

Мінімізація транспортних ризиків у логістиці за рахунок вибору маршруту доставки вантажу з мінімальною прогнозованою кількістю дорожньо-транспортних пригод

М. А. Окландер, О. І. Яшкіна, Д. С. Яшкін

Запропоновано науково-методичний підхід вибору маршруту з мінімальною прогнозованою кількістю ДТП серед декількох можливих маршрутів, які пов'язують пункти відправлення та призначення, який ґрунтується на трьох кроках: на першому кроці будується орієнтований граф, який включає пункти відправлення, доставки та проміжні пункти, які поєднані ребрами з вказаними відстанями між пунктами; на другому кроці для кожного ребра розраховується прогнозована кількість ДТП, як добуток відстані, яку має проїхати вантажівка дорогою певного регіону на показник ДТП, який розраховано для даного регіону; на третьому кроці визначається маршрут з мінімальною прогнозованою кількістю ДТП.

Особа, яка приймає рішення, може керуватися двома стратегіями: перша стратегія – вибір найкоротшого шляху доставки – при цьому мінімізуються витрати на доставку; друга стратегія – вибір маршруту з мінімальною прогнозованою кількістю ДТП – при цьому мінімізуються показники аварійності. В дослідженні сформульовано задачу багатофакторної оптимізації за відстанню та за прогнозованою кількістю ДТП й запропоновано її Парето-оптимальний розв'язок.

Запропонований метод може бути корисним в діяльності транспортних та логістичних підприємств при обґрунтуванні найбільш безпечних маршрутів з доставки вантажів з урахування важливості мінімізації витрат на доставку.

В програмне забезпечення інтерактивних карт та навігаційних систем входять широко відомі методи визначення найкоротшої відстані, маршруту з найменшим часом, або маршруту з уникненням «заторів». Пропонується розглянути питання щодо додавання алгоритму, який розроблено за запропонованим методом вибору маршруту з мінімальною прогнозованою кількістю ДТП, як одної з альтернатив вибору оптимального маршруту

Ключові слова: прогнозована кількість ДТП; вибір маршруту, доставка вантажів, Парето-оптимальність маршруту, регіональна кластеризація

1. Вступ

Логістична діяльність підприємств пов'язана, в тому числі, з транспортуванням готової продукції або складових для її вироблення від постачальника до виробника. При транспортуванні певного вантажу можуть виникнути події, які можуть привести до ймовірних втрат та ідентифікуються як ризик. Серед багатьох подій, які ідентифікують як ризик при транспортуванні вантажу, окремо виділяють дорожньо-транспортні пригоди.

Після ідентифікації ризику як події, слід його оцінити. Оцінювання ризику, зазвичай, може бути якісним або кількісним. Якісні оцінки містять характеристику ймовірності настання події за шкалою: висока, середня або низька. Або аналогічну характеристику втрат. Кількісні оцінки ризику містять розраховану ймовірність настання події та/або розрахований розмір можливих збитків від її настання. У випадку оцінки ймовірності настання дорожньо-транспортної події необхідна статистична звітність щодо трафіку в певному регіоні та кількості ДТП. У разі відсутності даних про трафік, оцінити ймовірність ДТП за статистичною звітністю не представляється можливим. Оцінити завчасно можливі збитки від ДТП також доволі складно. Тому доречно оцінювати транспортні ризики, які пов'язані з ДТП, за прогнозованою кількістю ДТП. В цьому випадку можливо запобігати потраплянню в ДТП за допомогою вибору більш безпечного маршруту, який характеризується меншою прогнозованою кількістю ДТП. Щодо оцінки ризику ДТП, то за прогнозованою кількістю ДТП можна дати якісне порівняння декількох маршрутів. На маршрутах, де прогнозована кількість ДТП менша, ймовірність потрапити в ДТП відповідно менша. Тобто, цей маршрут має менший ризик ДТП.

Безпека руху дорогами країни є одним з головних факторів, які характеризують її розвиток, якість життя населення та її глобальну конкурентоздатність. Сучасні транспортно-експедиторські та логістичні підприємства конкурують не лише за вартістю наданих послуг, а й за їх надійністю. Тобто питання безпечної доставки вантажів не є другорядним, а у випадку збільшення цінності вантажів виступає головним фактором вибору перевізника.

У підприємства-автоперевізника, як правило, є декілька альтернатив щодо вибору маршруту доставки вантажу від постачальника до замовника. Сучасні підходи вибору з декількох альтернативних маршрутів ґрунтуються на виборі маршруту з найкоротшою відстанню, що не гарантує безпечної доставки вантажу. Найкоротший маршрут може виявитися найбільш аварійним. В цьому випадку підприємство-автоперевізнак заощадить витрати на паливо, але поставить під загрозу життя людей та збільшить ймовірність пошкодження вантажу, який перевозиться.

Безпека автомобільних перевезень залежить від багатьох факторів: якості дорожнього полотна, дотримання водіями правил дорожнього руху, трафіку транспорту, втомленості водія, справності автотранспорту та інше. Вплив цих факторів на безпеку руху на певному маршруті можна оцінити за статистичною інформацією дорожньо-транспортних подій. Ця інформація може бути використана для формування карт, де позначаються певні територіальні одиниці з високим рівнем ДТП. Такі карти можуть бути корисними для уникнення аварій.

Статистична інформація щодо довжини доріг в певному регіоні та кількості ДТП дозволяє за певним алгоритмом розрахувати показники ДТП на один км в кожному з регіонів країни, або скористатися поділом територіальних одиниць країни на кластери з високим та низьким показником ДТП. Підприємству-перевізнику за таких даних можна формувати маршрут з мінімальною прогнозованою кількістю ДТП, який може бути дещо довшим за відстанню, але більш безпечним для збереження вантажу.

Актуальність досліджень полягає у необхідності визначення найбільш безпечних маршрутів доставки вантажів автомобільним транспортом, а також в формалізації процесу визначення найбільш безпечних маршрутів доставки вантажів для можливості автоматизації зазначеного процесу. Карти, з позначеними зонами ризику потрапляння в ДТП, в майбутньому можуть бути не менш корисними, ніж сучасні навігаційні системи, які допомагають визначити найкоротший шлях. Програмне забезпечення, яке буде ґрунтуватися на інформації про зони з високим та низьким ризиком ДТП, мають допомогти водієві вибрати найбільш безпечний маршрут.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Логістика, згідно з визначенням [1], – це управління матеріальним потоком для здійснення виробничих функцій. Матеріальний потік є інтеграцією трьох логістичних функцій (функціональних сфер): постачання, підтримки виробництва, фізичного розподілу. Транспортування певного вантажу (сировини, складових або готової продукції) забезпечує функції постачання та фізичного розподілу.

Система управління ризиками на підприємстві в узагальненому вигляді включає три складових [2]: ідентифікацію ризику (виявлення та розпізнавання); оцінювання ризику (оцінка ймовірності настання небезпеки, прогнозування ймовірного рівня втрат за вартістю або в натуральному вимірі) та оптимізації (розроблення організаційно-технічних заходів для запобігання ризику з метою регулювання та мінімізації збитків). Оскільки ця робота носила концептуальний характер, то транспортні ризики в ній не було розглянуто.

Першочергово розглянемо роботи з проблематики ідентифікації транспортних ризиків в логістиці. В роботі [3] логістичні ризики розглядаються як неочікувана, небажана подія або причина цієї події, що зумовлює відсутність потрібного товару чи сировини в необхідний момент часу, потрібної якості, в потрібному місці, за запланованою ціною. В управлінні складною логістичною системою ДТП розглядаються як одна із складових системи логістичних ризиків. Але автори зосереджують увагу на етапах обробки ризиків та їх запобігання, тому отримання прогнозів щодо виникнення ДТП при переміщенні вантажів залишилося поза увагою. Транспортні ризики є складовою логістичних ризиків й на думку авторів роботи [4] виникають в результаті неспроможності забезпечити необхідне якісне перевезення вантажу (товару чи сировини) та здійснити операції, що не входять до процесу перевезення, але пов'язані з ним. Робота є концептуальною, тому автори не конкретизують види транспортних ризиків та підходи щодо їх визначення, що, на наш погляд, зменшує її цінність для практичного застосування в управлінні логістичними ризиками. Автор роботи [5] до транспортних ризиків відносить: ризик зайвих витрат при транспортуванні продукції, який спричинено невірним визначенням найбільш економічного шляху, ризик затримки постачання та ризик псування сировини або матеріалів, які спричинено зовнішніми факторами. Під зовнішніми факторами в роботі пропонується вважати: аварії, ремонтні роботи, затримка транспорту на митниці та інше. Хоча в роботі і йдеться про проблематику визначення маршруту переве-

зення вантажу, але автор не зосереджує увагу на будь-якій кількісній оцінці ризику зайвих витрат від аварії та інших факторів, які віднесено до зовнішніх.

Для оцінки та запобігання транспортним ризикам у логістиці на підприємствах організовано системи управління транспортною логістикою. В більшості наукових досліджень в системі управління транспортною логістикою пропонується використовувати спеціальні програмні продукти. Для оптимізації поставок між виробниками в залежності від потреб споживача в роботі [6] запропоновано використовувати спеціальне програмне забезпечення (Design for Six Sigma), яке мінімізує ймовірність помилок складської та транспортної логістики, пов'язаних з затриманням поставки. Статистична інформація стосовно ДТП для визначення безпечного маршруту авторами роботи не використовувалась, що, на наш погляд, зменшує цінність запропонованого програмного забезпечення. У роботі [7] був розроблений високоякісний алгоритм моніторингу GPS, заснований на концепції усвідомлення контексту, який пропонується застосовувати з інтелектуальними транспортними послугами в реальному часі для інтеграції змін у стан цілісності навігаційної системи. Автори наголошують, що система позиціонування стає все більш важливою вимогою до інтелектуальних транспортних систем на базі місцезнаходження, наприклад, електронного збору плати за проїзд, громадського транспорту та служб контролю за рухом. І, хоча прогнозування кількості можливих ДТП на маршруті можна віднести до інтелектуальних транспортних послуг, таке питання авторами дослідження не було прийнято до уваги. Проблематика довіри даним програм GTFS для громадського транзиту поставлена у статті [8], де доводиться відмінність звичайних результатів вимірювань відстані та часу на пересування від даних програми. Автори пропонують шлях до більш точних вимірювань відстаней, часу та безпеки пересування. Не зважаючи на те, що в статті йдеться в тому числі про безпекову складову громадського транзиту, проблему вибору маршруту з найменшою прогнозованою кількістю ДТП автори залишили поза увагою. Для більш ефективного управління інвестиціями в галузі логістики автори роботи [9] пропонують структуру управління логістикою на підприємстві ValLog, яка ґрунтується на інфраструктурі Val IT. Елементи управління транспортною логістикою входять до запропонованої структури. Але автори дослідження зосередили увагу на питанні контролю інвестицій в логістику, тому питання прогнозування ДТП при виборі певного маршруту залишилося поза їх увагою.

Іншим напрямом наукових досліджень з транспортної логістики є мінімізація аварійності на автомобільних дорогах за рахунок планування безпечної інфраструктури. Результати дослідження аварійності руху на об'їзних дорогах Австралії від різних параметрів дороги [10] показали, що збільшення кількості смуг в'їзду, ширини в'їзду, радіусу в'їзду, обсягу руху, ширини дороги циркуляції та обмеження швидкості мають позитивні наслідки на безпеку в дорозі. З іншого боку, збільшення кількості вихідних ліній, ширини виходу, радіуса виходу, діаметрів центрального острова та наявність закріпленого об'єкта на центральному острові негативно впливають на безпеку шляхів. Дослідження є важливим з точки зору підвищення безпеки руху при будівництві дорожньої інфраструктури, але питання, які пов'язані з аналізом статистики ДТП на дорогах певних територіальних одиниць для зменшення аварійності, в роботі не роз-

глянуто . У статті [11] введено поняття «вантажний дизайн». Автори досліджують інформацію про щільність населення та його зайнятість для чотирьох великих столиць: Нью-Йорк, Лос-Анджелес, Париж та Сеул з побудовою вантажної ландшафтної матриці. Оцінки рівня конвергенції та розбіжності між щільністю населення та зайнятістю є підґрунтям для отримання ландшафту вантажоперевезень. На наш погляд, врахування статистичних даних щодо виникнення ДТП в розглянутих регіонах певним чином покращило б ландшафт вантажоперевезень з точки зору його безпекової складової, але ця інформація залишилась поза увагою дослідників. Підходи щодо багаторівневої ієрархічної системи показників оцінки якісного стану ділянки автомобільної дороги розглянуті в роботі [12]. Розроблено модель вагомостей параметрів та характеристик автомобільних доріг для їх оцінки у якості дорожнього активу. На наш погляд, кількісна оцінка прогнозованої кількості ДТП на досліджуваних дорогах за даними статистичних спостережень може бути переведена у певну якісну оцінку і також характеризувати безпекову складову дорожнього активу, але це питання автори не розглядали. Масштабні транспортні інфраструктурні проекти (LSTIP), які виникли з першочергової необхідності швидкого та зручного транспортування зростаючого населення, а також численні ризики, пов'язані з ними, й їх особливості в країнах Європи та Азії розглянуто в роботі [13]. Проблематика збільшення ДТП у зв'язку зі збільшенням населення в роботі розглядається, але кількісних методів визначення прогнозованої кількості ДТП автори не наводять.

Ще одним напрямом, де досліджуються питання щодо зниження аварійності на автомобільних дорогах, є дослідження впливу на аварійність стану водія. У дослідженні [14] проаналізовані фактори, які впливають на функціональний стан водія в транспортному заторі, і характер їх впливу. Наведена нелінійна математична модель впливу транспортного затору на функціональний стан водія. Автори прогнозують стан водія та, відповідно, ймовірність виникнення ДТП. Дослідження авторів з Туреччини [15] визначає взаємозв'язок між аваріями на дорожньому транспортному засобі та серйозними травмами з втомою, необережною поведінкою та сном. Багатоваріантна логістична регресія, отримана за даними декількох вибірових спостережень, виявила, що надмірна швидкість, втома, пропуски, помилки, показник сонливості Стенфорда, порушення, використання мобільних телефонів та шкала сонливості Епворта були значно пов'язані з наявністю травм при аварії автомобіля після коригування досвіду їзди та щорічного пробігу. Дані цього дослідження дозволяють прогнозувати аварійність на дорогах. На наш погляд, врахування статистики ДТП у прогнозуванні її виникнення додало б моделям, які отримані в роботах [14, 15], більшої достовірності, але автори її не врахували. В роботі [16] досліджується безпека інтернаціоналізації внутрішніх дорожніх перевезень у Європейському Союзі. Визначено, що ризик аварій важких вантажних транспортних засобів (HGV) варіюється з коефіцієнтом до 10 в європейських країнах і що ризик аварійності іноземних HGV приблизно в два рази вищий, ніж у європейських HGV. В роботі визначається ризик ДТП на ґрунті огляду дослідницьких робіт, а інформація щодо кількості ДТП зі статистичних джерел не використовується. Диференціація європейських країн щодо статистики по ДТП також залишилась поза увагою авторів.

Наукові дослідження щодо вибору маршруту доставки вантажу, зазвичай, пов'язані з мінімізацією витрат на доставку або штрафів. Так, у роботі [17] розглядається проблема пошуку оптимальної маршрутизації одного транспортного засобу зі стохастичним попитом для кожного замовника. В роботі розроблено алгоритм динамічного програмування для визначення оптимальної політики маршрутизації. На наш погляд, проблематика оптимальної маршрутизації має включати безпекову складову, але автори дослідження цей аспект до уваги не взяли. В роботі [18] розглядається розподіл транспортних засобів різних типів для транспортування продукції від фірми-виробника до її складів. Проблема пов'язана з обмеженою кількістю транспортних засобів різної місткості з постійними та змінними витратами, а також із механізмом знижок. Авторами запропонована нелінійна математична модель, яка мінімізує загальні транспортні витрати. Загальні транспортні витрати, на наш погляд, також мінімізуються від зменшення ДТП, в які може потрапити транспортний засіб, але автор дослідження залишили цю проблему поза увагою.

Як видно з проведеного аналізу наукових робіт, для мінімізації аварій при транспортуванні вантажів існує певна кількість підходів. Більшість з них не використовує статистику з ДТП для оцінки безпекової складової маршруту, що на наш погляд, є важливим напрямом наукового дослідження. За його результатами автоперевізники та підприємства отримують можливість по-перше, прорахувати прогнозовану кількість ДТП при переміщенні тим чи іншим маршрутом, і, по-друге, отримують інструментарій вибору маршруту з мінімальною кількістю прогнозованих ДТП. Для осіб, які приймають рішення, з'являється можливість обрати маршрут, враховуючи переваги з економії витрат та безпеки доставки.

3. Ціль та задачі дослідження

Метою дослідження є розробка методу мінімізації прогнозованої кількості ДТП при транспортуванні вантажів підприємства.

Для досягнення мети вирішуються такі задачі:

- запропонувати алгоритм виявлення залежності ДТП в певних регіонах країни від інших факторів дорожнього руху та поділу регіонів на кластери з високим та низьким показником ДТП;
- обґрунтувати науково-методичний підхід визначення маршруту з мінімальною прогнозованою кількістю ДТП серед декількох можливих маршрутів, які пов'язують пункти відправлення та призначення;
- навести розв'язок задачі багатокритеріальної оптимізації з вибору маршруту з найменшою відстанню та мінімальною прогнозованою кількістю ДТП за Парето-оптимальним підходом.

4. Теоретичні аспекти дослідження

4.1. Алгоритм виявлення залежності ДТП в певних регіонах країни від інших факторів дорожнього руху та поділу регіонів на кластери з високим та низьким показником ДТП

Припустимо, що можливість пошкодження або втрати продукції при її транспортуванні залежить від якості доріг в країні, справності та надійності ру-

хомого складу транспортних підприємств, виду транспортування та статистики дорожньо-транспортних пригод, яка ведеться в кожній країні. Статистична звітність стосується одиниць територіального устрою країни. За міжнародними стандартами статистики та обліку для автомобільних доріг територіальних одиниць країни систематично оновлюється інформація щодо обсягу перевезених вантажів, вантажообігу, середньої відстані перевезення однієї тони вантажів автомобільним транспортом, довжини автомобільних доріг загального користування, тощо. Ключовими показниками пропонується вважати довжину автомобільних доріг територіальної одиниці країни та кількість ДТП на цій території за певний проміжок часу. Інші показники можна використовувати в якості змінних для формування кластерів з територіальних одиниць країни з високим та низьким показником ДТП. Пропонується такі кластери називати «Регіони з високим показником ДТП» та «Регіони з низьким показником ДТП».

Для кожного кластера за даними довжини автомобільних доріг та кількості ДТП за певний період часу пропонується розраховувати показник ДТП, який дорівнює середній кількості ДТП, які можуть статися на одному кілометрі дороги відповідного кластера за один день.

4. 2. Науково-методичний підхід визначення маршруту з мінімальною прогнозованою кількістю ДТП серед декількох можливих маршрутів, які пов'язують пункти відправлення та призначення

При виборі маршруту для перевезення вантажів підприємство, зазвичай, керується підходом мінімізації витрат на переміщення вантажу. Тобто, оптимальним є найкоротший маршрут для перевезення вантажу. Науково-методичні підходи з вибору оптимального маршруту доставки вантажів та пасажирів, зазвичай, стосуються вибору найкоротшого шляху, який пов'язує пункти відправлення та призначення. В сучасних програмних продуктах для пошуку найкоротшого маршруту використовується алгоритм [19], наприклад, він широко застосовується в програмуванні і технологіях за протоколами маршрутизації OSPF і IS-IS. Інший підхід, який пропонується, – вибирати маршрут з мінімальною прогнозованою кількістю ДТП.

Розглянемо підходи щодо визначення найкоротшого маршруту та маршруту з мінімальною прогнозованою кількістю ДТП. При переміщенні вантажу з пункту *A* в пункт *B* можливі такі випадки:

– пункти *A* та *B* розміщені поруч та належать до одного з кластерів. Наприклад, обидва пункти входять у кластер «Регіони з високим показником ДТП», або обидва входять у кластер «Регіони з низьким показником ДТП».

– хоча б один з пунктів *A* чи *B*, або хоча б один з можливих маршрутів доставки вантажу з пункту *A* в пункт *B* включає елемент іншого кластера.

В першому випадку два підходи (найкоротшого шляху та мінімальної прогнозованої кількості (ДТП) дають однаковий результат, оскільки найкоротший шлях буде мати й мінімальну прогнозовану кількість ДТП.

Розглянемо існуючі науково-практичні підходи щодо визначення оптимального маршруту перевезення. Це завдання виникає у разі існування декількох

альтернативних варіантів вибору маршруту від пункту A в пункт B . Розв'язок, зазвичай, знаходиться за допомогою орієнтованого графу (рис. 1).

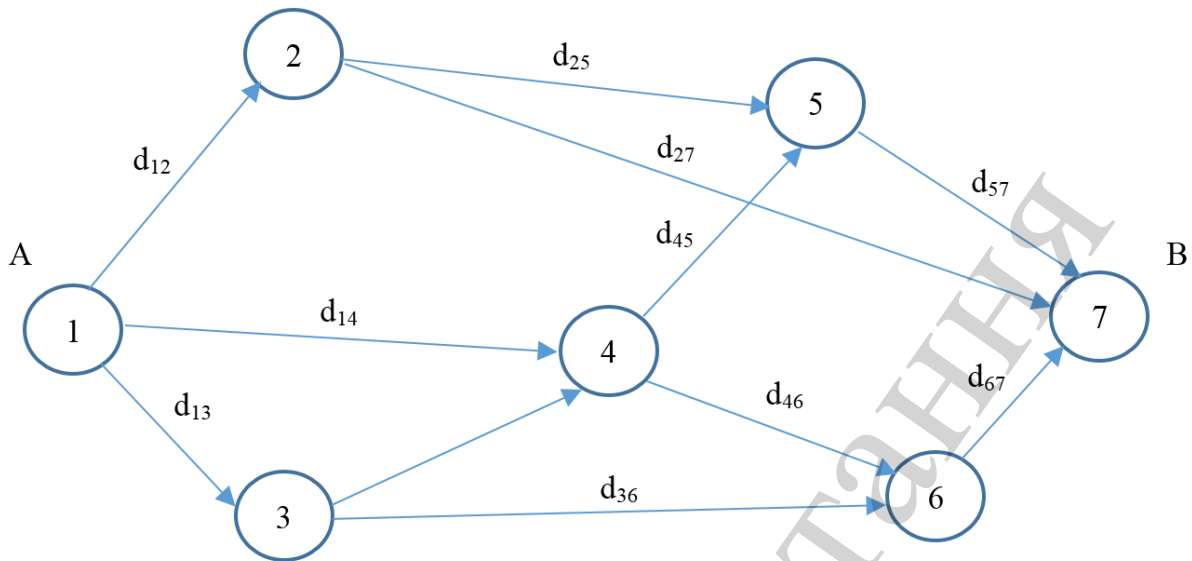


Рис. 1. Приклад мережі доріг, які пов'язують пункти A та B

Позначимо через d_{ij} відстань між суміжними пунктами мережі i та j . Через U_j – довжину найкоротшого з маршрутів з пункту 1 в пункт j . Для прикладу, який наведено на рис. 1, процедура знаходження маршруту, відстань якого від п. A до п. B буде мінімальною, закінчиться тоді, коли буде знайдено U_7 .

Для визначення U_7 , зазвичай, використовують метод Дейкстри [18], зміст якого ґрунтується на визначенні найкоротшого шляху на кожному етапі за формулою

$$U_j = \min_{1 \leq i < j-1} \{U_i + d_{ij}\}. \quad (1)$$

Для прикладу на рис. 1:

$$U_1 = 0;$$

$$U_2 = \min\{U_1 + d_{12}\};$$

$$U_3 = \min\{U_1 + d_{13}\};$$

$$U_4 = \min\{U_2 + d_{24}, U_1 + d_{14}, U_3 + d_{34}\};$$

$$U_5 = \min\{U_2 + d_{25}, U_4 + d_{45}\};$$

$$U_6 = \min\{U_3 + d_{36}, U_4 + d_{46}\};$$

$$U_7 = \min\{U_2 + d_{27}, U_5 + d_{57}, U_6 + d_{67}\}.$$

U_7 для розглянутого прикладу – оптимальний за довжиною маршрут. У разі, коли всі пункти 1, 2, ..., 7 знаходяться в одному кластері мінімальна прогнозована кількість ДТП, $R_{Accident}(AB)$, визначається, як добуток довжини оптимального маршруту, U_7 , на показник ДТП відповідного кластера

$$R_{Accident}(AB) = U_7 * R_{Accident}(\text{відповідний кластер}), \quad (2)$$

де $R_{Accident}(AB)$ – мінімальна прогнозована кількість ДТП при переміщенні з п. A в п. B , U_7 – оптимальний за довжиною маршрут для прикладу з рис. 1 км; $R_{Accident}(\text{відповідний кластер})$ – показник ДТП відповідного кластеру, який дорівнює прогнозованій середній кількості ДТП на один кілометр дороги, ДТП/км.

Для другого випадку – знаходження маршруту з мінімальною прогнозованою кількістю ДТП – пропонується скористатися іншим підходом. До вузлових точок, якими позначаються початок та кінець руху, а також точки з'єднання, або роз'єднання доріг (в прикладі на рис. 1 це точки 1, 2, ..., 7), пропонується додати ще кілька вузлів. У випадку поділення на кластери цими вузлами будуть границі кластерів. Наприклад, у випадку, який зображено на рис. 2 і який є модифікацією рис. 1, маршрут проходить через регіони, які відносяться до двох різних кластерів. Лінія відокремлює два кластери.

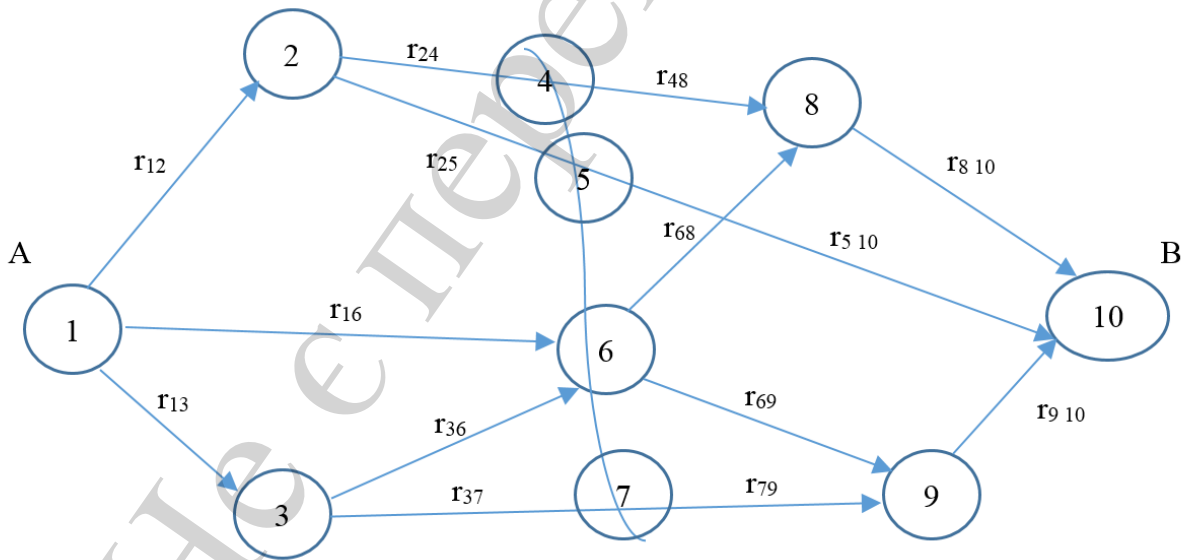


Рис. 2. Приклад мережі доріг, які пов'язують пункти A та B в різних кластерах

В цьому разі пропонується ввести додаткові пункти, які поділяють регіони з різних кластерів. В прикладі рис. 2 – це пункти 4, 5 та 7. Вони не є вузловими, але важливо їх позначити на шляху, бо вони поділяють зони з різним показником ДТП.

На ребрах графу пропонується позначати не просто відстань між вершинами, а відстань помножену на показник ДТП відповідного кластера. Прогнозована кількість ДТП при переміщенні від п. i до п. j позначимо r_{ij}

$$r_{ij}=d_{ij}*R_{Accident}(\text{відповідного кластера}), \quad (3)$$

де r_{ij} – прогнозована кількість ДТП на маршруті, який поєднує пункти i та j (ДТП); d_{ij} – відстань між пунктами i та j (км); $R_{Accident}$ (відповідного кластера) – показник ДТП відповідного кластеру (ДТП/км).

Через R_j позначимо мінімальну прогнозовану кількість ДТП при переміщенні з пункту 1 в пункт j . Для її знаходження пропонується використовувати підхід, який є аналогічним визначенню найкоротшого шляху.

$$R_j = \min_{1 \leq i < j-1} \{ R_i + r_{ij} \}, \quad (4)$$

де R_j – мінімальна прогнозована кількість ДТП при переміщенні з п. 1 в п. j , ДТП; R_i – прогнозована кількість ДТП при переміщенні з п.1. в п. i , ДТП; r_{ij} – прогнозована кількість ДТП на маршруті, який поєднує пункти i та j , ДТП.

Мінімальну прогнозовану кількість ДТП на всьому маршруті – R_{10} – в цьому випадку позначимо $R'_{Accident}(AB)$. Маршрут, який відповідає цьому випадку, позначимо $U'(AB)$.

Для перевезення вантажів підприємство може вибрати дві стратегії:

- стратегію найкоротшого маршруту, тобто вибір $U(AB)$;
- стратегію мінімальної прогнозованої кількості ДТП, тобто вибір маршруту $U'(AB)$.

При виборі стратегії найкоротшого шляху мається на увазі, що всі дороги, які поєднують пункти A та B є однаковими за якістю, тобто витрати пального за будь-яким шляхом не змінюються суттєво.

Власники транспортних засобів та власники вантажів можуть бути різними суб'єктами господарської діяльності. Як власники вантажів, так і власники транспортних засобів, мають можливість запобігання транспортним логістичним ризикам завдяки страхуванню транспортних засобів – «каска» та вантажів – «карго». Договір страхування вантажу складається, як правило, за одним з трьох варіантів: з відповідальністю за всі транспортні логістичні ризики; з відповідальністю за окрему аварію або без відповідальності за пошкодження, крім випадків загибелі.

Особа, яка приймає рішення (ОПР), не завжди буде схилитися до вибору стратегії найкоротшого шляху. Не дивлячись на наявність страхового захисту, як перевізник, так і власник вантажу, з великою ймовірністю будуть схилитися до вибору шляху з мінімальною прогнозованою кількістю ДТП.

Вибір найкоротшого шляху або шляху з мінімальною прогнозованою кількістю ДТП визначається, зазвичай, виходячи з того, що є більш важливим для ОПР: оптимізувати витрати на доставку або надійність доставки вантажу. Вибір

однієї з двох стратегій – стратегії найкоротшого шляху або стратегії мінімальної прогнозованої кількості ДТП ОПР, може розглядатися як скінчена гра двох гравців з нульовою сумою, тобто як матрична гра. Де перший гравець – ОПР, другим гравцем є непередбачуваність, яка пов’язана з транспортуванням, і може приймати також два можливих стани: сталася ДТП або не сталася.

Розглянемо перший підхід щодо прийняття рішення ОПР: оптимізувати витрати на доставку вантажу. Гра може бути представлена платіжною матрицею (табл. 1).

Таблиця 1

Платіжна матриця з вибору стратегії ОПР – витрати підприємства

Альтернативні варіанти для особи, яка приймає рішення (ОПР)	Можливі стани транспортування	
	ДТП не станеться	ДТП станеться
Стратегія найкоротшого шляху	a_{11}	a_{12}
Стратегія мінімальної прогнозованої кількості ДТП	a_{21}	a_{22}

Елементи матриці a_{ij} можуть виражати витрати підприємства при умові, що ОПР вибере i стратегію, а процес транспортування відбудеться за стратегією j .

Платіжну матрицю A можна записати так

$$A = \begin{bmatrix} -U(AB) \cdot p & -(U(AB) \cdot p + fine) \\ -U'(AB) \cdot p & -(U'(AB) \cdot p + fine) \end{bmatrix},$$

де елементи матриці всі від’ємні, так як характеризують витрати підприємства, та обчислюються таким чином:

a_{11} – довжина найкоротшого маршруту з пункту A до пункту B – $U(AB)$ помножується на витрати пального на кілометр – p ;

a_{12} – до a_{11} додаються певні витрати або штраф ($fine$), які понесе підприємство у разі потрапляння в ДТП, це можуть бути втрати від простою, псування, або перекладання вантажу на справний транспорт та інше;

a_{21} – довжина маршруту з мінімальною прогнозованою кількістю ДТП – $U'(AB)$ помножується на витрати пального на кілометр – p ;

a_{22} – до a_{21} додаються певні витрати штраф ($fine$), які понесе підприємство у разі потрапляння в ДТП.

Знайдемо нижню та верхню ціни гри у цьому випадку:

$$\alpha = \max_i \min_j a_{ij} = \max \left\{ -(U(AB) \cdot p + fine); -(U'(AB) \cdot p + fine) \right\} = -(U(AB) \cdot p + fine) -$$

$$\beta = \min_j \max_i a_{ij} = \min \left\{ -U(AB) \cdot p; -(U(AB) \cdot p + fine) \right\} = -(U(AB) \cdot p + fine) - \text{верхня ціна}$$

Оскільки $\alpha = \beta$ гра, яка розглядається, має сідлову точку $\gamma = -(U(AB) * p + fine)$, яка є чистою ціною гри.

Таким чином, за наведеними умовами гри, підприємству варто дотримуватися стратегії найкоротшого шляху з пункту A до пункту B , тоді його витрати (виграш) складуть $U(AB) \cdot p + fine$.

Розглянемо інший випадок, коли елементи матриці a_{ij} виражають надійність доставки вантажу, тобто можливість доставки без дорожньо-транспортних подій.

Матриця A для випадку, коли виграш підприємства – це надійність доставки вантажу, має вигляд

$$A = \begin{bmatrix} 100 - R_{Accident}(AB) & 100 - k \cdot R_{Accident}(AB) \\ 100 - R'_{Accident}(AB) & 100 - k \cdot R'_{Accident}(AB) \end{bmatrix},$$

де елементи матриці пропонується обчислювати таким чином:

a_{11} – надійність доставки за першою стратегією – стратегією вибору найкоротшого маршруту – вона дорівнює $100 - R_{Accident}(AB)$ (прогнозовану кількість аварій на найкоротшому маршруті пропонується віднімати від значно більшого числа, наприклад, ста);

a_{12} – припущення аварійної ситуації при доставці вантажу має значно зменшувати надійність доставки. Нехай в цьому випадку надійність дорівнює $100 - k \cdot R_{Accident}(AB)$, де k – важливість надійної доставки для відправника або отримувача, яка має бути значно більше одиниці, наприклад, може дорівнювати 10;

a_{21} – надійність доставки за другою стратегією – стратегією мінімальної прогнозованої кількості ДТП – вона дорівнює $100 - R'_{Accident}(AB)$;

a_{22} – аналогічно до a_{12} отримаємо $100 - k \cdot R'_{Accident}(AB)$.

Знайдемо нижню та верхню ціни гри у цих випадках:

$$\alpha = \max_i \min_j a_{ij} = \max \{100 - k \cdot R_{Accident}(AB); 100 - k \cdot R'_{Accident}(AB)\} =$$

$$= 100 - k \cdot R_{Accident}(AB) - \text{нижня ціна гри};$$

$$\beta = \min_j \max_i a_{ij} = \min \{100 - R'_{Accident}(AB); 100 - k \cdot R'_{Accident}(AB)\} =$$

$$= 100 - k \cdot R'_{Accident}(AB) - \text{верхня ціна гри}.$$

Оскільки $\alpha = \beta$ гра, яка розглядається, має сідлову точку $\gamma = 100 - k \cdot R'_{Accident}(AB)$, яка є чистою ціною гри.

Таким чином, за наведеними умовами другої гри, підприємству варто дотримуватися стратегії мінімальної прогнозованої кількості ДТП, тоді мінімальна надійність доставки вантажу складе $100 - k \cdot R'_{Accident}(AB)$.

4. 3. Розв'язок задачі багатокритеріальної оптимізації з вибору маршруту з найменшою відстанню та мінімальною прогнозованою кількістю ДТП за Парето-оптимальним підходом

При виборі одної з двох альтернатив: найкоротшого шляху перевезення або маршруту з мінімальною прогнозованою кількістю ДТП важливим є не тільки розуміння ОПР щодо важливості кожної з них, а також співвідношення ключових характеристик цих альтернатив (табл. 2).

Таблиця 2

Співвідношення ключових характеристик альтернатив щодо вибору шляху транспортування

Альтернативні варіанти для особи, яка приймає рішення (ОПР)	Ключові характеристики альтернатив	
	Довжина шляху доставки	Прогнозована кількість ДТП на шляху доставки
Стратегія найкоротшого шляху	$U(AB)$	$R_{Accident}(AB)$
Стратегія мінімальної прогнозованої кількості ДТП	$U'(AB)$	$R'_{Accident}(AB)$

Зрозуміло, що за визначенням ключових характеристик завжди будуть відбуватися такі співвідношення:

$$U(AB) < U'(AB); R'_{Accident}(AB) < R_{Accident}(AB).$$

Для особи, яка приймає рішення, важливим є те, який знак можна поставити між відношенням прогнозованих кількостей ДТП $R_{Accident}(AB) / R'_{Accident}(AB)$ та відношенням відстаней $U'(AB) / U(AB)$. Тут можливі три випадки:

$$\frac{R_{Accident}(AB)}{R'_{Accident}(AB)} = \frac{U'(AB)}{U(AB)}.$$

У першому випадку прогнозована кількість ДТП за найкоротшим маршрутом так само відноситься до мінімальної прогнозованої кількості ДТП за відповідним маршрутом, як відстань маршруту з мінімальною прогнозованою кількістю ДТП до найкоротшої відстані. В цьому випадку не можна виділити аргументованої переваги однієї з двох стратегій для ОПР.

$$\frac{R_{Accident}(AB)}{R'_{Accident}(AB)} > \frac{U'(AB)}{U(AB)}.$$

В другому випадку вибір найкоротшого маршруту не є виправданим. Особі, яка приймає рішення, варто схилитися до обрання маршруту з мінімальною прогнозованою кількістю ДТП, оскільки в цьому разі збільшення витрат на паливе дозволяє значно підвищити надійність доставки.

$$\frac{R_{\text{Accident}}(AB)}{R'_{\text{Accident}}(AB)} < \frac{U'(AB)}{U(AB)}.$$

У третьому випадку особі, яка приймає рішення, варто схилитися до вибору найкоротшого маршруту, оскільки витрати підприємства на пальне, при виборі маршруту з мінімальною прогнозованою кількістю ДТП, значно перевищують вигоди від збільшення надійності доставки.

Особа, яка приймає рішення щодо вибору маршруту перевезення вантажу, може прагнути мінімізувати як довжину шляху, так і прогнозовану кількість ДТП. В такому разі завдання вибору оптимального маршруту можна розглядати як багатокритеріальну оптимізацію за двома критеріями: довжина шляху та прогнозована кількість ДТП.

Як вже йшлося, найкоротший маршрут та маршрут з мінімальною прогнозованою кількістю ДТП можуть співпадати, але, зазвичай, шлях з мінімальною прогнозованою кількістю ДТП не коротший, ніж шлях з найменшою відстанню. В тому разі, коли ці два критерії мають різні розв'язки, єдиного рішення така задача не має. Тому, в цьому випадку пропонується знаходити Парето-оптимальне рішення.

Припустимо, що поєднують пункти A та B n маршрутів u_i , $i=1, \dots, n$, кожному маршруту u_i відповідає прогнозована кількість ДТП – r_i . Тоді Парето-оптимальне рішення є розв'язком задачі

$$F_{\alpha, \beta}(u, r) = \alpha u + \beta r \rightarrow \min, \quad (5)$$

де α , β – коефіцієнти, причому $\alpha + \beta = 1$; u – довжина шляху певного маршруту, км; r – прогнозована кількість ДТП на певному маршруті, ДТП.

Величини α та β особа, яка приймає рішення, обирає з власних міркувань. Можливі три варіанти:

- якщо переваги для будь якої альтернативи немає, тобто однаково важливим є й найкоротший шлях, й мінімальна прогнозована кількість ДТП, то $\alpha = \beta = 0,5$;
- якщо особі більш важливим є вибір найкоротшого шляху, то $\alpha > \beta$;
- якщо найбільш пріоритетним є вибір маршруту з мінімальною прогнозованою кількістю ДТП, то $\alpha < \beta$.

Наприклад, влітку та на початку осені для ОПР більш важливим буде вибрати найкоротший маршрут, тому, що дороги в цей період, зазвичай, у гарному стані. Навпроти, взимку та навесні ОПР може віддати перевагу маршруту, де прогнозована кількість ДТП є мінімальною.

Для вибору оптимального за Парето розв'язку ОПР рекомендується скласти таблицю (табл. 3), де містяться всі можливі маршрути перевезення вантажу з відповідною прогнозованою кількістю ДТП.

Таблиця 3
Розв'язання багатокритеріальної задачі за Парето

№ маршруту	u	r	$\alpha u + \beta r$
1	u_1	r_1	$\alpha u_1 + \beta r_1$
2	u_2	r_2	$\alpha u_2 + \beta r_2$
...
i	u_i	r_i	$\alpha u_i + \beta r_i$
...
n	u_n	r_n	$\alpha u_n + \beta r_n$

Для різних комбінацій пар α та β знаходять єдине мінімальне Парето-оптимальне значення $F_{\alpha,\beta}(u, r) = \alpha u + \beta r \rightarrow \min$. В останньому стовпчику табл. 3 обирається мінімальне значення, яке відповідає певній комбінації α та β та є Парето-оптимальним рішенням.

5. Апробація методу вибору маршруту з мінімальною прогнозованою кількістю ДТП

Запропонований метод був апробований для визначення маршруту з мінімальною прогнозованою кількістю ДТП на прикладі автомобільних доріг України. На першому етапі розглядалася ситуація зі статистикою дорожньо-транспортних подій в регіонах країни та інші показники автомобільних доріг, за якими проводилася кластеризація регіонів країни.

За даними Державного комітету статистики України, лідером за дорожньо-транспортними пригодами у 2017 році стала Одеська область (14609 ДТП), на другому місці Харківська область (12029 ДТП), на третьому Львівська та Київська області (11576 та 11530 ДТП відповідно) (табл. 4).

За даними табл. 4 була побудована кореляційна матриця (табл. 5).

З табл. 5, середній кореляційний зв'язок можна спостерігати між кількістю ДТП та вантажообігом (0,67), а також між кількістю ДТП та довжиною автомобільних доріг (0,57). Середня відстань перевезення однієї тони має середній кореляційний зв'язок з вантажообігом (0,48).

За допомогою кластерного аналізу проведено угруповання регіонів України для визначення груп з більшими або меншими показниками ДТП. З'ясуємо, якою є оптимальна кількість груп за даними табл. 4, з виключенням змінної «Середня відстань перевезення однієї тони вантажів». За ієрархічним кластерним аналізом з методом кластеризації Варда, який було проведено за допомогою програми SPSS Statistics 21, дістаємо висновок, що оптимальною кількістю є два кластери. Це підтверджує план агломерації дендрограми кластерного аналізу (рис. 3).

Таблиця 4

Вихідні дані для угруповання (кластеризації) регіонів України у 2017 році [20]

Регіони	Перевезення вантажів автомобільним транспортом за регіонами, млн. т	Вантажообіг автомобільного транспорту за регіонами, млн. ткм	Середня відстань перевезення однієї тонни вантажів автомобільним транспортом за регіонами, км	Довжина автомобільних доріг загального користування за регіонами, тис. км	Кількість ДТП, од
Україна	1121,7	62296,8	56	163,1	162526
Вінницька	27,8	1672,7	60	9,5	3223
Волинська	13,0	2401,7	185	6,2	3132
Дніпропетровська	328,1	4815,6	15	9,2	11203
Донецька	105,1	2367,3	23	8,1	3534
Житомирська	43,4	990,9	23	8,5	4158
Закарпатська	8,7	5285,6	604	3,3	2874
Запорізька	30,4	1522,8	50	7,0	5923
Івано-Франківська	20,2	1690,9	84	4,1	2935
Київська	48,9	4191,6	86	8,6	11530
Кіровоградська	45,8	1470,5	32	6,3	1612
Луганська	4,9	477,2	98	5,9	839
Львівська	23,2	4604,1	198	8,4	11576
Миколаївська	20,5	1466,5	72	4,8	3865
Одеська	24,1	2886,9	120	8,3	14609
Полтавська	173,0	2563,0	15	8,9	4083
Рівненська	19,2	2270,0	118	5,1	2386
Сумська	12,6	765,8	61	7,2	1853
Тернопільська	16,7	1321,9	79	5,0	2325
Харківська	32,4	4478,3	138	9,6	12029
Херсонська	13,4	1353,5	101	5,0	3593
Хмельницька	32,2	2151,3	67	7,2	3249
Черкаська	30,1	3074,6	102	6,2	4064
Чернівецька	6,9	1272,3	185	2,9	2564
Чернігівська	11,7	1173,8	100	7,7	2728

Таблиця 5

Кореляційна матриця показників регіонів України за 2017 рік

Показники автомобільних доріг країни	Перевезення вантажів	Вантажообіг	Середня відстань перевезення однієї тони вантажів	Довжина автомобільних доріг загального користування	Кількість ДТП
Перевезення вантажів	1	0,38	-0,33	0,45	0,32
Вантажообіг	0,38	1	0,48	0,27	0,67
Середня відстань перевезення однієї тони вантажів	-0,33	0,48	1	-0,47	-0,02
Довжина автомобільних доріг загального користування	0,45	0,27	-0,47	1	0,57
Кількість ДТП	0,32	0,67	-0,02	0,57	1

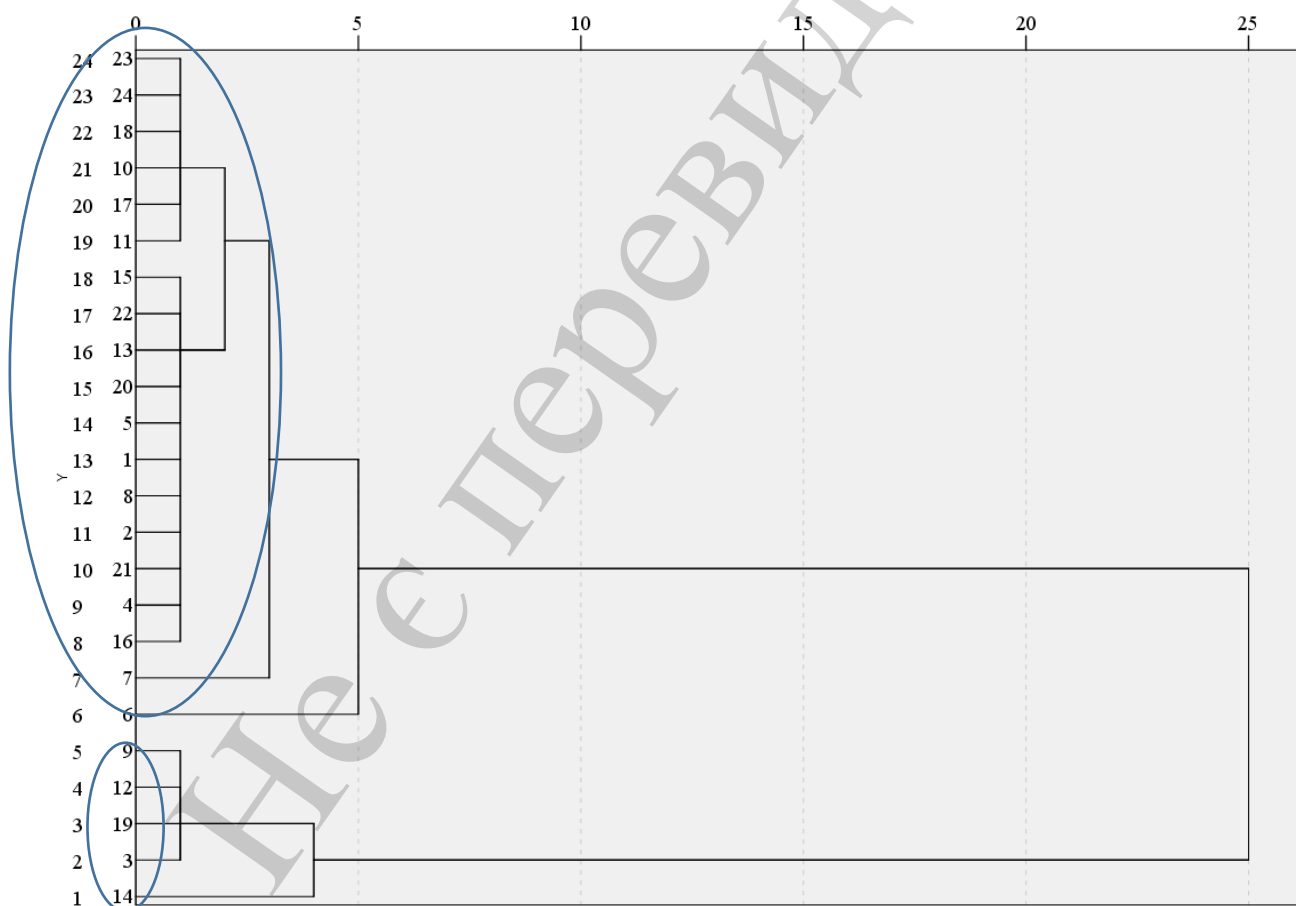


Рис. 3. Дендрограма методу Варда кластерного аналізу

Характеристику кожного з кластерів отримаємо за методом к-середніх (табл. 6).

Таблиця 6
Кінцеві кластерні центри кластерного аналізу

Середні значення	Кластер	
	1	2
Перевезення вантажів	33,45	91,34
Вантажообіг	1857,49	4195,30
Довжина автомобільних доріг загального користування	6,26	8,82
Кількість ДТП	3102,11	12189,40

Перший кластер містить 19 областей (табл. 7). Перевезення вантажів в середньому дорогами областей цього кластера складає 33,45 млн. тон на рік, що майже втричі менше, ніж в другому. Середній вантажообіг в цьому кластері в 2,26 разів менший, ніж в другому (1857,49 млн. ткм проти 4195,3 млн. ткм). Середня довжина автомобільних доріг загального користування в областях цього кластера в 1,4 рази менша, ніж в областях другого кластера. Середня кількість ДТП в областях цього кластера в 3,9 разів менша, ніж в другому кластері.

Таблиця 7
Число спостережень в кожному кластері

Кластер	1	19,000
	2	5,000
Валідні		24,000
Пропущені		0,000

Назвемо перший кластер «*Регіони з низьким показником ДТП*». До нього входять дев'ятнадцять областей: Вінницька, Волинська, Донецька, Житомирська, Закарпатська, Запорізька, Івано-Франківська, Кіровоградська, Луганська, Миколаївська, Полтавська, Рівненська, Сумська, Тернопільська, Херсонська, Хмельницька, Черкаська, Чернівецька, Чернігівська.

Другий кластер назвемо «*Регіони з високим показником ДТП*». До нього входять п'ять областей: Дніпропетровська, Київська, Львівська, Одеська та Харківська області. (рис. 4).

Ймовірність потрапити в ДТП для автотранспортного засобу, який рухається дорогами регіонів другого кластера, значно більша, ніж для першого кластера. Пропонується показник ДТП в кожному з отриманих кластерів розраховувати як відношення середньої кількості ДТП за рік (СРЗНАЧ_ДТП) до середньої довжини автомобільних доріг загального користування (СРЗНАЧ_ДАД) поділеної на кількість днів у році. Тобто, показник ДТП за змістом відповідає середній кількості ДТП на один км доріг за одну добу і розраховується за формулою:

$$R_{\text{ДТП}} = \text{СРЗНАЧ_ДТП} / \text{СРЗНАЧ_ДАД} / 365. \quad (6)$$

Для першого кластера показник ДТП дорівнює

$$R_{\text{ДТП}}(\text{I кл})=3102,11/6260/365=0,0014 \text{ ДТП/км.} \quad (7)$$

Для другого кластера показник ДТП дорівнює:

$$R_{\text{ДТП}}(\text{II кл})=12189,4/8820/365=0,0037 \text{ ДТП/км.} \quad (8)$$

Як видно з (7), (8), частота потрапляння в ДТП на дорогах загального призначення другого кластера майже втричі вища, ніж на дорогах першого.



Рис. 4. Кластери регіонів України з низьким та високим показниками ДТП

В табл. 5 за коефіцієнтами кореляції було отримано висновки щодо суттєвого зв'язку кількості ДТП за рік з вантажообігом ($r=0,67$). Натомість, при плануванні пересувань транспортних засобів дорогами країни, пропонується використовувати показник довжини автомобільних доріг загального призначення, який слабше пов'язаний з кількістю ДТП ($r=0,57$), але є більш зручним для розрахунків у задачах з визначення оптимального шляху для перевезення вантажу. Для розрахунку прогнозованої кількості ДТП при виборі певного маршруту пропонується відстань, яку планується проїхати дорогами регіонів з першого кластера, помножити на показник ДТП для регіонів з першого кластера, а відстань, яку планується проїхати дорогами регіонів з другого кластера, на показник ДТП для регіонів з другого кластера й додати ці два добутки.

До визначення прогнозованої кількості ДТП при пересуванні дорогами загального призначення певного регіону можна використовувати підхід, який не ви-

магає використання кластерного аналізу. Для цього за даними табл. 4 пропонується отримати показники ДТП для кожного окремого регіону за формулою (6) без усереднення значень. Тобто, кількість ДТП на рік поділити на довжину доріг загального призначення та на кількість днів у році. За цим підходом отримуємо таблицю показників ДТП у 2017 році для кожного регіону окремо (табл. 8).

Таблиця 8
Оцінка показників ДТП для регіонів України

Регіон	Показник ДТП/км	Регіон	Показник ДТП/км
Вінницька	0,0009	Миколаївська	0,0022
Волинська	0,0014	Одеська	0,0048
Дніпропетровська	0,0033	Полтавська	0,0013
Донецька	0,0012	Рівненська	0,0013
Житомирська	0,0013	Сумська	0,0007
Закарпатська	0,0024	Тернопільська	0,0013
Запорізька	0,0023	Харківська	0,0034
Івано-Франківська	0,0020	Херсонська	0,0020
Київська	0,0037	Хмельницька	0,0012
Кіровоградська	0,0007	Черкаська	0,0018
Луганська	0,0004	Чернівецька	0,0024
Львівська	0,0038	Чернігівська	0,0010

Такий підхід є більш детальним у визначенні прогнозованої кількості ДТП на певному маршруті й вимагає більш кропітких розрахунків.

На другому етапі вибір маршруту з мінімальною прогнозованою кількістю дорожньо-транспортних подій вибирається для певного завдання з переміщення вантажу.

Припустимо, що з Державного підприємства Харківського машинобудівного заводу «ФЕД» (ДП ХМЗ «ФКД») необхідно відправити вантаж на Житомирський машинобудівний завод. Зобразимо схематично логістичну задачу перевезення груза з п. А (м. Харків) до п. В (м. Житомир) (рис. 5).

Розглянемо першу стратегію вибору маршруту з найменшою відстанню від п. А до п. В. Для визначення U_6 знайдемо найкоротший шлях на кожному етапі за формулою

$$U_j = \min_{1 \leq i \leq j-1} \{U_i + d_{ij}\};$$

$$U_1 = 0;$$

$$U_2 = U_1 + d_{12} = 133, U_3 = U_2 + d_{23} = 133 + 211 = 344;$$

$$U_4 = U_3 + d_{34} = 344 + 151 = 495;$$

$$U_5 = \min \{U_2 + d_{25}, U_3 + d_{35}, U_4 + d_{45}\} = \min \{463, 506, 572\} = 463;$$

$$U_6 = \min \{U_4 + d_{46}, U_5 + d_{56}\} = \min \{598, 614\} = 598.$$

Маршрут, який має найменшу довжину – 1, 2, 5, 6, або Харків, Полтава, Київ, Житомир. Його довжина 598 км.

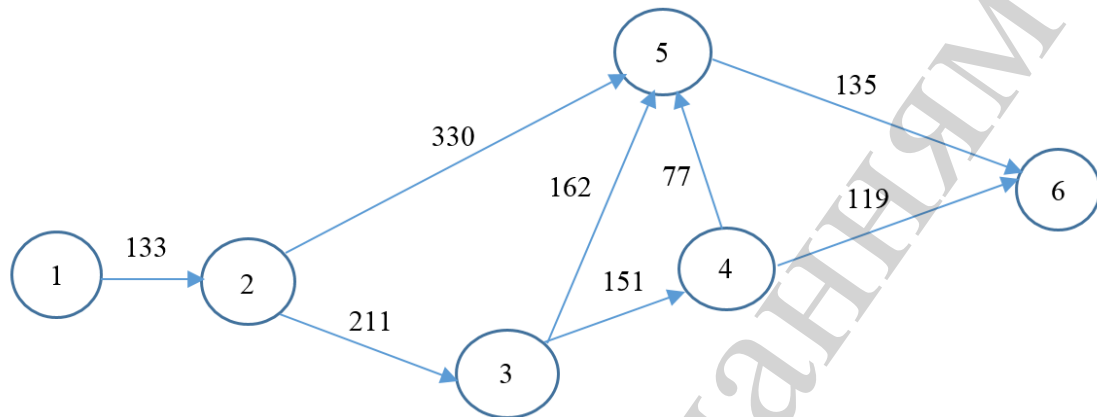


Рис. 5. Карта маршрутів, які поєднують п.А та п.В: 1 – Харків, 2 – Полтава, 3 – Черкаси, 4 – Біла Церква, 5 – Київ, 6 – Житомир

За другою стратегією – вибору маршруту з мінімальною прогнозованою кількістю ДТП – можливі два підходи: кластерний та регіональний. Обидва підходи вимагають додавання на карту проміжних пунктів, де є межа, яка поділяє регіони, через які проходить дорога. При кластерному підході два регіони – Київ та Харків відносяться до регіонів з високим показником ДТП, інші пункти відносяться до кластера з низьким показником ДТП (рис. 6).

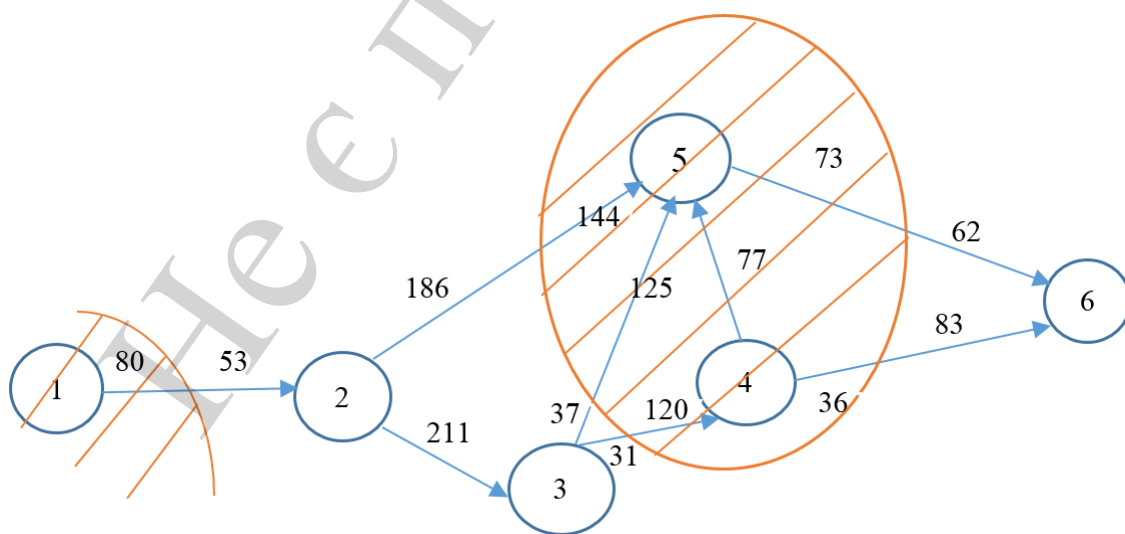


Рис. 6. Карта маршрутів, які поєднують п. А та п. В: 1 – Харків, 2 – Полтава, 3 – Черкаси, 4 – Біла Церква, 5 – Київ, 6 – Житомир.

При кластерному підході для ребер графу, які поєднують його вершини, розрахуємо прогнозовану кількість ДТП на маршруті. Границі областей з високим показником ДТП на рис. 6 окреслені та виділені помаранчевим кольором.

Показник ДТП для регіонів з першого кластера – 0,0014 ДТП/км, для другого – 0,0037 ДТП/км. Таким чином, отримаємо:

$$\begin{aligned}r_{12} &= 80 \cdot 0,0037 + 53 \cdot 0,0014 = 0,3702 \text{ ДТП}; \\r_{23} &= 211 \cdot 0,0014 = 0,2954 \text{ ДТП}; \\r_{25} &= 144 \cdot 0,0037 + 186 \cdot 0,0014 = 0,7932 \text{ ДТП}; \\r_{34} &= 120 \cdot 0,0037 + 31 \cdot 0,0014 = 0,4874 \text{ ДТП}; \\r_{35} &= 125 \cdot 0,0037 + 37 \cdot 0,0014 = 0,7932 \text{ ДТП}; \\r_{45} &= 77 \cdot 0,0037 = 0,2849 \text{ ДТП}; \\r_{46} &= 73 \cdot 0,0037 + 62 \cdot 0,0014 = 0,3569 \text{ ДТП}; \\r_{56} &= 36 \cdot 0,0037 + 83 \cdot 0,0014 = 0,2494 \text{ ДТП}.\end{aligned}$$

Для знаходження мінімальної прогнозованої кількості ДТП скористаємося підходом, аналогічним для визначення найкоротшого шляху:

$$R_j = \min_{1 \leq i \leq j-1} \{R_i + r_{ij}\};$$

$$R_1 = 0;$$

$$R_2 = R_1 + r_{12} = 0,3702;$$

$$R_3 = R_2 + r_{23} = 0,3702 + 0,2954 = 0,6655;$$

$$R_4 = R_3 + r_{34} = 0,6655 + 0,4874 = 1,1529;$$

$$R_5 = \min \{R_2 + r_{25}, R_3 + r_{35}, R_4 + r_{45}\} = \min \{1,1634; 1,4587; 1,4378\} = 1,1634;$$

$$R_6 = \min \{R_4 + r_{46}, R_5 + r_{56}\} = \min \{1,4098; 1,4128\} = 1,4098.$$

Маршрут, який має мінімальну прогнозовану кількість ДТП, 1, 2, 5, 6, або Харків, Полтава, Київ, Житомир. Його довжина 614 км. Прогнозована кількість ДТП на цьому маршруті складе 1,4098, що є мінімальною прогнозованою кількістю ДТП серед всіх маршрутів. Альтернативний маршрут з найменшою довжиною 598 км має прогнозовану кількість ДТП 1,4128.

Наведемо ці дані в вищезазначених термінах:

$$U(AB) = 598 \text{ км};$$

$$U'(AB) = 614 \text{ км};$$

$$R_{Accident}(AB) = 1,4098 \text{ ДТП};$$

$$R'_{Accident}(AB) = 1,4128 \text{ ДТП}.$$

Розрахуємо відношення

$$\frac{U'(AB)}{U(AB)} = \frac{614}{598} = 1,027 \text{ та } \frac{R_{Accident}(AB)}{R'_{Accident}(AB)} = \frac{1,4128}{1,4098} = 1,002.$$

Як бачимо в цьому випадку справедливим є третій випадок співвідношення, тобто $\frac{R_{Accident}(AB)}{R'_{Accident}(AB)} < \frac{U'(AB)}{U(AB)}$.

Особі, яка приймає рішення, варто схилитися до вибору найкоротшого шляху, оскільки витрати підприємства на паливе, при виборі шляху з мінімальною прогнозованою кількістю ДТП, перевищують вигоди від збільшення надійності доставки.

Складемо таблицю для визначення Парето-оптимального рішення (табл. 9).

Таблиця 9
Визначення оптимального за Парето рішення

№ маршруту	u	r	$0,3u + 0,7r$	$0,8u + 0,2r$
1 (1,2,5,6)	598	1,4128	180,39	478,68
2 (1,2,3,4,6)	614	1,4098	185,19	491,48
3 (1,2,3,5,6)...	641	1,4588	193,32	513,09
4 (1,2,3,4,5,6)	707	1,6873	213,28	565,94

В першому випадку більш важливим для ОПР є мінімальна прогнозована кількість ДТП, тому пошук мінімуму здійснюється за критерієм $0,3u + 0,7r$. В другому випадку більш важливим для ОПР є визначення маршруту з найменшою довжиною, тому пошук мінімуму здійснюється за критерієм $0,8u + 0,2r$. Як видно з табл. 9, в обох випадках оптимальним буде перший маршрут, з найменшою відстанню між пунктом відправлення та пунктом призначення.

6. Обговорення результатів застосування методу вибору маршруту з мінімальною прогнозованою кількістю ДТП

Алгоритм кластеризації територіальних одиниць країни за показниками ДТП ґрунтується на визначенні груп регіонів зі схожими показниками статистичної звітності, серед яких: обсяг перевезених вантажів, вантажообіг, довжина автомобільних доріг загального користування, кількість ДТП. За результатами апробації алгоритму на прикладі автомобільних доріг регіонів України було виокремлено дві групи регіонів: в групу «Регіони з високим ризиком ДТП» увійшло п'ять областей, де показник ДТП (кількість ДТП на один км) був втричі вищим,

ніж в другій групі з дев'ятнадцяти областей «Регіони з низьким показником ДТП». Пояснити такий результат можна, насамперед, тим, що регіони з високим показником ДТП мають обласні центри – міста мільйонники. Міста-мільйонники мають більший трафік автомобільного руху та більший вантажообіг, але відношення середньої кількості ДТП регіонів першого кластеру до регіонів другого кластеру значно перевищує всі інші співвідношення. Тому поділ територіальних одиниць на групи з низьким та високим ризиком ДТП дозволяє покращити безпеку дорожнього руху, що є практичним результатом дослідження.

Науковий результат дослідження полягає в обґрунтуванні науково-методичного підходу визначення маршруту з мінімальною прогнозованою кількістю ДТП серед декількох можливих маршрутів, які пов'язують пункти відправлення та призначення. Прогнозована кількість ДТП для кожного з можливих маршрутів перевезення вантажу розраховується за формулою, в якій відстань, яку долає транспортний засіб в певному кластері, помножується на показник ДТП цього кластера. Таким чином, для кожного маршруту можна отримати прогнозований показник ДТП та вибрати маршрут з його мінімальним значенням за методом, аналогічним вибору найкоротшого шляху. За результатами апробації було визначено маршрут з мінімальною прогнозованою кількістю ДТП, який виявився на 16 км довшим за маршрут з мінімальною відстанню. Пояснюються такі результати тим, що за результатами платіжної матриці з вибору стратегії підприємства у випадку мінімальних витрат завжди перевагу має стратегія найкоротшого шляху, а у випадку максимальної надійності завжди переважає стратегія вибору маршруту з мінімальною прогнозованою кількістю ДТП.

Розв'язок задачі багатокритеріальної оптимізації з вибору маршруту з найменшою відстанню та мінімальною прогнозованою кількістю ДТП за Парето-оптимальним підходом дозволяє особі, яка приймає рішення, вибрати маршрут з врахуванням двох підходів: мінімальної прогнозованої кількості ДТП та найкоротшого маршруту. В залежності від того, який підхід більш важливий, йому надається відповідна вага й розраховується значення цільової функції для всіх можливих маршрутів. За результатами апробації з'ясувалося, що маршрут, який має найменшу відстань, є Парето-оптимальним як за найменшою відстанню, так і за мінімальною прогнозованою кількістю ДТП. Пояснити такий результат можна тим, що найкоротший маршрут та маршрут з найменшою прогнозованою кількістю ДТП як за відстанню, так і за кількістю ДТП, відрізняються досить незначно.

На відміну від інших досліджень, де говориться, що аварійність на дорогах залежить від трафіку дорожнього руху, стану втомленості водія, національного походження водія, кількості смуг руху та ін., запропонований метод ґрунтується на показниках статистичної звітності, що виключає будь-які суб'єктивні припущення та оцінки й надає йому певні переваги. Також важливим є те, що в запропонованому методі особа, яка приймає рішення щодо вибору маршруту, завжди може порівняти відношення прогнозованої кількості ДТП на маршрутах з найменшою відстанню й найменшою кількістю ДТП та відношення відстаней на цих маршрутах й прийняти рішення щодо цінових та безпекових переваг, а також визначитися з маршрутом за Парето-оптимальним підходом.

Таким чином, рішення поставлених задач дослідження закривають його проблему частину за рахунок надання інструментарію використання статистичної інформації з ДТП для вибору безпечного маршруту, тобто маршруту з найменшою прогнозованою кількістю ДТП. Завдяки кластеризації територіальних одиниць за показниками ДТП дослідник отримує карту з регіонами, де цей показник високий та низький. Плануючи маршрут перевезення вантажу, дослідник має можливість прорахувати прогнозовану кількість ДТП за кожним маршрутом та вибрати найбільш безпечний.

При застосуванні запропоновано методу на практиці є певні обмеження. Взагалі вони пов'язані з наявністю статистичних даних щодо ДТП для певних територіальних одиниць. При наявних даних щодо довжини автомобільних доріг певної територіальної одиниці та кількості ДТП метод застосовувати можна. Будь-які інші фактори, які впливають на аварійність, метод не враховує.

Недоліком дослідження можна вважати досить загальні підходи щодо поділу територіальних одиниць на регіони з високим та низьким показником ДТП. Такий поділ здійснювався за наявної інформації зі статистичної звітності. Статистична звітність стосується області в цілому, це може впливати на точність показника ДТП, тому що в області дороги різні за якістю, трафіком, кількістю смуг та інше. Більш детальні звіти щодо статистики ДТП, наприклад за певними районами чи дорогами, дозволять більш точно розраховувати показники ДТП.

В подальшому, для вдосконалення методу вибору маршруту з мінімальною прогнозованою кількістю ДТП, до даних зі статистики ДТП варто додати дані з запланованих дорожніх робіт, трафіку та якості доріг на певних маршрутах. Це дозволить враховувати більше факторів, які мають запобігти ДТП або зменшити її ймовірність.

7. Висновки

1. Запропоновано алгоритм щодо поділу територіальних одиниць країни на кластери, які названо «Регіони з низьким показником ДТП» та «Регіони з високим показником ДТП». Підхід ґрунтується на даних статистики ДТП та показниках, які характеризують автомобільні дороги територіальних одиниць країни. В апробації алгоритму за кластерним аналізом територіальних одиниць країни за методом Варда на певному прикладі було отримано дві групи територіальних одиниць. Середні показники кількості ДТП в першій групі були втричі менші, ніж в другій групі. Для кожного кластеру запропоновано розраховувати показник ДТП, який визначається як відношення середньої кількості ДТП за рік до середньої довжини доріг та кількості днів в поточному році. Тобто, показник ДТП – це кількість ДТП, які можуть відбутися при переміщенні автотранспортної одиниці одним кілометром доріг відповідного кластеру на протязі доби.

2. Науково-методичний підхід вибору маршруту з мінімальною прогнозованою кількістю ДТП ґрунтується на визначенні для кожного ребра орієнтованого графу, який відображає всі можливі маршрути переміщення вантажу з початкового пункту в кінцевий, відповідної прогнозованої кількості ДТП, яка розраховується, як добуток довжини ребра в км на показник ДТП відповідного кластера (ДТП/км). Для кожного з проміжних пунктів обирається маршрут з

мінімальною прогнозованою кількістю ДТП за аналогією вибору маршруту з мінімальною відстанню. Для наведеного прикладу маршрут з мінімальною прогнозованою кількістю ДТП виявився на 16 км довшим за маршрут з мінімальною відстанню між пунктом відправлення та пунктом доставки.

3. Сформульовано задачу багатокритеріальної оптимізації для випадку, коли особа, яка приймає рішення, має певні ваги для вибору маршруту з найменшою відстанню та вибору маршруту з мінімальною прогнозованою кількістю ДТП. Розв'язком такої задачі запропоновано вважати мінімум критерія двофакторної оптимізації, який розраховано за всіма можливими маршрутами. В наведеному оптимальним як за довжиною так і за мінімальною прогнозованою кількістю ДТП виявився один й той самий маршрут.

Література

1. Окландер, М. А. (2004). Логістична система підприємства. Одеса: Астропринт, 312.
2. Oklander, M., Oklander, T., Pedko, I., Yashkina, O. (2017). Development of the subsystem of forecasting for the system of marketing information management at an industrial enterprise. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (3 (89)), 39–51. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.111547>
3. Fuchs, H. (2009). Risk orientation in logistics: a management approach to risk treatment in logistics systems. Graz: Verl. der techn. Univ. Graz, 182.
4. Вітлінський, В. В., Скіцько, В. І. (2013). Концептуальні засади моделювання та управління логістичним ризиком підприємства. *Проблеми економіки*, 4, 246–253.
5. Яшкін, Д. С. (2016). Методи оптимізації в управлінні логістичними ризиками промислових підприємств. *ЕКОНОМІКА: реалії часу*, 5 (27), 52–58.
6. Mitchell, E. M., Kovach, J. V. (2016). Improving supply chain information sharing using Design for Six Sigma. *European Research on Management and Business Economics*, 22 (3), 147–154. doi: <https://doi.org/10.1016/j.iedee.2015.02.002>
7. Binjammaz, T. A., Al-Bayatti, A. H., Al-Hargan, A. H. (2016). Context-aware GPS integrity monitoring for intelligent transport systems. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 3 (1), 1–15. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2015.09.002>
8. Wessel, N., Farber, S. (2019). On the accuracy of schedule-based GTFS for measuring accessibility. *Journal of Transport and Land Use*, 12 (1), 475–500. doi: <https://doi.org/10.5198/jtlu.2019.1502>
9. Jereb, B. (2017). Mastering logistics investment management. *Transformations in Business and Economics*, 16 (1 (40)), 100–120.
10. Al-Marafi, M. N., Somasundaraswaran, K., Ayers, R. (2019). Developing crash modification factors for roundabouts using a cross-sectional method. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2018.10.012>

11. Rodrigue, J.-P., Dablanc, L., Giuliano, G. (2017). The freight landscape: Convergence and divergence in urban freight distribution. *Journal of Transport and Land Use*, 10 (1), 557–572. doi: <https://doi.org/10.5198/jtlu.2017.869>
12. Slavinska, O., Stozhka, V., Kharchenko, A., Bubela, A., Kvatadze, A. (2019). Development of a model of the weight of motor roads parameters as part of the information and management system of monetary evaluation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (3 (97)), 46–59. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.156519>
13. Yucelgazi, F., Yitmen, İ. (2018). An ANP Model for Risk Assessment in Large-Scale Transport Infrastructure Projects. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 44 (5), 4257–4275. doi: <https://doi.org/10.1007/s13369-018-3314-z>
14. Guliev, N. U. (2012). Nonlinear model of the effect of traffic congestion on the functional state of driver. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (3 (55)), 51–53. URL: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/3301/3102>
15. Bener, A., Yildirim, E., Özkan, T., Lajunen, T. (2017). Driver sleepiness, fatigue, careless behavior and risk of motor vehicle crash and injury: Population based case and control study. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 4 (5), 496–502. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2017.07.005>
16. Nævestad, T.-O., Bjørnskau, T., Høvi, I. B., Phillips, R. O. (2014). Safety outcomes of internationalization of domestic road haulage: a review of the literature. *Transport Reviews*, 34 (6), 691–709. doi: <https://doi.org/10.1080/01441647.2014.981883>
17. Kyriakidis, E. G., Dimitrakos, T. D. (2017). Stochastic single vehicle routing problem with ordered customers and partial fulfilment of demands. *International Journal of Systems Science: Operations & Logistics*, 6 (3), 285–299. doi: <https://doi.org/10.1080/23302674.2017.1381888>
18. Hashemi, Z., Tari, F. G. (2016). A Prufer-based genetic algorithm for allocation of the vehicles in a discounted transportation cost system. *International Journal of Systems Science: Operations & Logistics*, 5 (1), 1–15. doi: <https://doi.org/10.1080/23302674.2016.1226980>
19. Dijkstra, E. W. (1959). A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik*, 1 (1), 269–271. doi: <https://doi.org/10.1007/bf01386390>
20. State Statistics Service of Ukraine. URL: <http://www.ukrstat.gov.ua>