cambridge. URL: <http://www.metro.us/local/postmates-delivery-service-app-launching-in-boston-cambridge/tmWnga---e0wmr3eaJBA/> (дата звернення 01.05.2021).
59. Sharing economy logistics. Rethinking logistics with access over ownership. DHL Trend Research. 2017. URL:

- <https://www.dhl.com/discover/content/dam/dhl/downloads/interim/preview/updates/dhl-trend-report-sharing-economy-preview.pdf> (дата звернення: 10.05.2023)
60. Enables real-time management of less-than-load shipments and excess capacity brokerage. URL: <https://www.saloodo.com/en/> (дата звернення 01.05.2022).
61. Conner-Simons A. How ride-sharing can improve traffic, save money, and help the environment Study shows carpooling apps could reduce congestion by a factor of three while still serving the same number of people. MIT News: веб-сайт. URL: <https://news.mit.edu/2016/how-ride-sharing-can-improve-traffic-save-money-and-help-environment-0104> (дата звернення 10.08.2023)
62. Комплексна оптимізація залізничних вантажних перевезень в Україні: залізничні шпали, рухомий склад та логістика: звіт про НДР (заключний) /УкрДУЗТ&UWS; кер. В. В. Панченко. – Харків, 2024. № ДР 0123U102700 (ДР № 0123U102700)
63. Higa, A. P. H., Neto, J. G. M., Trajano, R. G., De Castro, H. K. Grain Flow Through the Northern Arch of Brazil. Lecture Notes in Civil Engineering, LNCE. 2023. Vol. 264. P.1379-1387 10th PIANC Smart Rivers Conference, Smart Rivers 2022 Nanjing 18-21 October 2022 Code 291049. DOI: 10.1007/978-981-19-6138-0\_122
64. Anoop, K.P., Panicker, V. V., Das, A. S., Abhishek, T., Vadlamani, P. S., Akhil, U. S. Simulation modelling and analysis of warehouse operations in a food grain supply chain. International Journal of Logistics Systems and Management. 2020. Vol. 37(4). P. 465 – 487. DOI: 10.1504/IJLSM.2020.111853
65. McFallan, S.L., Higgins, A.J., McKeown, A., Bruce, C., Marinoni, O., Chilcott, C. Transit: Application to Australian agriculture. Proceedings - 22nd International Congress on Modelling and Simulation, MODSIM 2017. 2017. P. 1330 – 1336.
66. Ndembe, E., Vachal, K. An Exploratory Comparative Analysis of Northern Plains Grain Shippers' Perspective on Whether Operational Performance Translates into Service Quality in Freight Rail Transportation. Transportation Research Record. 2023. 0(0). DOI: 10.1177/03611981231182141

67. Hyland M. F., Mahmassani H. S., Mjahed L. B. Analytical Models of Rail Transportation Service in the Grain Supply Chain: Deconstructing the Operational and Economic Advantages of Shuttle Train Service. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2016. Vol. 93. P. 294-315.
68. Талер Річард Поведінкова економіка. Як емоції впливають на економічні рішення. 2018.
69. Markovits-Somogyi R., Aczél B. Implications of Behavioural Economics for the Transport Sector. *Transportation Engineering*. 2013. Vol. 41/1. P. 65–69. DOI: 10.3311/PPtr. 7101
70. Grey E. The nudge: how to influence railway passenger behaviour. *Railway Tehnology*: веб-сайт. URL: <https://www.railway-technology.com/features/featurethe-nudge-how-to-influence-railway-passenger-behaviour-4840477/> (дата звернення 01.02.2023).
71. Garcia-Sierra M., van den Bergh J. C.J.M, Miralles-Guasch C. Behavioural economics, travel behaviour and environmental-transport policy. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2015. Vol. 41. P. 288-305. DOI: 10.1016/j.trd.2015.09.023
72. Sehitoglu T., Mussanov D., Tyler Dick C. Operational Schedule Flexibility, Train Velocity and the Performance Reliability of Single-Track Railways. TRB 18-03149 - Transportation Research Board 97th Annual Meeting. Submitted for compendium of papers. November 15th, 2017
73. Dick C. T., Darkhan M. Transitioning from flexible to structured heavy haul operations to expand the capacity of single-track shared corridors in North America. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F Journal of Rail and Rapid Transit*. 233(6). 2019. P. 629-639. doi:10.1177/0954409718804427.
74. Ireland P., Case R., Fallis J., Dyke C., Kuehn J., Meketon M. The Canadian Pacific Railway Transforms Operations by Using Models to Develop Its Operating Plans. *Canadian Pacific Railway Interfaces*. 2004. Vol.34(1). P. 5–14.

75. Dick Tyler C. Network Efficiency Cycle: Quantifying Yard and Mainline Railway Capacity and Performance Connections. INFORMS Railway Applications Section (RAS) International Webinar Speaker Series. URL: <https://railtec.illinois.edu/2020/10/21/informs-ras-international-webinar-speaker/> (дата звернення 09.10.2023)
76. Dirnberger J. R., Barkan Christopher P. L. Lean Railroading for Improving Railroad Classification Terminal Performance. Bottleneck Management Methods. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1995, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2007. P. 52–61. DOI: 10.3141/1995-07
77. Matsiuk V., Myronenko V., Horoshko V., Prokhorchenko A., Hrushevska T., Shcherbyna R., Matsiuk N., Khokhlacheva J., Biziuk I., Tymchenko N.. Improvement of efficiency in the organization of transfer trains at developed railway nodes by implementing a "flexible model". Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2019. V 2, №3(98). P. 32-39. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.162143
78. Lin B., Li X., Zhang Z., Zhao Y. Optimizing Transport Scheme of High Value-Added Shipments in Regions without Express Train Service. Sustainability. 2019. Vol.11. P. 6108; doi:10.3390/su11216108
79. Bruckmann, D., Dober, P., Mancera, A. et al. Swiss Split—a holistic approach to the distribution of containers to private sidings. Eur. Transp. Res. Rev. 2016. Vol. 8(28). <https://doi.org/10.1007/s12544-016-0214-8>
80. Becker Von K. G. Harter Brocken für Frühbucher. DVZ ist eine Marke der DVV Media Group GmbH: веб-сайт. URL: <https://www.dvz.de/unternehmen/schiene/detail/news/harter-brocken-fuer-fruehbucher.html> (дата звернення 24.10.2023)
81. Козаченко Д. М. Проблеми стимулювання відправницької маршрутизації на залізничному транспорті. Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. 2013. Вип.3(192). С. 207-211.

82. Kozachenko, D., Vernigora R., Kuznetsov V., Rustamov R., Papahov A., Logvinova N. Resource-saving technologies of railway transportation of grain freights for export. *Archives of Transport*. 2018. Vol. 45, Issue 1. P. 53-64. DOI: 10.5604/01.3001.0012.0944
83. Миронович А., Ейтутіс Г., Крищенко Г. Маршрутизація перевезень як фактор підвищення інвестиційної привабливості АТ «Укрзалізниця». *Збірник наукових праць ДУІТ. Серія «Економіка і управління»*. 2020. Вип. 48. С. 31-37.
84. Верлан А. І., Казаченко Д. М. Підвищення ефективності управління приватним вагонним парком за рахунок відправницької маршрутизації порожніх вагонопотоків. *Залізничний транспорт України*. 2012. Вип. 6. С. 35-37.
85. Вернигора Р. В., Огороков А. М., Цупров П. С., Рустамов Р. Ш. Перспективи експортних перевезень зернових вантажів у контейнерах. *Збірник наукових праць ДНУЗТ ім. акад. В. Лазаряна*. 2018. Вип. 16. С. 22-30. DOI: <https://doi.org/10.15802/tstt2018/164056>
86. Заруба О. В., Огороков А. М. Дослідження транспортного забезпечення металургійної промисловості залізничними технологічними маршрутами. *Транспортні системи та технології*. 2023. Вип. 26. С. 30-36. DOI: 10.15802/tstt2023/293343
87. Чернова О. О., Вернигора Р. В., Огороков А. М., Киман А.М. Аналіз техніко-технологічних параметрів припортових залізничних станцій України. *Збірник наукових праць ДНУЗТ ім. акад. В. Лазаряна*. 2021. Вип. 22. С.36-47. DOI: 10.15802/tstt2021/247882
88. Ткачов В. А. Логістична концепція управління потенціалом підприємств зернового ринку. *Бізнес-навігатор*. 2021. №4(65) С. 96-101. DOI: <https://doi.org/10.32847/business-navigator.65-16>
89. Arefiev S., Lagodiienko V., Tkachev V., Stavroian S., Shevchenko O. Marketing and logistics in the adaptive management of enterprises in the conditions of digitalization. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*. 2023.

- Vol.101. no. 8. P. 3121-3132. URL:  
<https://www.jatit.org/volumes/Vol101No8/26Vol101No8.pd>
90. Strelko, O., Solovyova, O., Berdnychenko, Y., Kyrychenko, H., Solovyova, L. Study of the contemporary trends in the development of transport systems of the Ukrainian railways. *Acta Scientiarum Polonorum, Administratio Locorum*. 2023. Vol. 22(2). P. 263-279.
91. Kyrychenko, H., Strelko, O., Berdnychenko, Yu., Hrushevskaya, T., Antonyv, O., Bernatskyi, A. Development of Interaction Functions of Transport Systems in Serving Railway Customers. *Transport Means - Proceedings of the International Conference*. 2023. Vol. 1. P. 422-427.
92. Semenenko, O., Tolok, P., Onofriichuk, A., Onofriichuk, V., Chernyshova, I. Improving Ukrainian grain export supply chains: an inclusive approach. *International Journal of Environmental Studies*. 2023. Vol. 80(2). P. 314 – 323. DOI: 10.1080/00207233.2023.2177426
93. Lomotko D., Arsenenko D., Kovalova O., Ischuka O., Methods of infrastructure management for optimization of grain transport organization. *Procedia Computer Science*. 2019. Vol. 149. P. 500-507. doi : <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.01.168>
94. Арсененко Д.В. Удосконалення логістичного управління транспортуванням зернових вантажів залізничним транспортом: дис. ... канд. техн. наук : 05.22.1. Харків, 2020. 145 с.
95. Yao R., Bekhor S. A ridesharing simulation model that considers dynamic supply-demand interactions. *Journal of Intelligent Transportation Systems*. 2024. P. 31-53. DOI: 10.1080/15472450.2022.2098730
96. Pouls, M., Ahuja, N., Glock, K. et al. Adaptive forecast-driven repositioning for dynamic ride-sharing. *Ann Oper Res*. 2022. DOI: 10.1007/s10479-022-04560-3.
97. Zhang H., Zhao, J. Mobility Sharing as a Preference Matching Problem. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2019. Vol. 20(7). P. 2584-2592. DOI: 10.1109/TITS.2018.2868366.



98. Altshuler T., Altshuler Y., Katoshevski R., Shiftan Y. Modeling and Prediction of Ride-Sharing Utilization Dynamics. *Journal of Advanced Transportation*. 2019. Vol. 6125798, 18 p. <https://doi.org/10.1155/2019/6125798>
99. Campbell, I., Ali, M. M., & Fienberg, M. L. (2016). Solving the dial-a-ride problem using agent-based simulation. *South African Journal of Industrial Engineering*, 27(3). <https://doi.org/10.7166/27-3-1649>
100. Tellez O., Vercraene S., Lehuédé V. F., Péton O., Monteiro T. (6 April, 2018). Dial-a-ride problem for disabled people using vehicles with reconfigurable capacity. Technical Report TR-Disp-001.
101. Cordeau, J.-F., & Laporte, G. (2007). The dial-a-ride problem: models and algorithms. *Annals of Operations Research*, 153(1), 29–46. DOI:10.1007/s10479-007-0170-8
102. Ma, Tai-yu & Rasulkhani, Saeid & Chow, Joseph & Klein, Sylvain. (2019). A dynamic ridesharing dispatch and idle vehicle repositioning strategy with integrated transit transfers. *Transportation Research Part E Logistics and Transportation Review*. 128. 417-442. 10.1016/j.tre.2019.07.002.
103. Mahmoudi, M., Chen, J., Shi, T., Zhang, Y., & Zhou, X. (2019). A cumulative service state representation for the pickup and delivery problem with transfers. *Transportation Research Part B: Methodological*, 129, 351–380. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2019.09.015>
104. Ghilas, V., Demir, E., & Van Woensel, T. (2016). The pickup and delivery problem with time windows and scheduled lines. *INFOR: Information Systems and Operational Research*, 54(2), 147–167. <https://doi.org/10.1080/03155986.2016.1166793>
105. Zheng, H.; Zhang, X.; Chen, J. Study on Customized Shuttle Transit Mode Responding to Spatiotemporal Inhomogeneous Demand in Super-Peak. *Information* 2021, 12, 429. <https://doi.org/10.3390/info12100429>

106. Bistaffa F., Farinelli A., Chalkiadakis G., Ramchurn D. S. A cooperative game-theoretic approach to the social ridesharing problem. *Artificial Intelligence*. 2017. Vol. 246. P. 86-117. <https://doi.org/10.1016/j.artint.2017.02.004>
107. Pandey V., Monteil J., Gambella C., Simonetto A. On the needs for MaaS platforms to handle competition in ridesharing mobility. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2019. Vol.108. P. 269-288. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.09.021>.
108. Cooperative game theory approaches to manage traffic congestion in wireless network. (2021). *Bulletin of Pure & Applied Sciences-Mathematics and Statistics*, 40(1), 1–13. <https://doi.org/10.48165/>
109. Hayrapetyanm, A. Tardos, E., Wexler, T. (May 2006). The effect of collusion in congestion games. *Proceedings of the thirty-eighth annual ACM symposium on Theory of Computing*. 89-98.
110. Shams, F., & Luise, M. (2013). Basics of coalitional games with applications to communications and networking. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2013(1). <https://doi.org/10.1186/1687-1499-2013-201>
111. Landi A., Piaggi P., Laurino M., Menicucci D. Artificial Neural Networks for nonlinear regression and classification. *10th International Conference on Intelligent Systems Design and Applications*. IEEE. 2010. P. 115-120. DOI:10.1109/ISDA.2010.5687280
112. Landex, A. Network Effects In Railways. *WIT Transactions on The Built Environment*. 2012. Vol. 127. P. 391-401. DOI: 10.2495/CR120331
113. Garber N., Hoel L. Fundamental principles of traffic flow. *Traffic and Highway Engineering*, Cengage Learning, Stamford, CT. 2015. Chapter 6.
114. Gallagher R.H.: *A Correlation Study of Methods of Matrix Structural Analysis* Hardcover – January 1 (1964)
115. Eisen, M.B, Spellman, P.T, Brown, P.O, Botstein D.: Cluster analysis and display of genome-wide expression patterns. *Proc Natl Acad Sci USA*. 95:14863–14868 (1998).

116. Richard A. Johnson, Gouri K. Bhattacharyya. *Statistics: Principles and Methods*, 8th Edition. 2019. 576 p. ISBN: 978-1-119-49711-0.
117. Gdeisat, M., Lilley F.: *MATLAB® by Example. Programming Basics* Elsevier Inc. (2013). <https://doi.org/10.1016/C2012-0-03351-0>. 1021(1),012009
118. Chaddock, R. E. *Principles and Methods of Statistics*. Hardcover. January 1, 471 p. (1925)
119. Hong W.-K. *Artificial Intelligence-Based Design of Reinforced Concrete Structures. Artificial Neural Networks for Engineering Applications*. Woodhead Publishing, 20223. ISBN 978-0-443-15252-8
120. Maiorov, V., Pinkus, A. Lower bounds for approximation by MLP neural networks. *Neurocomputing*. 1999. Vol. 25(1–3). P. 81–91. DOI:10.1016/S0925-2312(98)00111-8.
121. Kurt H., Maxwell S., Halbert W. Multilayer Feedforward Networks are Universal Approximators. *Neural Networks*. 1989. Vol. 2. P. 359–366.
122. Ciaburro G. *MATLAB for Machine Learning: Practical examples of regression, clustering and neural networks*. Packt Publishing. 2017. 382 p. ISBN: 978-1788398435
123. Levenberg, K., A Method for the Solution of Certain Problems in Least Squares. *Quart. Appl. Math.* 1944. Vol. 2. P. 164–168.
124. Marquardt, D., An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters. *SIAM J. Appl. Math.* 1963. Vol. 11. P. 431–441.
125. Hao Y., Pan S., Qiao Y., Cheng D. Cooperative Control via Congestion Game Approach. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2018. Vol. 63/12. P. 4361–4366.
126. 27. Mihai Manea. 14.126 Game Theory. Spring 2016. Massachusetts Institute of Technology: MIT OpenCourseWare, <https://ocw.mit.edu>
127. 28. Rosenthal R. W. A class of games possessing pure-strategy Nash equilibria, *Int. Journal of Game Theory* 2 (1973), 65-67.

- 128.29. R. Gopalakrishnan, J. R. Marden and A. Wierman, "Potential games are necessary to ensure pure Nash equilibria in cost sharing games", *Math. Oper. Res.*, vol. 39, no. 4, pp. 1252-1296, Feb. 2014.
- 129.30. Monderer, Dov; Shapley, Lloyd S. (1996-05-01). "Potential Games". *Games and Economic Behavior*. 14 (1): 124–143. doi:10.1006/game.1996.0044. ISSN 0899-8256.
- 130.32. Wright A. "Genetic algorithms for real parameter optimization"// *Foundations of Genetic Algorithms*, V. 1. – 1991. – P. 205-218. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-050684-5.50016-1>
- 131.33. Kerner, Boris (1999). "Congested Traffic Flow: Observations and Theory". *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 1678: 160–167. doi:10.3141/1678-20.
- 132.34. Sahinidis, N.V. Mixed-integer nonlinear programming. *Optim Eng* 20, 301–306 (2019). <https://doi.org/10.1007/s11081-019-09438-1>
- 133.35. Deep, Kusum, Krishna Pratap Singh, M.L. Kansal, and C. Mohan. A real coded genetic algorithm for solving integer and mixed integer optimization problems. *Applied Mathematics and Computation*, 212(2), pp. 505–518, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2009.02.044>
134. Zhang, J., Pourazarm, S., Cassandras, C.G., Paschalidis, I.C. The Price of Anarchy in Transportation Networks: Data-Driven Evaluation and Reduction Strategies. *Proceedings of the IEEE*. 2016. Vol.106. P. 538-553. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1606.02194>
135. Довідник основних показників роботи регіональних філій АТ “Українська залізниця” (2005-2020 роки). Управління статистики АТ “Укрзалізниця”. Київ – 2021. 41 с.
136. В Центрі досліджень залізничного транспорту пояснили причини переорієнтації перевезень зерна від Укрзалізниці. Новини UkrAgroConsult: веб-сайт. URL: <https://ukragroconsult.com/news/v-czentri-doslidzhen->

- zaliznychnogo-transportu-poyasnyly-prychyny-pereoriyentacziyi-perevezen-zerna-vid-ukrzaliznyuzi/ (дата звернення: 08.05.2023).
137. Elevatorist (2021) The cost of renting grain wagons at the auction reached 6 thousand hryvnias per day. URL: <https://elevatorist.com/novosti/13729-stoimost-arendyi-vagonov-zernovozov-na-auktsione-dostigla-6-tyisyach-griven-za-sutki> (дата звернення: 08.05.2023).
138. Барановська Л. В. Теорія ігор: курс лекцій. Навчальний посібник. КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 245 с.
139. Вантажні перевезення. Загальна інформація. Центр транспортної логістики: веб-сайт. URL: <https://uz-cargo.uz.gov.ua/vantazhni-perevezennia/zahalna-informatsiia> (дата звернення 09.10.2023)
140. Uber's Highly Scalable and Distributed Shuffle as a Service. Uber Blog: веб-сайт. URL: <https://www.uber.com/en-UA/blog/ubers-highly-scalable-and-distributed-shuffle-as-a-service/> (дата звернення 07.06.2022)
141. Designing A Realtime Ridesharing System. Medium: веб-сайт. URL: <https://medium.com/@syedwshah.nyc/designing-a-realtime-ridesharing-system-24729abcb129> (дата звернення 13.09.23)
142. How to create a Rideshare App and How Much It Costs. Cleveroad: веб-сайт. URL: <https://www.cleveroad.com/blog/how-to-make-a-rideshare-app/> (дата звернення 13.09.23)
143. Укрзалізниця запустить систему розподілу вантажних вагонів. УНІАН інформаційне агенство: веб-сайт. URL: <https://www.unian.ua/economics/transport/2132804-ukrzaliznitsya-zapustit-sistemu-rozpodilu-vantajnih-vagoniv.html> (дата звернення 13.09.23)
144. Балака Є.І., Зоріна О.І., Колесникова Н.М., Писаревський І.М. Оцінка економічної доцільності інвестицій в інноваційні проекти на транспорті: Навч. посібник. – Харків: УкрДАЗТ, 2005. 210 с.